

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CORRESPONDIENTE A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO M- 7000 DE UNA REFINERÍA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Delgado G., Ana M.
para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2008.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CORRESPONDIENTE A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO M- 7000 DE UNA REFINERÍA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Andrés Rosales

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Fernando Urdaneta

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. DELGADO G, Ana M.
para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2008.

Caracas, noviembre 2008

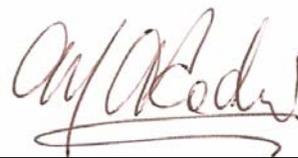
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Ana María Delgado González, titulado:

“Evaluación del sistema de enfriamiento correspondiente a la torre de enfriamiento M-7000 de una refinería”

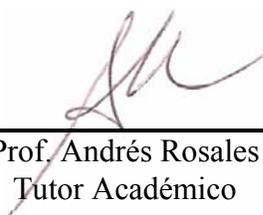
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Químico, y sin que esto signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.



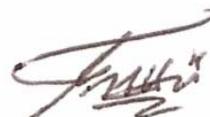
Prof. Mary Luz Alonso
Jurado



Prof. María Alejandra Rodríguez
Jurado



Prof. Andrés Rosales
Tutor Académico



Ing. Fernando Urdaneta
Tutor Industrial

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a la Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras, por haberme permitido aprender, vivir, sufrir, reír, compartir y disfrutar de las más inolvidables experiencias académicas y personales. Sin duda, los mejores años de mi vida hasta el momento. La Universidad donde siempre quise estudiar, y la que nunca defraudó mis expectativas. Siempre seré UCVista, que viva la UCV!!!.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi tutor académico, Prof. Andrés Rosales, y a mi tutor industrial, Ing. Fernando Urdaneta. A Andrés, por haberme aceptado cuando nadie más quería aceptar esa responsabilidad, por haberme guiado y quedarse conmigo hasta las 9 de la noche corrigiendo el tomo (aun cuando vive muy lejos y estaba agobiado de trabajo), gracias por hacer más de lo que está dentro de tus responsabilidades, gracias por tu apoyo, gracias por dar el máximo por el simple placer de ayudar, GRACIAS. Al Ing. Fernando, no tengo palabras para agradecer lo que ha hecho por mí y mis compañeros de VEPICA, no podría encontrar mejor tutor, mejor jefe, más que un tutor, un amigo, preocupado por nuestro desarrollo, poniendo nuestros intereses académicos como prioridad, apoyándonos incondicionalmente; espero que a lo largo de mi vida profesional, que comienza a partir de hoy, pueda encontrar personas con la mitad de los conocimientos y de la calidad humana que Ud. posee, INFINITAS GRACIAS!!!.

A los profesores, Humberto Kum y Trino Romero por apoyarme incondicionalmente en este proceso de búsqueda y desarrollo tanto de mi carrera como de mi tesis, por preocuparse tanto por mí y por el cariño recibido, GRACIAS.

A mi FAMILIA, Papi y Mami, yo sé que siempre dicen que mis logros son míos que yo los conseguí, que yo soy la única responsable de mis éxitos, pero lo que soy lo soy gracias a ustedes, al amor, a la entrega y a los sacrificios con los que me han llevado en estos 24 años de vida, el agradecerles me llevaría las 132 páginas de la tesis, ustedes saben cuanto los amo y no hace falta decirlo con palabras, Papi TE AMO, Mami TE AMO, que suerte la mía!!!. A mis hermanas, hermano, a mis tres hermosas sobrinas, a mi mami y mis cuñados, Trily, Marianella, Mariú, Marysabel, Nelly, José Alberto, Mariana, Alejandra, Miranda, Silvia Jazmín, Satu, Danny y Héctor, gracias por no desheredarme de todas las reuniones a las que falté, gracias por ser mi apoyo, el hombro donde llorar, la casa donde dormir, la impresora donde imprimir, la cerveza que tomarme cuando estaba mal, el carro que chocar, el DIRECTV que ver, la ayuda económica cuando estaba pelando, las sonrisas y los abrazos que me brindaron el mayor antiestrés posible (y gratis), la comidita que comer, no me imagino la vida sin ustedes, no me imagino una mejor familia, no podría sentirme más querida, y otra vez que suerte la mía!!!!. A mis tías y primos (si los nombro a todos se me acaban las páginas), ustedes saben quiénes son, Vanessa, tía Alicia, tía Gisela, tía Carmen, Dayana... gracias por apoyarme, por regañarme cuando lo necesitaba, por brindarme su hogar, su comprensión, por compartir conmigo mis

tristezas y mis alegrías, por tomar en cuenta mis problemas y comprenderlos aún y cuando existen problemas peores, por darme momentos de felicidad cuando mas los necesitaba, los amo infinitamente!!!!.

A mi segunda familia, los Rodríguez. Daniel, mi hermano, que te puedo decir, ¿puede alguien saber y entender mas lo que sufrí?, ¿puede alguien conocerme mas?, nunca lo decimos (y no lo vuelvo a repetir) pero es el momento perfecto, te adoro!!!!, no hay palabras para describir una amistad tan pura, sincera y única como la nuestra, lo logramos amigo!!!, ya somos ingenieros, GRACIAS, GRACIAS, GRACIAS. Sra. Raquel, Sr. David, Daniela y Dalmiro, no se qué hice para merecer tanto cariño de parte de ustedes, son mi familia, me han apoyado y querido mucho mas de lo que me pudiese imaginar, de lo que me merezco, de lo que yo les he dado, no tienen idea de lo importantes que son para mí y de lo que los quiero, GRACIAS, en serio GRACIAS por todo, sin ustedes no lo habría logrado, QUE FAMILIA!!!!.

A mis amigos. Neglin, eres mi hermana, mi paño de lágrimas, eres una de las personas mas importantes en mi vida, gracias por estar ahí SIEMPRE, por hacer de mis problemas los tuyos, por hacer de mis alegrías las tuyas, te quiero demasiado, es imposible que esta amistad no dure para siempre, nos vemos en los Chinos para tomarnos unas y jugar dominó, y de nuevo, te quiero hermana!!!. Napo y Alfon, que bárbaro como podemos estar separados un tiempo y cuando nos vemos de nuevo es como si el tiempo no hubiese pasado, como nos queremos de la misma manera, siempre aparecen en los momentos donde mas los necesito, nuestros viajes, nuestras llorantinas comunes, todo por lo que hemos pasado juntos, ¿Qué fuerte no?, gracias por ser quienes son, personas tan transparentes no se consiguen casi nunca, y yo los conseguí a ustedes, de nuevo, que suerte la mía!!!. Alicia, Bianca, David, Janny y Raque (en orden alfabético para que no haya problemas), gracias por soportarme!!!, ustedes no se merecen a esta energúmena como amiga, gracias por sus llamadas, mensajes, visitas, gracias por preocuparse por mi tesis como si fuera la de ustedes, gracias por estos años de amistad, por haber compartido tantas cosas juntos, por perdonar mis histerias, por seguirme queriendo, gracias por ser mis amigos, los quiero mucho como la trucha al trucho, nos vemos en casa de Janny para tomarnos unas. A César, El Cocho, Daniela, Efra, Faby, Fran, Gaby, Johann, Jonamet, Jorge, Jos, Kathy, Mon, el Mudo, Ramón y Vito, gracias por tantos momentos, son lo máximo, nos vemos en la Parroquia!!!.

A mis amigos del cole, Daniela y Claudio, cuántos años de amistad, los adoro!!!, gracias por quererme a pesar de mi abandono, por apoyarme y estar pendiente de mi y mi tesis siempre. A Maru y Gaby, las VEPIQUENSES, muchas gracias por regañarme tanto para que escribiera el tomo, por hacerme cronogramas y por escucharme siempre, son lo máximo!!!!, poco tiempo de amistad pero muy sustancioso, sigamos así!!!!.

A todos..... GRACIAS TOTALES!!!

Delgado G., Ana M.

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CORRESPONDIENTE A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO M- 7000 DE UNA REFINERÍA

Tutor académico: Prof. Andrés Rosales. Tutor industrial: Ing. Fernando Urdaneta. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2008, 132 pp.

Palabras claves: Agua de enfriamiento, Eficiencia de enfriamiento, Eficiencia térmica, Capacidad térmica, Capacidad hidráulica, Ciclos de concentración, Tratamiento de aguas.

Resumen. Las torres de enfriamiento son equipos que se encargan de enfriar el agua que es usada como servicio de enfriamiento en otros procesos industriales. Las torres se diseñan bajo ciertas condiciones las cuales varían a lo largo del tiempo ya sea por modificaciones en los procesos, cambio de las condiciones ambientales o por la contaminación y desgaste del equipo. Es por esto, que surge la necesidad de evaluar el desempeño de las torres de enfriamiento y ajustar las condiciones de operación para obtener agua a las condiciones de temperatura y pureza deseadas.

En el presente Trabajo Especial de Grado se evaluaron los factores térmicos e hidráulicos y las impurezas del agua que afectan el desempeño de la torre de enfriamiento M-7000 de una refinería y se proponen los cambios pertinentes que permitirán el mejoramiento de su eficiencia global.

Los resultados obtenidos indicaron que la torre maneja actualmente caudales de agua de hasta 88000 gpm, la eficiencia de enfriamiento es de 55% y la eficiencia térmica es de 85%, lo cual se traduce en una disminución de la capacidad térmica del 19%. Desde el punto de vista hidráulico, la operación no presenta problemas, ya que, esta capacidad es de 90700 gpm, valor mayor al máximo caudal de operación actual. El flujo de agua de reposición requerido para mantener los ciclos de concentración en 7 (valor deseado) fue calculado en un valor promedio de 1118 gpm, menor al flujo de reposición actual, este último siendo un valor fijo independientemente del flujo de recirculación de la torre, indicando que no se está efectuando un control de contaminantes. Los contaminantes presentes en el agua de reposición se encuentran dentro de los límites de concentración máximos permitidos excepto por la alcalinidad total y por el sulfato de sodio, causantes de que el agua tenga una tendencia incrustante (índice de saturación de 1,2 e índice de estabilidad de 5,8). El estudio de la dosificación de químicos arrojó que se está dosificando 49% menos caudal de ácido sulfúrico que el requerido para el control de la alcalinidad, y que se está sobredosificando cloro para el control del crecimiento microbiológico.

En tal sentido, los cambios propuestos más importantes son: realizar una limpieza en los componentes de la torre de enfriamiento, reemplazar los empaques dañados, modificar el caudal de reposición y disminuir el caudal de recirculación de la torre, ajustar la dosificación de químicos para garantizar la reducción de impurezas en el agua de recirculación e instalar un sistema de control de purga e inyección de agua de reposición para garantizar los ciclos de concentración deseados.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>xi</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	<i>xiii</i>
<i>LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS</i>	<i>xv</i>
<i>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN</i>	<i>1</i>
I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
I.2. OBJETIVOS	3
I.3. ANTECEDENTES	4
<i>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</i>	<i>8</i>
II.1. PSICROMETRÍA	8
II.1.1 Humedad Absoluta	8
II.1.2 Humedad Relativa	9
II.1.3 Temperatura de bulbo seco.....	10
II.1.4 Temperatura de bulbo húmedo (Tbh).....	10
II.1.5 Entalpía Húmeda	10
II.1.6 Volumen Húmedo	11
II.1.7 Calor Húmedo	12
II.2. TORRES DE ENFRIAMIENTO	12
II.2.1 Tipos de Torres de Enfriamiento.....	14
II.2.2 Componentes de una Torre de Enfriamiento.....	16
II.3. FACTORES QUE AFECTAN LA OPERACIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.....	19
II.3.1 Temperatura de bulbo húmedo.....	19
II.3.2 Carga calórica.....	21
II.3.3 Flujo de agua de recirculación (L).....	21

II.3.4 Acercamiento o aproximación.....	22
II.3.5 Rango de enfriamiento (ΔT).....	22
II.3.6 Recirculación del aire.....	22
II.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL AGUA	23
II.4.1. Integral de Merkel	25
II.4.2. Diagrama de Entalpía, representación gráfica de la integral de Merkel... 27	
II.5. EVALUACIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.....	30
II.5.1 Coeficientes característicos (KaV/L)	30
II.5.2 Determinación de la capacidad térmica de una torre de enfriamiento a partir de datos de prueba	33
II.5.2.1 Cuando las curvas de rendimiento están disponibles	33
II.5.2.2 Cuando las curvas de rendimiento no están disponibles, pero se tiene la curva característica de la torre.....	35
II.5.2.3 Cuando no se dispone ni de las curvas de rendimiento ni de la curva característica de la torre	37
II.5.3 Determinación de la capacidad hidráulica de una torre de enfriamiento .. 38	
II.5.4 Eficiencia térmica y de enfriamiento de una torre de enfriamiento	38
II.6 CALIDAD DEL AGUA EN TORRES DE ENFRIAMIENTO.....	39
II.6.1 Impurezas presentes en el agua de enfriamiento	40
II.6.2 Problemas encontrados en Torres de Enfriamiento.....	42
II.6.3. Agua de reposición.....	45
II.6.4. Tratamientos realizados a Torres de Enfriamiento.....	48
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	50
III.1. DATOS DEL DISEÑO	50
III.2. COMPONENTE EXPERIMENTAL.....	51
III.3. BASES DE LA EVALUACIÓN	51
III.4. PLAN DE TRABAJO	52
III.4.1. Comportamiento de las variables de operación	52

III.4.2. Cálculo de la relación líquido-gas y del coeficiente característico de diseño o coeficiente requerido.	53
III.4.3. Determinación de la curva de requerimientos de diseño y de la curva característica de la torre.	56
III.4.4. Cálculo de la capacidad térmica.....	58
III.4.5. Cálculo de la capacidad hidráulica.....	58
III.4.6. Determinación del caudal de reposición o make-up deseado (L'_{MU}).....	59
III.4.7. Determinación de los ciclos de concentración de contaminantes.....	59
III.4.8. Determinación del Índice de Saturación y el Índice de Estabilidad.....	60
III.4.9. Estudio del control de impurezas.....	60
CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
IV.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUAL.....	63
IV.2. COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN.....	63
IV.3. CURVA CARACTERÍSTICA Y CURVA DE REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	74
IV.4. CAPACIDAD TÉRMICA DE LA TORRE.....	75
IV.5. CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LA TORRE.....	77
IV.6. CAUDAL DE REPOSICIÓN.....	79
IV.7. EFECTO DE LOS CONTAMINANTES DEL AGUA Y CONTROL DE IMPUREZAS DE LA TORRE.....	81
IV.7.1. Ciclos de concentración por contaminante.....	82
IV.7.2. Tendencia del agua de reposición.....	83
IV.7.2. Dosificación de ácido sulfúrico.....	83
IV.7.3. Dosificación de cloro.....	84
IV.7.4. Dosificación del multifuncional XLP-3252.....	86
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
V.1 CONCLUSIONES.....	88

V.2 RECOMENDACIONES	90
<i>CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	<i>91</i>
<i>CAPÍTULO VII. APÉNDICES</i>	<i>93</i>

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	Pág.
Tabla 1. Condiciones de diseño original de la torre M-7000	5
Tabla 2. Tipos de Torres de enfriamiento	14
Tabla 3. Compuestos que afectan a las torres de enfriamiento	41
Tabla 4. Datos para el cálculo rápido del Índice de saturación y de estabilidad.....	44
Tabla 5. Límites de concentración de impurezas permitidos en el agua de recirculación para agua fresca.....	47
Tabla 6. Dosificación de cloro para eliminar diferentes contaminantes	49
Tabla 7. Condiciones de diseño actual de la torre M-7000.....	50
Tabla 8. Tendencia corrosiva o incrustante del agua basado en el I.S. y el I.E.	60
Tabla 9. Comparación entre las variables de operación promedio y la variable de diseño	64
Tabla 10. Valores característicos a condiciones de prueba y diseño	76
Tabla 11. Capacidad hidráulica de la torre de enfriamiento M-7000.....	77
Tabla 12. Dosificación actual de químicos	82
Tabla 13. Ciclos de concentración por cada contaminante	82
Tabla 14. Dosificación de ácido sulfúrico.....	84
Tabla 15. Dosificación de cloro	85
Tabla B1. Variables climatológicas y de operación.....	94
Tabla B2. Rango y Temperatura de aproximación calculados.....	96
Tabla B3. Eficiencia de enfriamiento y eficiencia térmica calculadas	98
Tabla D1. Coeficientes característicos y relaciones gas-líquido de operación	101
Tabla G1. Valores para construir la curva de requerimientos de diseño	112
Tabla H1. Desviaciones de las variables de prueba con respecto a las de diseño ...	114
Tabla H2. Conjunto de valores seleccionados para la determinación de la curva característica.....	116

Tabla H3. Variables calculadas para la determinación del coeficiente característico de prueba	117
Tabla H4. Resultado del cálculo de $(KaV/L)_p$ por el Método de Tchebyshev	118
Tabla H5. Valores para graficar la curva característica	119
Tabla I1. Porcentaje de capacidad hidráulica.....	121
Tabla J1. Caudal de reposición deseado	123
Tabla M1. Dosificación diaria de ácido sulfúrico.....	127
Tabla N1. Caudal de multifuncional requerido.....	129
Tabla O1. Dosificación diaria de cloro	131

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág.
Figura 1. Variación del pH en la torre de enfriamiento M-7000	7
Figura 2. Componentes de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo cruzado	16
Figura 3. Curva de rendimiento típica	20
Figura 4. Idealización del fenómeno de transferencia	23
Figura 5. Diagrama de entalpía del proceso de enfriamiento.....	28
Figura 6. Curvas de requerimientos de diseño típicas	31
Figura 7. Curva característica típica	32
Figura 8. Curvas de rendimiento típicas de una torre de enfriamiento	34
Figura 9. Curva característica y curva de requerimientos de diseño	36
Figura 10. Variación del caudal de recirculación	64
Figura 11. Variación de la temperatura del agua de entrada o agua caliente	65
Figura 12. Intercambiadores de calor afectados por incrustaciones	66
Figura 13. Variación de la temperatura del agua de salida o agua fría.....	66
Figura 14. Variación de la temperatura de bulbo húmedo.....	67
Figura 15. Comportamiento de la temperatura de salida del agua en función de la temperatura de bulbo húmedo.....	68
Figura 16. Variación del salto térmico o rango de enfriamiento	69
Figura 17. Variación de la temperatura de aproximación.....	69
Figura 18. Variación de la eficiencia de enfriamiento.....	70
Figura 19. Variación de la eficiencia térmica.....	72
Figura 20. Variación del coeficiente característico con el caudal de recirculación...	73
Figura 21. Variación del coeficiente característico con la temperatura de aproximación.....	73
Figura 22. Curva característica y curva de requerimientos de diseño	75
Figura 23. Porcentaje de Capacidad Hidráulica.....	78

Figura 24. Caudal de reposición	80
Figura C1. Curvas de Capacidad de los Rociadores	100

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolos Latinos

<i>A</i>	Factor que depende de la concentración de sólidos totales (adim)
<i>a</i> :	Superficie de transferencia equivalente por unidad de volumen de torre (m^2/m^3)
<i>a_H</i>	Superficie de transferencia total de calor por unidad de volumen de torre (m^2/m^3)
<i>a_M</i>	Superficie de transferencia total de masa por unidad de volumen de torre (m^2/m^3)
<i>Aprox</i>	Temperatura de aproximación (K)
<i>B</i>	factor que depende de la temperatura (adim)
<i>BPH_D</i>	Potencia de los ventiladores (HP)
<i>%C</i>	Porcentaje de capacidad (%)
<i>C</i>	Factor que depende de la concentración de dureza cálcica (adim)
<i>C_{alk}</i>	Concentración de alcalinidad total expresada como CaCO_3 (kg/m^3)
<i>C_{alkr}</i>	Concentración de alcalinidad total expresada como CaCO_3 que debe ser reducida (kg/m^3)
<i>C_i</i>	Concentración del compuesto <i>i</i> (kg/m^3)
<i>Ciclos</i>	Ciclos de concentración (adim)
<i>C_p</i>	Capacidad calorífica de la sustancia contenida en el sistema ($\text{kJ}/\text{kg K}$)
<i>C_S</i>	Calor húmedo ($\text{kJ}/\text{kg K}$)
<i>d_r</i>	Diámetro de un rociador (m)
<i>D</i>	Factor que depende de la concentración de alcalinidad total (adim)
<i>G</i>	Flujo másico de aire (kg/h)
<i>G'</i>	Flujo volumétrico de aire (m^3/h)
<i>H</i>	Entalpía (kJ/kg)
<i>H_h</i>	Entalpía húmeda o entalpía del aire húmedo (kJ/kg de aire seco)
<i>H_{hw}</i>	Entalpía del aire saturado a la temperatura T_L del agua (kJ/kg de aire seco)
<i>H_{ha}</i>	Entalpía del aire húmedo a la temperatura T_G (kJ/kg de aire seco)
<i>h_c</i>	Coefficiente de transferencia de calor entre la interfase y la sustancia en contacto ($\text{kJ}/\text{h}.\text{m}^2.\text{K}$)
Δh	Cambio de entalpía específico (kJ/kg)
<i>HTU</i>	Altura de la unidad de transferencia (m)
<i>I.S.</i>	Índice de saturación (adim)
<i>I.E.</i>	Índice de estabilidad (adim)
<i>K</i>	Coefficiente global de transferencia másica a través de la película gaseosa basado en la diferencia absoluta de humedades entre la interfase y la masa gaseosa (kg de vapor condensado/ $\text{h}.\text{m}^2$)
<i>K_g</i>	Coefficiente individual de transferencia másica a través de la película

	gaseosa basado en la diferencia absoluta de humedades entre la interfase y la masa gaseosa (kg de vapor condensado/h.m ²)
L	Flujo másico de agua (kg/h)
L'	Flujo volumétrico de agua (m ³ /h)
L/G	Relación líquido-gas (kg agua/kg aire seco)
M	Peso molecular (kg/kmol)
n_r	Número de rociadores (adim)
NTU	Número de unidades de transferencia (adim)
p_v	Presión de vapor del agua (Pa)
\bar{p}	Presión parcial del aire (Pa)
p_t	Presión total atmosférica (Pa)
pH	pH del agua medido a la temperatura específica (adim)
pH_s :	pH de saturación de carbonato de calcio (adim)
Q	Calor trasferido (kW)
Q_{as}	Caudal de ácido sulfúrico (m ³ /h)
$Q_{químico}$	Caudal de químico anticorrosivo o antincrustante a ser dosificado (m ³ /h)
R	Constante universal de los gases (Pa m ³ /kmol K)
$Rango$	Salto térmico (K)
S_0	Sección transversal de la torre (m ²)
T	Temperatura (K)
V	Volumen de la sección empacada (m ³)
Y	Fracción molar (adim)
Y	Humedad absoluta molar (kmol de agua/kmol de aire)
Y'	Humedad absoluta másica (kg de agua/kg de aire)
Y_R	Humedad relativa (%)
Y'_s	Humedad de saturación másica (kg de agua/kg de aire)
Z	Altura de la torre (m)
z_L	Altura de la columna de líquido (m)

Símbolos Griegos

η_E	Eficiencia de enfriamiento (%)
η_T	Eficiencia térmica (%)
λ	calor latente de vaporización (kJ/kg)
v_H	Volumen húmedo (m ³ /kg aire seco)
ρ_{as}	Densidad del ácido sulfúrico (kg/m ³)
ρ_L	Densidad del agua (kg/m ³)

Subíndices

<i>0</i>	Temperatura de estados de referencia
<i>1</i>	Sistema en estado 1
<i>2</i>	Sistema en estado 2
<i>A</i>	De prueba Ajustado
<i>as</i>	Ácido Sulfúrico requerido
<i>asP</i>	Ácido Sulfúrico actual o de prueba
<i>BD</i>	Purga o Blowdown
<i>bh</i>	Bulbo Húmedo
<i>CD</i>	Para cumplir con las condiciones de diseño
<i>cr</i>	Cada rociador
<i>cw</i>	Entrada de agua o agua caliente
<i>D</i>	De diseño
<i>Df</i>	Arrastre o drift
<i>E</i>	Evaporación
<i>H</i>	Hidráulica
<i>hw</i>	Salida de agua o agua fría
<i>G</i>	Aire
<i>I</i>	Interfase agua-aire
<i>L</i>	Agua
<i>MU</i>	Reposición o make-up
<i>MUR</i>	Reposición real
<i>MUD</i>	Reposición de diseño
<i>P</i>	De prueba
<i>T</i>	Térmica
<i>V</i>	Vapor
<i>X</i>	Pérdidas misceláneas

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presenta el problema que motiva a la realización de este Trabajo Especial de Grado; así como los estudios anteriormente realizados que proveen la base para su desarrollo y los objetivos que se pretenden alcanzar para resolver el problema planteado.

I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua de enfriamiento es uno de los servicios industriales mas demandados en los complejos de refinación de petróleo, ya que involucra a la mayoría de las unidades de proceso. Las torres de enfriamiento son el equipo de mayor importancia y utilización en sistemas de enfriamiento de agua de una refinería en la cual no se dispone de un reservorio de agua ilimitado (agua, río, mar). Ésta se encarga de enfriar el agua caliente que proviene del servicio de intercambio de calor para reutilizarla en dichos procesos mediante el contacto directo con corrientes de aire ambiental.

El buen desempeño de una torre de enfriamiento depende de varios factores como la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre, la carga calórica del agua, las condiciones y componentes del aire y del agua de reposición, entre otros. Debido a esta gran dependencia de las condiciones ambientales del medio que los rodea, una torre diseñada a ciertas condiciones puede desviarse de las especificaciones requeridas con el paso del tiempo y cambios climáticos. En estos casos es necesaria la evaluación de los factores que afectan el desempeño de la torre y la realización de un ajuste en las condiciones iniciales para mejorar la eficiencia de la misma y obtener agua con las condiciones deseadas.

La torre de enfriamiento M-7000 de la refinería en estudio es una torre de tiro inducido de corrientes de flujo cruzado, la cual fue diseñada para manejar un caudal

de agua de 75000 gpm con una eficiencia de enfriamiento de 67% y con cuatro (4) ciclos de concentración de contaminantes. Sin embargo, la última evaluación reveló que la misma está manejando caudales de agua de hasta 88000 gpm, su eficiencia es de 57% y que opera hasta con 2.5 ciclos de concentración, entre otros factores.

Todas estas variables deben estar muy bien controladas ya que conllevan a problemas operacionales y económicos graves, no sólo en la torre de enfriamiento en sí, sino también en los equipos para los cuales dicha torre presta servicio. Por ejemplo, una disminución en la eficiencia térmica de la torre ocasiona un aumento en la temperatura del agua de salida y por ende menor capacidad de intercambio de calor en los equipos de procesos, lo cual a su vez se traduce en corrientes de procesos fuera de especificación.

Por otra parte, una torre que maneja caudales de agua superiores a los de diseño puede causar fallas en los empaques, ya que la resistencia de los mismos es limitada, lo cual contribuye a una mala distribución del agua dentro de la torre. Por último, la disminución excesiva en los ciclos de concentración de contaminantes se traduce en una mayor reposición de agua fresca y/o una sobredosificación de compuestos para el tratamiento del agua, lo cual tiene un gran impacto en los costos de operación y mantenimiento de la torre.

En el caso particular de este Trabajo Especial de Grado, el objeto de interés es estudiar los diversos factores que afectan el desempeño térmico e hidráulico de la torre de enfriamiento M-7000 mediante un estudio técnico-operacional, con el cual se pretende proponer las medidas correctivas y preventivas pertinentes para asegurar la continuidad de los procesos de la refinería y garantizar el aprovechamiento óptimo de los recursos. Además, este estudio incluye un análisis fisicoquímico del agua de reposición para optimizar la dosificación de químicos y aumentar al máximo los ciclos de concentración de contaminantes.

I.2. OBJETIVOS

Luego de planteado el problema, se establecen los objetivos que pretenden cumplirse en este Trabajo Especial de Grado.

General

Identificar las variables críticas que tienen mayor influencia en la eficiencia de la torre de enfriamiento M-7000, para así determinar las condiciones óptimas de operación del sistema de enfriamiento de la refinería.

Específicos

1. Determinar la curva característica y la curva de requerimientos de diseño de la torre M-7000.
2. Determinar la capacidad térmica actual de la torre de enfriamiento M-7000 y analizar las desviaciones existentes con respecto a las condiciones de diseño.
3. Determinar la capacidad hidráulica actual de la torre de enfriamiento M-7000 y analizar las desviaciones existentes con respecto a las condiciones de diseño.
4. Proponer medidas preventivas y correctivas para optimizar la eficiencia de la torre de enfriamiento.
5. Determinar la reposición (*make up*) requerida para las condiciones de operación deseadas.
6. Analizar el efecto de los contaminantes del agua en el desempeño de la torre de enfriamiento y evaluar el control de impurezas de la torre.

I.3. ANTECEDENTES

Esta sección tiene como objetivo mostrar estudios previos realizados a la torre de enfriamiento M-7000 que puedan ser utilizados como base y referencia de la presente investigación. Los antecedentes aquí mostrados fueron en su totalidad suministrados por el Departamento de Procesos de la Refinería en estudio; sin embargo, la fuente no puede ser presentada en este TEG como referencia ya que son documentos privados y confidenciales de la Refinería. La empresa Venezolana de Proyectos Integrados (VEPICA) da fe de que la información aquí presentada es real y fidedigna.

El sistema de agua de enfriamiento de la Refinería en estudio está constituido por tres (3) torres de enfriamiento que operan independientemente: La E-900 de 10 MGPM (2270 m³/h) de capacidad, totalmente cubierta en capacidad por las unidades de destilación correspondientes al procesamiento de crudo, solventes y lubricantes, la M-8000 de 27 MGPM (6129 m³/h) de capacidad, para uso exclusivo de la Unidad de alquilación, con el propósito de evitar problemas de contaminación con ácido fluorhídrico en otras áreas, y la M-7000 de 75 MGPM (17025 m³/h) de capacidad para el resto de las unidades de procesos y servicios industriales (incluyendo una parte de la Unidad de solventes).

La torre de enfriamiento M-7000 fue instalada en el año 1981 con las especificaciones de diseño mostradas en la tabla 1.

En el año de 1984 se contrata la evaluación térmica de la torre donde se recomendó operar con 5 celdas, debido a que la carga térmica en ese momento no justificaba la operación de las seis celdas, como se venía operando hasta ese momento, con lo cual se modificó la capacidad de la torre a 62.5 MGPM (14188 m³/h).

Tabla 1. Condiciones de diseño original de la torre M-7000

	Unidades Inglesas	Sistema Internacional
Capacidad total de la torre (L')	75000 gpm	17000 m ³ /h
Capacidad de c/celda	12500 gpm	2800 m ³ /h
Celdas en operación	6	6
Flujo volumétrico de aire (G')	41700000 gpm	946000 m ³ /h
Reposición (L'_{MU})	1540 gpm	350 m ³ /h
Capacidad de enfriamiento (q)	676000000 BTU/h	198000 kW
# Aspas de los ventiladores	4	4
Inclinación de las aspas	15 °	15 °
Potencia de los ventiladores (BPH)	900 HP	760 kW
Potencia de cada ventilador	150 HP	112 kW
Tamaño de relleno	8x8 plgxplg	20,3x20,3 cmxcm
Temperatura de agua caliente (T_{hw})	105 °F	40,5 °C
Temperatura de agua fría (T_{cw})	87 °F	30,5 °C
Temperatura de bulbo húmedo (T_{bh})	78 °F	25,5 °C
Rango de enfriamiento (Rango)	18 °F	10 °C
Aproximación (Aprox)	9 °F	5 °C
Ciclos de concentración	4	4

En 1990, debido al incremento de la carga térmica originada por la puesta en marcha del complejo BXT y al incremento de la capacidad de la unidad de craqueo catalítico (FCC), se recomendó cambiar el relleno de la torre de 8"x8" (20,3 cm x 20,3 cm) a 8"x4" (20,3 cm x 10,2 cm), haciendo posible con esto un incremento de la capacidad térmica de la torre en un 12.5 %.

En 1991 se modificaron el número de aspas de los ventiladores de 4 a 10 aspas y los eliminadores de gotas por una versión más eficiente (CFI ULA5). Este cambio se realizó como consecuencia del cambio de tamaño de relleno realizado en 1990.

En 1994, motivado a que la torre presentaba problemas de alto arrastre de líquido (un aumento de 17% con respecto al caudal de arrastre original), se realizó un estudio que arrojó la recomendación de modificar el ángulo de inclinación de las aspas de los ventiladores de 15° a 12.5°.

En el año 2000 se realizó un estudio donde se observó presencia constante de hidrocarburos (proveniente de fugas en equipos de intercambio de calor) en el sistema

de recirculación de la torre M-7000, los cuales, sumado a la combinación de factores tales como: altas temperaturas, oxígeno libre y exposición a la luz solar, crearon condiciones apropiadas para el crecimiento de microorganismos y algas, produciendo interferencia en el proceso de cloración. Por esto se disminuyó el tamaño de los orificios de las mallas de las pantallas de las bombas de recirculación (que tienen como objetivo disminuir el paso de sólidos hacia dichas bombas) de 1^{1/4}” x 1^{1/4}” a 0,28” x 0,28”.

En 2003, se agregó al programa de tratamiento químico para inhibir la corrosión, deposición e incrustaciones mediante la adición continua de un multifuncional denominado comercialmente XLP-3252.

En noviembre de 2004, el agua de reposición presentó alta carga biológica de 10000 col/ml (bacterias heterotróficas) y 10 col/ml de bacterias sulfato-reductoras, notándose que no se obtenía residual de cloro libre en la reposición y recirculación. Además se observó formación de algas y lodos en las piscinas de agua superiores. Esto se debió al aumento en el contenido de hierro ferroso en el agua de reposición, por lo cual se recomendó aumentar la dosificación de cloro a 20 lbm/día (9 kg/día).

En diciembre de 2005, se incorporó una nueva fuente de agua fresca proveniente de un río adyacente, esto provocó un incremento de la dureza en un 66% y la alcalinidad en 45% del agua de reposición, ocasionando la deposición de carbonatos y bicarbonatos de calcio en algunos intercambiadores de la Unidad de Crudo. La recomendación fue de ajustar la dosificación de ácido sulfúrico a 70 gal/día (0,26 m³/día) para controlar la deposición de carbonatos y bicarbonatos en los equipos.

En diciembre de 2006 se observó una disminución súbita del pH en el agua de recirculación de la torre, esto se debió, según el estudio realizado, a la sobredosificación de ácido sulfúrico (para el control de la alcalinidad), el cual para ese momento era de 70 gal/día ($0,26 \text{ m}^3/\text{día}$). La recomendación fue la de disminuir la dosificación de ácido a 30 gal/día ($0,11 \text{ m}^3/\text{día}$) para restablecer el pH del agua en los valores deseados (8.2-8.8). En la figura 1 se muestra la variación del pH del 01-12-2006 al 03-12-2006.

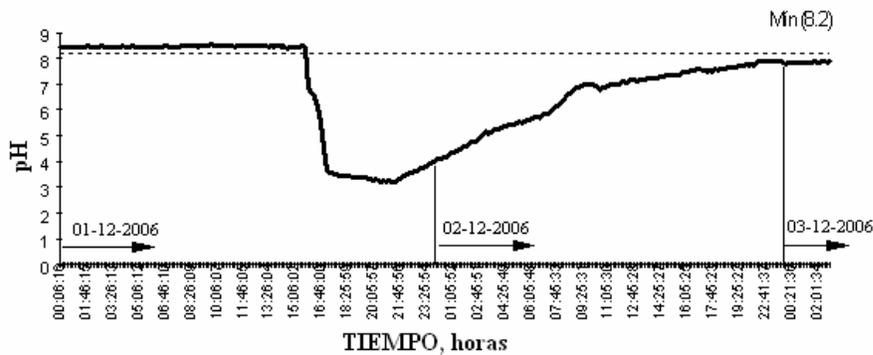


Figura 1. Variación del pH en la torre M-7000

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos de las características de las torres de enfriamiento y de los factores que afectan su desempeño para así establecer conclusiones acerca de los resultados a conseguir.

II.1. 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 el más comúnmente encontrado, y los principios involucrados en la determinación de sus propiedades son los mismos que para otros sistemas. La diferencia primordial radica en que el número de Lewis (cociente del coeficiente de transferencia de calor de la fase gas entre el producto de coeficiente de transferencia de masa y el calor húmedo) para el sistema aire-vapor de agua puede ser tomada como 1, mientras que esta razón generalmente no es igual a 1 para otros sistemas (Perry, 1999).

Las propiedades determinadas por los métodos psicrométricos son la humedad absoluta, humedad relativa, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, entalpía, volumen húmedo, calor húmedo, entre otras.

II.1.1 Humedad Absoluta

Es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco contenidos en cierta cantidad de una mezcla de aire húmedo. Si la cantidad se expresa en moles, la relación es la humedad molar absoluta. En condiciones en que se aplica la Ley de los gases ideales se tiene que (Treybal, 2000).

$$Y = \frac{y_V}{y_G} = \frac{\overline{P_V}}{\overline{P_G}} = \frac{\overline{P_V}}{\overline{P_t - P_V}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$Y' = Y \times \frac{M_L}{M_G} = \frac{\overline{p_V}}{p_t - \overline{p_V}} \times \frac{M_L}{M_G} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Y : humedad absoluta molar (kmol de agua/kmol de aire seco)

Y' : humedad absoluta másica (kg de agua/kg de aire seco)

y_V : fracción molar del vapor de agua (adim)

y_G : fracción molar del aire (adim)

$\overline{p_L}$: presión parcial del agua (Pa)

$\overline{p_G}$: presión parcial del aire (Pa)

p_t : presión total atmosférica (Pa)

M_L : peso molecular de agua (kg/kmol)

M_G : peso molecular de aire (kg/kmol)

Cuando la presión parcial del vapor de agua en el aire, a una temperatura, dada es igual a la presión de vapor del agua a la misma temperatura, el aire está saturado y la humedad másica absoluta se designa como la humedad másica de saturación (Treybal, 2000).

$$Y'_s = \frac{p_V}{p_t - p_V} \times \frac{M_L}{M_G} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

Y'_s : humedad de saturación másica (kg de agua/kg de aire seco)

p_V : presión de vapor del agua (Pa)

II.1.2 Humedad Relativa

Es la relación entre la cantidad de vapor que contiene el aire con la máxima que puede contener a la misma temperatura, por tanto, si se mantiene constante la

humedad absoluta y se varía la temperatura del aire, la humedad relativa cambiará también. Como se considera al vapor como un gas ideal, la expresión se reduce al cociente de la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor del agua a la misma temperatura (Isidro, 2006). Por lo tanto:

$$Y_R = \frac{\overline{p_v}}{p_v} \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

Y_R : humedad relativa (%)

II.1.3 Temperatura de bulbo seco

Es la temperatura que se mide directamente con un termómetro de bulbo seco colocado al aire libre hasta que alcance condiciones estacionarias y registre un valor numérico de temperatura.

II.1.4 Temperatura de bulbo húmedo (Tbh)

Es la temperatura en equilibrio alcanzada por una superficie de evaporación, ocurre cuando la velocidad de calor transferido a la superficie, por convección, es igual al calor perdido por evaporación. Es la temperatura indicada por un termómetro cuyo bulbo es humedecido por un algodón saturado de agua y a través del cual se hace circular aire (Aerstin, 1978).

II.1.5 Entalpía Húmeda

Representa el contenido de energía total de un sistema. Esta no tiene valor absoluto (al igual que la energía interna), por lo tanto sólo se pueden calcular cambios de entalpía. Para líquidos, gases y vapores (considerando para los dos últimos que su comportamiento es aproximado al de un gas ideal), el cambio de entalpía específico viene dado por:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

Δh : cambio de entalpía específico (kJ/kg)

h_1 : entalpía del sistema en el estado 1 (kJ/kg)

h_2 : entalpía del sistema en el estado 2 (kJ/kg)

T_1 : temperatura del sistema en el estado 1 (K)

T_2 : temperatura del sistema en el estado 2 (K)

C_p : capacidad calorífica de la sustancia contenida en el sistema (kJ/kg K)

Normalmente la entalpía se calcula en base a un estado de referencia, y para mezclas vapor-gas, la entalpía es la suma de las entalpías individuales del gas y el vapor. Así, la entalpía del aire húmedo puede ser escrita de la siguiente manera (Treybal, 2000):

$$H_h = H_G + Y' H_L \quad \text{Ec. 6}$$

$$H_G = C_{p_G}(T - T_0) \text{ y } H_L = C_{p_V}(T - T_0) + \lambda_0 \quad \text{Ec. 7}$$

$$H_h = C_{p_G}(T - T_0) + Y'[C_{p_V}(T - T_0) + \lambda_0] \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

H_h : entalpía húmeda o entalpía del aire húmedo (kJ/kg de aire seco)

H_G y H_L : entalpías del aire y el vapor respectivamente (kJ/kg)

C_{p_G} y C_{p_V} : capacidades caloríficas del aire y el vapor de agua (kJ/kg K)

T : temperatura de la mezcla vapor-aire (K)

T_0 : temperatura de referencia, referida a agua líquida saturada (K)

λ_0 : calor latente de vaporización a la temperatura de estados de referencia (kJ/kg)

II.1.6 Volumen Húmedo

Es el volumen de masa unitaria de aire seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes. Así, la ley de los gases ideales da el volumen húmedo como (Treybal, 2000):

$$v_H = \left(\frac{Y}{M_L} + \frac{1}{M_G} \right) \times \left(\frac{R.T}{P_t} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

v_H : volumen húmedo (m^3/kg)

R : constante universal de los gases y es igual a $8314 \text{ Pa m}^3/\text{kmol K}$

II.1.7 Calor Húmedo

Es la capacidad calorífica de una masa unitaria de aire seco junto con su vapor acompañante (Treybal, 2000). Se expresa como:

$$C_S = C_{p_G} + C_{p_L} \cdot Y' \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

C_S : calor húmedo ($\text{kJ}/\text{kg K}$)

II.2. TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las máquinas y los procesos industriales, así como aquellos dedicados al confort humano, generan enormes cantidades de calor que deben ser continuamente disipadas si se quiere que esas máquinas y procesos operen eficientemente. Aunque este calor es usualmente transferido a un flujo de agua fría, la transferencia final es a la atmósfera e, invariablemente, está acompañada por alguna forma de intercambio de calor (SPX Cooling Technologies, 2006).

Usualmente el agua es enfriada exponiéndola a una superficie de aire. Algunos procesos son lentos, tales como el enfriamiento de agua en la superficie de un estanque; otros son comparativamente rápidos, tales como el rociado de agua en una corriente de aire.

Las torres para enfriamiento de agua son dispositivos que regulan el proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, cuya finalidad es extraer calor del agua a través del contacto directo con el aire. Estas torres tienen múltiples aplicaciones, desde relativamente pequeñas instalaciones de aire acondicionado hasta grandes complejos de generación de energía eléctrica. Se puede decir que su uso está justificado en sistemas que utilizan agua como medio refrigerante, donde sea necesario disipar grandes cantidades de calor a bajo costo y el salto de temperatura requerido sea del orden de 10°C (U.N.C., 2000).

El proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento involucra 1) la transferencia de calor latente debido a la evaporación de una pequeña porción de agua, y 2) la transferencia de calor sensible debido a la diferencia de temperatura entre el agua y el aire. Aproximadamente el 80% de esta transferencia es debida al calor latente y el 20% debido al calor sensible.

Teóricamente, la remoción de calor del agua por unidad de masa de aire circulado en una torre de enfriamiento depende de la temperatura y el contenido de humedad del aire. Un indicativo de la temperatura y del contenido de humedad del aire es la temperatura de bulbo húmedo, la cual, idealmente, es la temperatura teórica mas baja a la cual el agua puede ser enfriada. Sin embargo, en la práctica, la temperatura del agua enfriada se acerca, mas no se iguala a la temperatura de bulbo húmedo; esto es porque es imposible poner en contacto toda el agua con el aire ya que el agua fresca cae a través de la superficie del relleno mojado hasta la base. La magnitud del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo depende del diseño de la torre, es decir, del tiempo de contacto entre el aire y el agua, la cantidad de superficie de relleno disponible para el contacto, y la ruptura del agua en pequeñas gotas (Perry, 1999).

II.2.1 Tipos de Torres de Enfriamiento

Las torres de enfriamiento se pueden clasificar según la dirección del flujo de aire y según el método empleado para inducir el aire a través de la torre. En la siguiente tabla se muestran los tipos de torres de enfriamiento dependiendo de su clasificación.

Tabla 2.Tipos de Torres de enfriamiento

Clasificación	Descripción	Representación Esquemática	
Según la dirección del flujo de aire	Flujo a Contracorriente	El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto. La ventaja que tiene este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento.	
	Flujo Cruzado	El aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende. Tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno, pero no son recomendables para casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, ya que significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente.	

Fuente: GPSA, 1994

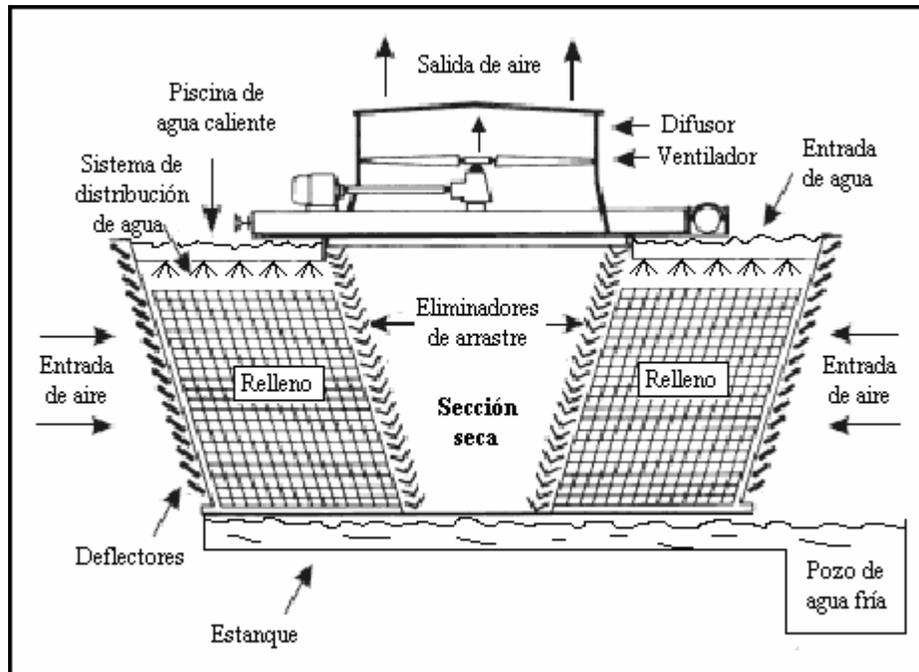
Tabla 2. Tipos de Torres de enfriamiento (cont.)

Clasificación		Descripción	Representación Esquemática
Según método usado para impulsar el flujo de aire	Tiro Natural	<p>Atmosféricas</p> <p>Dependen de las condiciones atmosféricas, no utilizan ningún aparato mecánico para hacer circular el aire a través de la torre. Son utilizadas cuando se requieren torres de poco tamaño y cuando puede ser tolerada una baja eficiencia.</p>	
	Tiro Natural	<p>Hiperbólicas</p> <p>Dependen del flujo natural ocasionado por la diferencia de densidad entre el aire entrante y saliente (frío y caliente). Generalmente se usan para grandes capacidades y bajos rangos. Son más efectivas cuando hay bajas temperaturas de bulbo húmedo y altas humedades relativas.</p>	
	Tiro Mecánico	<p>Tiro Inducido</p> <p>Las unidades de tiro mecánico usan uno o más ventiladores para proveer los requerimientos de aire. Las unidades de tiro inducido tienen el ventilador ubicado en el tope de la torre pasando el aire a través del empaque y descargando verticalmente a altas velocidades.</p>	
	Tiro Mecánico	<p>Tiro Forzado</p> <p>Las unidades de tiro forzado tienen los ventiladores ubicados en la base de la torre empujando el aire a través del empaque.</p>	

Fuente: GPSA, 1994

II.2.2 Componentes de una Torre de Enfriamiento

En la figura 2 se muestra una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo cruzado, en la cual se indican los componentes básicos que la constituyen.



Fuente: GPSA, 1994

Figura 2. Componentes de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo cruzado

Sistema de distribución de agua de entrada: Debe garantizar una atomización de agua y una distribución uniforme sobre la superficie del relleno, con la finalidad de mantener un contacto eficiente entre el agua y el aire. Este sistema puede ser por tuberías o por canales, y con rociadores para garantizar la distribución del agua sobre el relleno (SPX Cooling Technologies, 2006).

Relleno: Aumenta el tiempo y la superficie de contacto entre el aire y el agua al exponer nuevas superficies de agua al aire mientras aquella baja o circula por la torre. Al aumentar la superficie de contacto entre el aire y el agua, la transferencia de calor (velocidad de evaporación) de la torre es mucho mayor que sin relleno.

Adicionalmente, el relleno mantiene una distribución adecuada del aire y del agua dentro de la torre. Existen varios tipos de relleno: los de *goteo o salpicadura* donde el agua cae sobre una serie de pisos superpuestos de listones o rejillas con la finalidad de fraccionarla en pequeñas gotas cuya superficie constituye el área de transferencia de calor; los *laminares o de película* que distribuyen el agua en una fina película que fluye por su superficie, proporcionando la exposición de la película de agua a la corriente de aire; y los rellenos mixtos que se basan en la formación de gotas y de película, son rellenos de salpicadura formados por listones cuya superficie lateral es mas ancha que en el caso de los rellenos de goteos, así, se contribuye a la formación de una película de agua en los lados de los listones, aumentando el efecto conseguido por la salpicadura (Cuevas, 2003).

Sistema mecánico de tiro: Un sistema mecánico de movimiento de aire generalmente está constituido por ventiladores axiales, motores eléctricos, ejes y reductores de velocidad. Pueden ser para tiro forzado (empujan el aire por la torre de enfriamiento) o para tiro inducido (aspiran el aire por la torre). Generalmente tienen mínimo cuatro aspas y su velocidad de rotación es limitada por la máxima velocidad lineal permisible, también el ángulo de las aspas es ajustable para controlar el flujo de aire.

Celdas: Son compartimientos en los que pueden dividirse las torres de enfriamiento, que van desde la entrada del aire hasta el techo de la torre. Normalmente cada celda está equipada con su propio sistema de ventilación, proporcionando flexibilidad a la operación del sistema de enfriamiento. En la figura 2 se puede apreciar que la celda, en este caso está constituida por dos secciones de relleno, debido a que la configuración de la torre es de tiro inducido con flujo cruzado doble.

Estanque: Corresponde a la parte ubicada debajo de la sección de enfriamiento evaporativo, el cual tiene como función recibir y retener el agua fría producida antes de ser bombeada a los equipos de intercambio de calor.

Pozo de agua fría: Es la sección del estanque donde están instalados los filtros de malla y las bombas para enviar el agua fría al proceso. A menudo se hace mas profundo para mantener una presión de succión adecuada para las bombas.

Piscina de agua caliente: Están destinadas a recibir agua caliente retornada al sistema de la torre, facilitando el posterior proceso de distribución del agua sobre el relleno.

Eliminadores de arrastre: Estos dispositivos eliminan o reducen la cantidad de agua que arrastra el aire cuando sale de la torre o de las secciones de enfriamiento de la misma. Estos cambian la dirección de la corriente de aire húmedo, de tal forma que las pesadas películas de agua son arrojadas contra el deflector por inercia, formando una delgada película de agua que vuelve a la torre. Normalmente un buen eliminador debe reducir el arrastre de agua a menos de 0.1% del volumen de agua recirculada.

Deflectores: Son los tableros inclinados de la parte externa de la torre de enfriamiento que impiden la salida de agua pulverizada. También proporcionan una distribución más uniforme del flujo de aire en las torres de corriente transversal.

Difusor: El difusor del ventilador tiene varias funciones: sirve como una protección mecánica contra las aspas y permite la entrada y salida suave del aire para el ventilador, lo cual es muy importante para su eficiencia; permite descargar el aire húmedo y caliente hacia arriba, lejos de la entrada de aire, minimizando la recirculación; y permite la reducción de la presión total, y consecuentemente, la reducción del consumo de energía debido al aumento de su diámetro en su parte superior (SPX Cooling Technologies, 2006).

II.3. FACTORES QUE AFECTAN LA OPERACIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

La atmósfera de la cual una torre de enfriamiento toma su suministro de aire incorpora muchas propiedades psicrométricas variables, y la torre reacciona térmica o físicamente a cada una de estas propiedades. La torre acelera el aire, lo pasa por un laberinto de estructuras y rellenos, lo calienta, lo expande, lo satura con humedad, lo comprime y responde a todos los efectos termales y aerodinámicos que tal tratamiento puede producir. Finalmente, la torre de enfriamiento retorna la corriente de aire “consumida” a la atmósfera cercana, con la ferviente intención de que vientos atmosféricos no encontrarán un modo de introducirlo de nuevo en la torre.

Mientras tanto, las gotas de agua producidas por el sistema de distribución de la torre compiten con el aire por el mismo espacio y, por la afinidad natural, intentan unirse en una corriente común que tiene una superficie mínima para exponer al aire. Obviamente, son muchos los factores que afectan el funcionamiento de una torre de enfriamiento. Aquellos factores cuyos efectos predominan son identificados y discutidos en esta sección (SPX Cooling Technologies, 2006).

II.3.1 Temperatura de bulbo húmedo

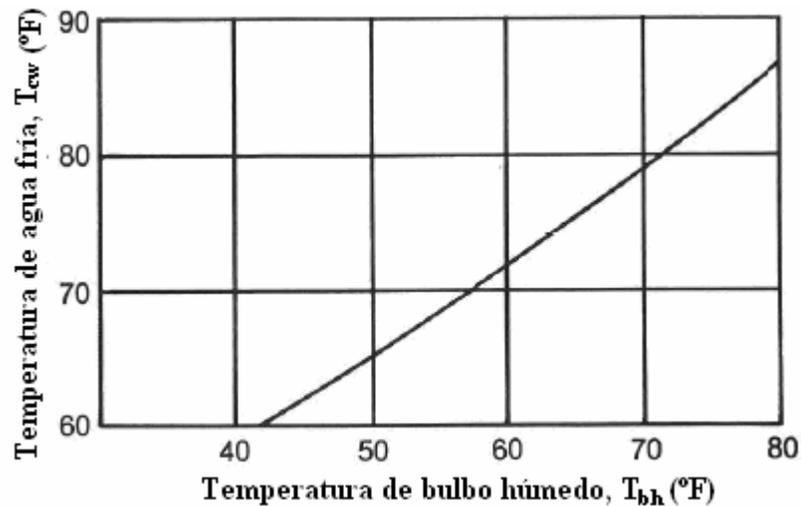
La temperatura de bulbo húmedo de diseño puede ser tomada de dos maneras: **temperatura de bulbo húmedo ambiental** medida a una distancia de 50 pies, vientos arriba de la torre, y a una elevación aproximada de 5 pies por encima de la base de la torre, sin fuentes de calor que intervengan, la cual no toma en cuenta las fuentes de calor localizadas que artificialmente pueden elevar esta temperatura en un sitio específico; o la **temperatura de bulbo húmedo de entrada**, la cual es la tomada directamente de mediciones en la entrada de aire de la torre.

La desventaja que presenta el diseñar la torre tomando como base la temperatura de bulbo húmedo ambiental es que ésta no toma en cuenta los efectos de fuente de calor adicionales en las cercanías de la torre ni los efectos de la recirculación de aire

caliente a la torre; por ende, la temperatura de bulbo húmedo real a la entrada de la torre es generalmente algo mayor que la especificada en el diseño.

Sí la temperatura de bulbo húmedo de diseño es ambiental, entonces los fabricantes de la torre deberán ajustar esta temperatura, aumentándola en varios grados, para compensar cualquier recirculación potencial. Por el contrario si la temperatura de bulbo húmedo de diseño es tomada a la entrada de la torre, el fabricante no realizará ajustes, y la temperatura al momento de las pruebas será el promedio de las múltiples lecturas tomadas en la entrada de aire de la torre.

En conclusión, una determinación exacta de la temperatura de bulbo húmedo es vital, si se quiere que la torre de enfriamiento funcione tal como fue previsto. En la figura 3 se observa la relación directa entre la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura del agua fría. Si la temperatura de bulbo húmedo actual es mayor que la especificada en el diseño, se obtendrán temperaturas promedio más calientes que las deseadas. Por el contrario, si la temperatura de bulbo húmedo actual es mas baja que la de diseño, entonces se obtendrá agua más fría y se habrá diseñado una torre mas grande de lo necesario.



Fuente: SPX Cooling Technologies, 2006

Figura 3. Curva de rendimiento típica

II.3.2 Carga calórica

Aunque una selección apropiada del tamaño de la torre establecerá las temperaturas de equilibrio a las cuales la torre retirará del agua una carga de calor dada, la carga calórica real por sí misma es determinada por el proceso al cual la torre presta servicio. Si se mantienen iguales todas las demás variables, el tamaño y costo de una torre de enfriamiento es proporcional a la carga de calor. Por lo tanto, es de vital importancia que la determinación de la carga calórica sea exacta en todos los casos. Si la carga calculada es baja, la torre de enfriamiento diseñada será demasiado pequeña. Si los cálculos son altos, la torre estará sobredimensionada, lo cual se traducirá en un equipo más costoso. Sin embargo, existen variaciones significativas en las cantidades de calor que desprenden los procesos industriales, y por ende es recomendable ajustar las condiciones de diseño a los requerimientos específicos de los procesos para los cuales la torre presta servicio (SPX Cooling Tower Technologies, 2006).

II.3.3 Flujo de agua de recirculación (L)

Una vez que las especificaciones están definidas, es importante seleccionar un valor óptimo de L . Normalmente, para condiciones dadas de operación, la relación de flujos máxicos de líquido y gas (L/G) está limitada dentro de un cierto rango, ya que al subir esta relación mas allá de un cierto valor, el tamaño de la torre aumenta bruscamente. Una vez fijado el valor de L/G óptimo, se puede jugar entre dos extremos:

- *Bajo L, alto G*: implica requerimientos de una mayor área de enfriamiento y mayor inversión, pero menor consumo de potencia tanto de los ventiladores como del sistema de bombeo de agua.
- *Alto L, bajo G*: Esto significa que se requiere una menor área de enfriamiento, una inversión menor, pero mayor consumo de potencia.

La selección dependerá netamente de la optimización de los costos de inversión y operación; este último tendría una gran dependencia del costo de la energía.

II.3.4 Acercamiento o aproximación

El acercamiento o diferencial entre la temperatura de agua fría y la de bulbo húmedo del aire que entra a la torre también afecta en gran medida el dimensionamiento de una torre. Mientras menor sea el acercamiento, mas se verá reducido el potencial de enfriamiento, y por ende, se requerirá una torre de mayor tamaño. Para una misma condición de flujo y temperatura de bulbo húmedo, una aproximación de 3°C y 6°C dará como resultado una torre que aproximadamente será 1.5 a 2.5 veces más grande, respectivamente comparadas con el tamaño de una torre con una aproximación de 8°C. Entonces, al reducir el acercamiento, aumenta exponencialmente el tamaño de la torre, y a su vez su costo. Por esto, la aproximación debe ser seleccionada de forma prudente para no incrementar el costo de la torre.

II.3.5 Rango de enfriamiento (ΔT)

La carga térmica de una torre es la combinación del flujo de agua que recircula y el rango de enfriamiento (diferencia entre la temperatura de agua caliente y la del agua fría). Si se busca reducir el tamaño de la torre es ventajoso tener un mayor rango de enfriamiento, ya que incrementa la fuerza motriz entre la temperatura de agua caliente de entrada y la temperatura de bulbo húmedo y un menor flujo de agua ya que reduce la presión estática que se opone al flujo de aire. Sin embargo, hay una limitación de la temperatura de agua caliente, la cual no debe sobrepasar los 60°C, ya que esto limitaría el uso de ciertos materiales internos (como la madera, plásticos, etc.) y aumentaría el efecto corrosivo del agua, necesiándose materiales especiales, elevando el costo del sistema de enfriamiento (SPX Cooling Tower Technologies, 1986).

II.3.6 Recirculación del aire

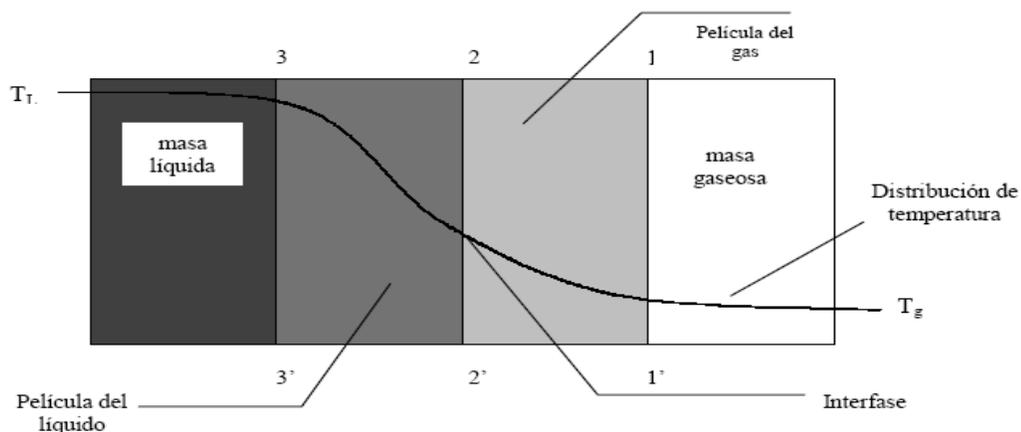
Para el diseño se debe tomar en cuenta que la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre puede ser distinta a la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

Esto es debido al fenómeno de recirculación donde parte del aire húmedo saliente entra nuevamente a la torre. Dicho fenómeno depende de la altura de la torre, de la ubicación respecto a la dirección del viento, de la velocidad del viento, de la forma de la torre (rectangular, poligonal o circular), del tipo de tiro (forzado inducido o natural), entre otros (SPX Cooling Tower Technologies, 2006).

II.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL AGUA

El estudio del proceso de enfriamiento en una torre, implica el análisis del intercambio de calor por contacto directo entre un líquido (agua) y un gas (aire). Comparado con el de transferencia de calor entre un gas y un medio líquido a través de una pared rígida que los separa, el caso de la torre es más complejo porque es difícil evaluar la superficie real de transferencia. No obstante, mediante la formulación de esquemas idealizados descriptivos del proceso y de algunas hipótesis justificadas por el relativo buen funcionamiento del esquema, es posible arribar a un procedimiento de cálculo que permita evaluar rápidamente si la torre puede satisfacer el servicio requerido (U.N.C., 2000).

Un esquema idealizado del fenómeno de transferencia que tiene lugar entre la masa líquida y la gaseosa en una torre de enfriamiento se muestra en la Figura 4.



Fuente: U.N.C., 2000

Figura 4. Idealización del fenómeno de transferencia

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

La hipótesis de la película líquida permite, en cualquier sección de la torre, expresar la transferencia de calor desde la corriente líquida a una temperatura local media T_L hacia la interfase con temperatura T_i de la siguiente forma:

$$LCp_LdT_L = h_{cL}a_H S_0 dZ \cdot (T_L - T_i) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

L : flujo másico del agua (kg/h)

h_{cL} : coeficiente de transferencia de calor entre la interfase y la masa de agua (kJ/h.m².K)

a_H : superficie de transferencia total de calor por unidad de volumen de torre (m²/m³)

S_0 : sección transversal de la torre (m²)

Z : altura de la torre (m)

A su vez la película del lado del aire permite expresar la transferencia de calor desde la interfase hacia la masa gaseosa con temperatura local media T_G como:

$$GC_S dT_G = h_{cG}a_H S_0 dZ \cdot (T_i - T_G) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

G : flujo másico del aire (kg/h)

h_{cG} : coeficiente de transferencia de calor entre la interfase y la masa de aire (kJ/h.m².K)

Por otra parte, el vapor de agua que se forma en la interfase se difunde hacia la masa gaseosa. Dicha difusión, en cualquier sección de la torre, es proporcional a la

humedad específica del aire saturado en contacto con la interfase Y'_i , menos la humedad local media de la masa de aire Y' . Resulta entonces:

$$GdY = K_G a_M S_0 dZ \cdot (Y'_i - Y') \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

K_G : Coeficiente individual de transferencia másica a través de la película gaseosa basado en la diferencia absoluta de humedades entre la interfase y la masa gaseosa (kg de vapor condensado/h.m²)

a_M : superficie de transferencia total de masa por unidad de volumen de torre (m²/m³)

II.4.1. Integral de Merkel

El proceso de transferencia de masa entre el líquido y el aire esta íntimamente vinculado con el de transferencia de calor entre ambos medios. En muchos casos prácticos, las condiciones en que se desarrollan ambos procesos son tales que puede suponerse que las difusividades térmica y másica son iguales, es decir el número de Lewis es igual a uno ($Le = 1$).

Si además de $Le=1$, se acepta que $a_M=a_H=a$, las ecuaciones 12 y 13 pueden combinarse para obtener:

$$GdH_G = K_G a S_0 dZ \cdot (H_i - H_{ha}) \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

H_i : Entalpía de la interfase agua-aire (kJ/kg)

H_{ha} : Entalpía del aire húmedo T_G (kJ/kg)

a : superficie de transferencia equivalente por unidad de volumen de torre (m²/m³)

Como no puede conocerse con exactitud la temperatura de la interfase agua-aire, ya que resulta muy difícil de determinar experimentalmente, se acepta que sea igual a la temperatura local media T_L del líquido. Entonces la ecuación 14 se escribe:

$$GdH_G = KaS_0 dZ \cdot (H_{hw} - H_{ha}) \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

K : Coeficiente global de transferencia másica a través de la película gaseosa basado en la diferencia absoluta de humedades entre la interfase y la masa gaseosa (kg de vapor condensado/h.m²)

H_{hw} : Entalpía del aire saturado a la temperatura T_L del agua (kJ/kg de aire)

Por otra parte, suponer $T_i=T_L$ implica aceptar que $h_{cL} \cdot a_H$ es infinito, lo cuál, lógicamente no es cierto, aunque en la práctica es bastante aceptable ya que el coeficiente de transferencia de calor es bastante grande.

Si la cantidad de agua que se evapora es pequeña comparada con el total de agua que se desea enfriar (~2 %), puede suponerse que:

$$GdH_{ha} \approx LC_{pL} dT_L \quad \text{Ec. 16}$$

Si se tiene en cuenta esta última expresión, la ecuación 15 se puede escribir:

$$\frac{KaS_0}{L} dZ = C_{pL} \frac{dT_L}{(H_{hw} - H_{ha})} \quad \text{Ec. 17}$$

e integrando se obtiene la expresión de Merkel:

$$NTU = \frac{KaS_0 Z}{L} = \frac{KaV}{L} = C_{pL} \int_{T_{cw}}^{T_{hw}} \frac{dT_L}{(H_{hw} - H_{ha})} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

T_{hw} : Temperatura del agua de entrada o agua caliente (K)

T_{cw} : Temperatura del agua de salida o agua fría (K)

V : Volumen de la sección empacada (m³)

Esta integral permite calcular el **número de unidades de transferencia** necesarias para que la torre cumpla con el servicio requerido (NTU). Por otra parte se define la altura de la unidad de transferencia, HTU, a través de la siguiente expresión:

$$HTU = \frac{Z}{NTU} \quad \text{Ec. 19}$$

No es casual que la simplificación de Merkel ($Le = 1$) funcione razonablemente bien, ello es así como consecuencia de que el calor sensible transferido en una torre de contacto directo es solamente una cuarta parte del calor transferido por evaporación. De esta manera para transferir un número dado de calor sensible, se requiere un potencial cuatro veces mayor que para transferir igual número mediante la transferencia de masa. Por ello, aunque se cometa un error del 50% en el coeficiente de transferencia de calor, esto influirá solamente en un 10% de error en el total (U.N.C., 2000).

II.4.2. Diagrama de Entalpía, representación gráfica de la integral de Merkel

La entalpía actual de la masa de aire húmedo H_{ha} en cualquier sección de la torre se puede expresar en términos de la relación entre la masa líquida y la del aire L/G. En efecto integrando la ecuación 16 se obtiene:

$$H_{ha} = H_{ha1} + \frac{L}{G} C_{pL} \cdot (T_L - T_{cw}) \quad \text{Ec. 20}$$

El término independiente se elige igual a la entalpía del aire a la entrada de la torre (H_{ha1}), la cual es dato o puede determinarse en función de sus propiedades psicrométricas. La ecuación 20 relaciona el cambio de entalpía en la masa de aire con el cambio de temperatura del agua, por lo tanto define la “línea de operación del aire” que acompaña al agua (U.N.C., 2000).

$$Aprox = (T_{cw} - T_{bw}) \quad \text{Ec. 22}$$

El aire que deja la torre adquiere la entalpía que resulta de introducir en la ecuación 20 la temperatura T_{hw} , es decir la correspondiente a la del agua caliente que entra por la parte superior. Cuanto mas aproxime al de saturación el contenido de humedad con que sale el aire, mejor será la eficiencia térmica de la torre, ya que en principio se generaría un número de unidades de transferencia superior. De la figura 5 se deduce que dicha saturación se consigue con la línea de operación que partiendo de A toca tangencialmente a la curva de equilibrio (hasta el punto B), que además es la de mayor pendiente (máximo valor de C_{pL}/G). Pero por estar B sobre la curva de aire saturado, dicha operación es posible únicamente con una torre de altura infinita. Por lo tanto, es necesario disminuir la relación agua-aire y conseguir una línea menos empinada como la AB'.

Por otra parte, se observa cómo se determina la temperatura de bulbo húmedo T_{bh} para el aire a la salida de la torre, pero no es posible conocer su temperatura de bulbo seco. Esto requiere de un procedimiento numérico (o gráfico) adicional al aquí expuesto que permita determinar el contenido de humedad que va adquiriendo a medida que atraviesa el relleno. No obstante, por ser el porcentaje de humedad relativa del aire a la salida de la torre muy alto (>90%), suele aceptarse que sale saturado (Baker y Shryock, s.f.).

El área encerrada entre la curva de saturación $H_{hL}(T_L)$ y la línea de operación $H_{hg}(T_L)$ cuyos vértices son A, B', B y H, es indicativa del potencial que promueve la transferencia de calor y de masa totales entre el agua y el aire. La resolución de la integral en la ecuación 18 permite obtener el número de unidades de difusión NTU necesario para producir el cambio en la temperatura del agua. A este efecto, Tchebycheff desarrolló un método de integración a cuatro puntos que permite la resolución numérica de dicha integral, el cual usa valores de entalpía a partir de datos preestablecidos de temperatura comprendidos en el intervalo de salto térmico

deseado. Así, la integral puede ser expresada de la siguiente manera (Baker y Shryock, s.f.; Daeil Aqua Co., s.f.):

$$C_{pL} \int_{T_{cw}}^{T_{hw}} \frac{dT_L}{(H_{hw} - H_{ha})} = \frac{(T_{hw} - T_{cw})}{4} \cdot \left(\frac{1}{(\Delta H_h)_a} + \frac{1}{(\Delta H_h)_b} + \frac{1}{(\Delta H_h)_c} + \frac{1}{(\Delta H_h)_d} \right) \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

$(\Delta H_h)_a$ es el valor de $(H_{hw} - H_{ha})$ a $T_a = T_{cw} + 0.1Rango$

$(\Delta H_h)_b$ es el valor de $(H_{hw} - H_{ha})$ a $T_b = T_{cw} + 0.4Rango$

$(\Delta H_h)_c$ es el valor de $(H_{hw} - H_{ha})$ a $T_c = T_{hw} - 0.4Rango$

$(\Delta H_h)_d$ es el valor de $(H_{hw} - H_{ha})$ a $T_d = T_{hw} - 0.1Rango$

Con $Rango = (T_{hw} - T_{cw})$

II.5. EVALUACIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

Más que una excepción es una regla que las condiciones del campo no estén totalmente de acuerdo con las condiciones de diseño de una torre de enfriamiento.

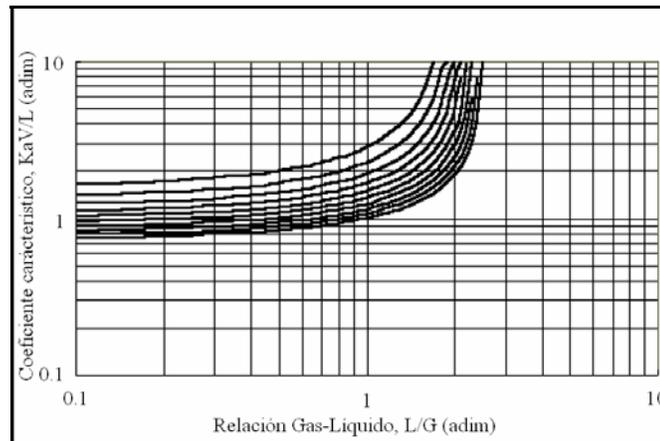
Las torres son diseñadas para ciertas condiciones de trabajo y en ocasiones el sitio donde serán instaladas presenta condiciones que son diferentes, y por esto, en muchos casos no es sencillo que partiendo de los datos de prueba se determine la capacidad de enfriamiento de una torre y que ésta cubra los requerimientos que se especifican en su diseño.

II.5.1 Coeficientes característicos (KaV/L)

Los cálculos teóricos reducen un grupo de condiciones de operación a un valor numérico que representa el grado de dificultad de enfriamiento. El NTU que corresponde a un grupo de condiciones hipotéticas es llamado **coeficiente requerido** y corresponde a una evaluación del problema. El mismo cálculo aplicado a un grupo de condiciones de prueba es llamado **coeficiente disponible** de la torre evaluada.

Coefficiente requerido: Las torres de enfriamiento son especificadas en términos de las condiciones de las temperaturas de agua fría, agua caliente y bulbo húmedo, así como del flujo de agua que será enfriado a estas temperaturas. Las mismas condiciones de temperatura son consideradas como variables en la ecuación básica, pero la variable restante es la relación gas líquido (L/G) en vez del flujo de agua (L). Si el flujo de aire es conocido, la relación gas-líquido puede transformarse en L.

Un grupo de condiciones de temperatura puede ser obtenido por un amplio rango de relaciones L/G. Si se tiene una torre diseñada a ciertas condiciones de temperaturas de entrada y salida de agua y temperatura de bulbo húmedo, pueden obtenerse diferentes coeficientes característicos requeridos para cumplir con dichas condiciones de diseño variando la relación L/G y calculando los valores correspondientes de KaV/L mediante la ecuación de Merkel. Esta curva es llamada **Curva de requerimientos de diseño** y representa un análisis teórico de una situación hipotética. En la figura 6, se muestran las curvas de requerimientos de diseño típicas para varios conjuntos de condiciones de diseño.



Fuente: Daeil Aqua Co., s.f.

Figura 6. Curvas de requerimientos de diseño típicas

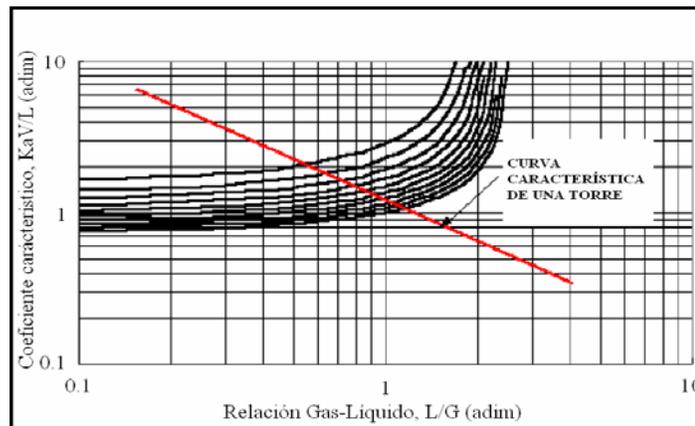
Cada curva, del conjunto mostrado en la figura 6 representa un conjunto de valores de de temperaturas de entrada y salida de agua y temperatura de bulbo húmedo, para una misma torre.

Coefficiente disponible: es el punto en una curva de requerimientos de diseño al cual la torre operará para las condiciones involucradas. El coeficiente disponible no es constante, pero varía con las condiciones de operación. La operación característica de una torre de enfriamiento es desarrollada de una correlación empírica que muestra como el coeficiente disponible varía con las condiciones de operación (Baker y Shryock, s.f.).

El Cooling Tower Institute (C.T.I.), encontró una ecuación que vincula muy satisfactoriamente a L/G con KaV/L , deducida a partir de la correlación estadística de datos obtenidos de ensayos realizados a numerosas torres de enfriamiento comerciales de tipos y marcas variadas. La misma se escribe:

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G} \right)^{-n} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde C y n son constantes propias de una torre de enfriamiento específica, y están relacionadas con el relleno utilizado, y n tiene un valor típico entre 0,4 y 0,7. De acuerdo a lo expresado anteriormente no hay un procedimiento que permita la evaluación de la constante “ C ” y el exponente “ n ” en base a consideraciones puramente teóricas. La representación gráfica de esta relación es llamada **Curva característica** (U.N.C., 2000) y se muestra en la siguiente figura:



Fuente: Daeil Aqua Co., s.f.

Figura 7. Curva característica típica

II.5.2 Determinación de la capacidad térmica de una torre de enfriamiento a partir de datos de prueba

La capacidad térmica es el caudal de agua que una torre puede manejar para un rango, temperatura de bulbo húmedo y temperatura de aproximación específicos. Es muy difícil determinar realmente la magnitud de la diferencia entre la capacidad térmica real y la capacidad térmica requerida. Existen tres casos diferentes para determinar cuantitativamente la capacidad de las torres de enfriamiento a partir de los datos experimentales. Los cuales son:

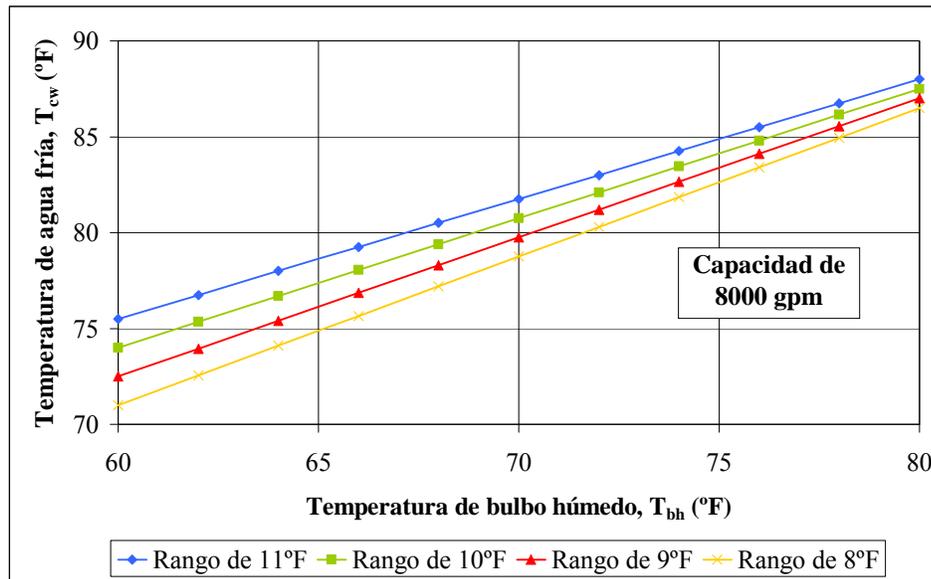
- Cuando las curvas de rendimiento están disponibles.
- Cuando las curvas de rendimiento no están disponibles, pero se tiene la curva característica de la torre.
- Cuando no se dispone ni de las curvas de rendimiento ni de la curva característica de la torre.

En todos los casos, es necesario realizar pruebas experimentales para determinar los datos reales necesarios para la comparación, las cuales deben cumplir con ciertos estándares que garanticen que los resultados se apegarán lo más posible a los valores de diseño. En el apéndice A, se enlistan estos estándares, establecidos por el Cooling Tower Institute en la norma CTI código ATC-105 (Stanford, 2003).

II.5.2.1 Cuando las curvas de rendimiento están disponibles

En la figura 8, se ilustra el tipo de curva de requerimiento proporcionada por el fabricante de la torre de enfriamiento. En estas curvas se representa la variación del rendimiento en función de los cambios de temperatura tanto de bulbo húmedo como de agua caliente, mientras que la cantidad de agua se mantiene constante. Usualmente el fabricante proporciona estas curvas para tres flujos volumétricos de agua diferentes, entre los cuales está el flujo de diseño, y las dos restantes corresponden a

un flujo de agua por debajo (90%) y por encima (110%) del flujo de diseño, con la finalidad de que el usuario disponga de esta información para un rango de operación de la torre que oscile alrededor del flujo de agua de diseño.



Fuente: Daeil Aqua Co, s.f.

Figura 8. Curvas de rendimiento típicas de una torre de enfriamiento

Cuando se dispone de estas curvas, la evaluación de los datos experimentales de campo es usualmente un procedimiento simple, el cual consiste fundamentalmente en establecer una comparación entre la capacidad real, a partir de los datos de prueba, y la capacidad de diseño, a partir de las curvas de rendimiento (Daeil Aqua Co., s.f.).

Sin embargo, al establecer esta comparación debe tomarse en cuenta que las pruebas son rara vez hechas con los ventiladores operando a la potencia de diseño, y por ende, debe realizarse un ajuste para tomar en cuenta la variación en el rendimiento térmico de prueba causado por la variación en la potencia de los ventiladores. Debido a que el flujo de aire varía directamente con el flujo de agua y con la raíz cúbica de la potencia de los ventiladores (a temperaturas de bulbo húmedo, agua fría y agua caliente constantes), el ajuste se aplica directamente al flujo de agua de prueba como sigue:

$$L'_A = L'_P \cdot \sqrt[3]{\frac{BPH_D}{BPH_P}} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

L'_A : Caudal de agua de prueba ajustado (m³/h)

L'_P : Caudal de agua de prueba (m³/h)

BPH_D : Potencia de diseño de los ventiladores (HP)

BPH_P : Potencia de prueba de los ventiladores (HP)

Luego, la comparación final entre la capacidad de diseño y la capacidad real se hace por medio del porcentaje de capacidad, el cual es una medida del caudal de agua que puede enfriar la torre (en la práctica) hasta la temperatura de agua fría de diseño si esta opera a las temperaturas de bulbo húmedo, y de entrada de agua de diseño. Esto es (SPX Cooling Tehcnologies, 2006):

$$\%C_T = \frac{L'_A}{L'_D} \cdot 100 \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

L'_D : Caudal de diseño (tomado de las curvas de rendimiento) (m³/h)

$\%C_T$: Porcentaje de capacidad térmica (%)

II.5.2.2 Cuando las curvas de rendimiento no están disponibles, pero se tiene la curva característica de la torre

En este caso, puede obtenerse la curva de requerimientos de diseño mediante el método explicado en la sección II.5.1, y graficarla junto con la curva característica de la torre suministrada por el fabricante. La intersección entre estas dos curvas determina el punto de diseño de la torre ($(L/G)_D$ y $(KaV/L)_D$).

Para evaluar la capacidad de la torre con una prueba de campo, es necesario al igual que en el caso anterior tener un valor de prueba; en esta situación un valor de L/G de

prueba o real $(L/G)_P$ debe ser ajustado no solo por la diferencia entre la potencia de los ventiladores sino también por la diferencia en el contenido de agua del aire en la prueba con respecto a las condiciones de diseño, mediante el ajuste del volumen húmedo del aire. El ajuste se determina mediante la siguiente ecuación (Daeil Aqua Co., s.f.):

$$\left(\frac{L}{G}\right)_P = \left(\frac{L}{G}\right)_D \left(\frac{L'_P}{L'_D}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{BPH_D}{BPH_P}} \cdot \left(\frac{v_{HP}}{v_{HD}}\right)^{2/3} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

v_{HP} : Volumen húmedo del aire de prueba a la salida del aire (m^3/kg)

v_{HD} : Volumen húmedo del aire de diseño a la salida del aire (m^3/kg)

El valor de KaV/L , correspondiente al valor de $(L/G)_P$, se obtiene según el método de Tchebyshey usando la temperatura de bulbo húmedo experimental. Este punto es graficado y luego por él se traza una recta paralela a la curva característica. La intersección de esta línea con la curva de requerimientos de diseño determina el valor de L/G real necesario para cumplir con las condiciones de diseño, el cual se denomina $(L/G)_{CD}$ (BSI, 1988). En la figura 9 puede observarse la representación gráfica del método.

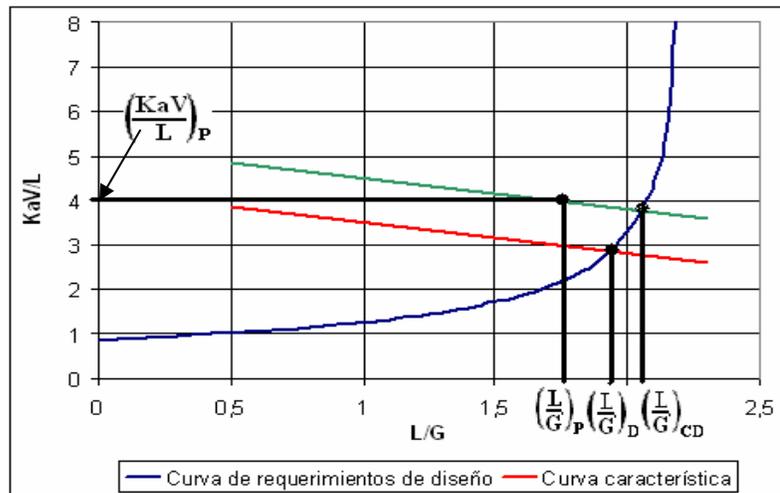


Figura 9. Curva característica y curva de requerimientos de diseño

Así, el porcentaje de capacidad de la torre puede ser ahora determinado como (BSI, 1988):

$$\%C_T = \frac{\left(\frac{L}{G}\right)_{CD}}{\left(\frac{L}{G}\right)_D} \cdot 100 \quad \text{Ec. 28}$$

II.5.2.3 Cuando no se dispone ni de las curvas de rendimiento ni de la curva característica de la torre

En este caso los datos de prueba en la torre deben ser distribuidos adecuadamente para facilitar la determinación de la curva característica, y al igual que en los casos anteriores deben seguir los códigos de prueba establecidos por el CTI.

Para todas las temperaturas y flujos de agua deben realizarse promedios aritméticos, y luego se calcula el valor de L/G de prueba mediante la ecuación 27, tomando en cuenta que el valor de caudal de agua de prueba (L'_p) será en este caso el promedio del conjunto de valores obtenidos en las pruebas experimentales. Luego se calcula el valor de KaV/L correspondiente a $(L/G)_p$ según el método de Tchebyshev utilizando las respectivas temperaturas de bulbo húmedo y de entrada y salida del agua promedio, para estas condiciones.

La curva característica experimental, tiene una forma expresada en la ecuación 24, la cual es una línea recta cuando se grafica en papel bilogarítmico. Esta se determina graficando el punto $[(L/G)_p; (KaV/L)_p]$ en escala bilogarítmica y trazando una recta de pendiente -0.6 (valor típico establecido por los fabricantes de torres, el cual se encuentra dentro del rango de 0,4 a 0,7); la intersección de esta recta con la curva de requerimientos de diseño determina el valor de $(L/G)_{CD}$. Luego, el porcentaje de capacidad se determina, al igual que en la sección II.5.2.2, mediante la ecuación 28 (Daeil Aqua Co., s.f.).

II.5.3 Determinación de la capacidad hidráulica de una torre de enfriamiento

La capacidad hidráulica de una torre indica la cantidad de agua que la torre puede manejar sin que la misma presente problemas en sus componentes estructurales como el relleno, los soportes entre otros. Dicha capacidad es calculada por el fabricante de la torre basado en parámetros relacionados con la resistencia de los rellenos. Cuando no se tiene disponible es posible determinar la máxima capacidad física o teórica que puede manejar la torre y consultar con empresas especializadas si dicho caudal se encuentra en efecto, dentro de los límites de resistencia del relleno instalado.

Si las piscinas de agua caliente se encuentran en el tope de la torre, y el agua es añadida a la misma por acción de la gravedad, entonces la capacidad máxima teórica (L'_H) es función del diámetro de los rociadores de agua (d_r) del número de rociadores totales en la torre (n_r) y de la altura de la columna de agua a la cual está sometido (z_L). Para cada tipo y modelo de rociador, el fabricante debe especificar una curva de capacidad la cual relaciona la altura de la columna de líquido en función del caudal que maneja cada rociador (L'_{cr}) para cada diámetro de rociador. Así, puede obtenerse L'_{cr} de la gráfica y:

$$L'_H = n_r \cdot L'_{cr} \quad \text{Ec. 29}$$

Si la capacidad calculada entra en los límites de resistencia entonces puede calcularse el porcentaje de capacidad hidráulica ($\%C_H$) como:

$$\%C_H = \frac{L'_P}{L'_H} \cdot 100 \quad \text{Ec. 30}$$

II.5.4 Eficiencia térmica y de enfriamiento de una torre de enfriamiento

La **eficiencia térmica** de una torre de enfriamiento es una medida de la cantidad de calor removido por esta comparado con el especificado en su diseño. Por lo tanto, la eficiencia térmica η_T viene dada por:

$$\eta_T = \frac{q_{LR}}{q_{LD}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

q_{LR} : Calor retirado del agua real (kW)

q_{LD} : Calor retirado del agua a condiciones de diseño (kW)

Por otra parte, la **eficiencia de enfriamiento** η_E representa la cantidad de calor porcentual que remueve la torre, en condiciones de operación normal, con relación al máximo calor que podría manejar la torre en condiciones ideales, es decir, logrando un enfriamiento del agua hasta una temperatura igual a la de bulbo húmedo de operación. Entonces se tiene que:

$$\eta_E = \frac{(T_{hw} - T_{cw})}{(T_{hw} - T_{bh})} \cdot 100 \quad \text{Ec. 32}$$

Es importante mencionar que la eficiencia térmica es un valor comparativo entre una variable de diseño y una de operación, mientras que la eficiencia de enfriamiento es una medida de un valor (ya sea de diseño o de operación) con respecto a un valor ideal o teórico.

II.6 CALIDAD DEL AGUA EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

El acondicionamiento del agua de enfriamiento a menudo no es tomado en cuenta como una variable potencial para garantizar la continuidad y operación eficiente de los procesos industriales. Esencialmente, el agua de enfriamiento es invisible para el operador, pero cuando no se toma en cuenta, produce problemas graves en la torre y en los equipos para los cuales presta servicio. Estos problemas están relacionados con los contaminantes presentes en el agua, los cuales progresivamente aumentan su concentración en el agua que recircula continuamente a la torre debido a varios factores:

- El agua al entrar en contacto con el aire actúa como un purificador, “lavando” de dicho aire los contaminantes que trae consigo.
- Parte del agua de enfriamiento es evaporada y arrastrada del proceso por la corriente de aire, pero este proceso involucra solo al agua pura, aumentando la concentración de contaminantes en el agua recirculada.

Es por esto que es necesario aplicar medidas como la purga de agua y su reemplazo por agua fresca y/o tratamientos químicos y físicos para garantizar que el agua de enfriamiento mantenga su calidad dentro de límites aceptables (Oliveros, s.f.).

II.6.1 Impurezas presentes en el agua de enfriamiento

El agua en estado puro no se encuentra en la naturaleza, y dependiendo de donde provenga contiene una determinada cantidad de impurezas, en la tabla 3 se presentan los compuestos que afectan a las torres de enfriamiento y el tipo de daños que originan en los sistemas.

Tabla 3. Compuestos que afectan a las torres de enfriamiento

CONSTITUYENTE	FÓRMULA QUÍMICA	DIFICULTAD QUE CAUSA
Dureza	Sales de Ca y Mg	Fuente principal de incrustaciones en intercambiadores y tuberías
Dióxido de carbono	CO ₂	Corrosión en las líneas de agua
Acidez mineral	H ₂ SO ₄	Corrosión
Acidez Libre	HCl	Corrosión
Sulfatos	SO ₄	Aumenta el contenido de sólidos en el agua. Se combinan con el calcio para formar sales incrustantes de sulfato de calcio
Cloruros	Cl (como el NaCl)	Aumenta el contenido de sólidos e incrementa el carácter corrosivo del agua
Sílice	SiO ₂	Incrustaciones en el sistema de agua de enfriamiento
Impurezas más comunes en el agua		
Hierro	Fe ⁺² ferroso Fe ⁺³ férrico	Fuentes de depósitos en las tuberías
Oxígeno	O ₂	Oxidación en tuberías (hierro y acero)
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	Corrosión
Sólidos suspendidos		Originan depósitos en los equipos intercambiadores de calor y tuberías. Ocasionalmente ocasionan formación de lodos e incrustaciones. También provocan corrosión por erosión.
Microorganismos	Algas, limo y hongos	Formación de adherencia, suciedad biológica, corrosión y olores desagradables.
Sólidos disueltos		Elevadas concentraciones de sólidos son indeseables debido a que originan formación de lodos

Fuente: Isidro, 2006

Existen otros factores que aunque no representan directamente impurezas presentes en el agua, son una medida de dichos contaminantes y sirven de referencia e índice de los problemas que pueden causar en los equipos:

pH: es una medida de la acidez o alcalinidad del agua expresada en una escala de 0 (ácido) a 14 (alcalino), donde un pH de 7 es tomado como neutro.

Alcalinidad: expresada como CaCO₃, es la concentración total de sales alcalinas (carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos) (Mobley, 2001).

II.6.2 Problemas encontrados en Torres de Enfriamiento

Los sistemas de agua de enfriamiento, independientemente de la configuración de los equipos, de los materiales de construcción o de las fuentes del agua, son todos ellos propensos a cuatro problemas básicos: corrosión, incrustaciones, ensuciamiento y contaminación microbiana. Cuando no se controlan, estos problemas provocan una pérdida de transferencia de calor y la falla de los equipos, causando a su vez una pérdida de producción y beneficios, costos de mantenimiento más elevados y en casos más serios, la parada de la planta.

Cada uno de estos problemas está relacionado con las leyes básicas naturales por las que los metales tienden a volver a su estado oxidado natural, los minerales a precipitar, los sólidos en suspensión a sedimentar y los microorganismos a multiplicarse. En conjunto, todos estos problemas pueden detener el funcionamiento de un sistema de agua de enfriamiento de forma muy rápida.

Los cuatro problemas principales pueden resumirse de la forma siguiente:

Corrosión: En la fabricación de metales usados normalmente en los sistemas de enfriamiento, tales como el acero dulce, se elimina el oxígeno de los minerales naturales. Los sistemas de agua de enfriamiento proporcionan un entorno ideal para que el metal vuelva a su estado oxidado. Este proceso de inversión se denomina corrosión. Provoca adelgazamiento de las paredes metálicas, forma depósitos aislantes en las tuberías y produce erosión en las paredes por donde circula el fluido.

Incrustaciones: Los minerales tales como el calcio y el magnesio son relativamente insolubles en agua y pueden precipitar para formar depósitos de incrustaciones en las condiciones típicas de un sistema de agua de enfriamiento. Las incrustaciones conllevan a la reducción en la eficiencia en la transferencia de calor debido a que actúan como aislantes, taponan los equipos y aumentan la caída de presión.

Ensuciamiento: La formación de depósitos de materiales en suspensión en los intercambiadores de calor se llama ensuciamiento. Los agentes de ensuciamiento pueden proceder de fuentes externas tales como el polvo ambiental presente en los alrededores de una torre de enfriamiento o de fuentes internas tales como productos de corrosión.

Contaminación microbiana Los sistemas de agua de enfriamiento proporcionan un entorno ideal en el que las bacterias crecen, se multiplican y causan problemas de depósitos en los intercambiadores de calor. Estos microorganismos se dividen en algas, limos y hongos. Los daños causados por las algas y el limo son semejantes a los producidos por incrustación. La adherencia de las algas y bacterias a la superficie interna de los tubos de los condensadores y líneas de agua, dan como resultado suciedad biológica y corrosión. La presencia de excesivos limos y bacterias puede producir olores desagradables. Los hongos pueden afectar las maderas con las que se construyen algunos tipos de torres de enfriamiento (Oliveros, s.f.).

Existen métodos para determinar, basado en la concentración de ciertos contaminantes, la tendencia del agua a presentar alguno de los cuatro problemas antes mencionados. La **ecuación de Langelier** puede ser usada para determinar la estabilidad de los carbonatos o las propiedades corrosivas de una torre de enfriamiento para una temperatura específica cuando se conocen las concentraciones de sólidos totales y de calcio total, la alcalinidad total y el pH. El **índice de saturación** obtenido de estos valores es la diferencia entre el pH real (pH) medido y el pH de saturación de carbonato de calcio calculado (pH_s).

$$I.S. = pH - pH_s \quad \text{Ec. 33}$$

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

I.S.: Índice de saturación de Langelier

pH: pH del agua medido a la temperatura específica

pH_S: pH de saturación de CaCO₃

A: factor que depende de la concentración de sólidos totales

B: factor que depende de la temperatura

C: factor que depende de la concentración de dureza cálcica

D: factor que depende de la concentración de alcalinidad total

Los factores *A*, *B*, *C* Y *D* pueden ser tomados de la tabla 4.

Tabla 4.Datos para el cálculo rápido del Índice de saturación e Índice de estabilidad

A		B		C		D	
Sólidos Totales (ppm)	A	Temperatura (°F)	B	Dureza Cálcica (ppm CaCO ₃)	C	Alcalinidad (ppm CaCO ₃)	D
50-400	0.1	32-34	2.6	10-11	0.6	10-11	1.0
400-1000	0.2	36-42	2.5	12-13	0.7	12-13	1.1
		44-48	2.4	14-17	0.8	14-17	1.2
		50-56	2.3	18-22	0.9	18-22	1.3
		58-62	2.2	23-27	1.0	23-27	1.4
		64-70	2.1	25-34	1.1	25-34	1.5
		72-80	2.0	35-43	1.2	35-43	1.6
		82-88	1.9	44-55	1.3	44-55	1.7
		90-98	1.8	56-69	1.4	56-69	1.8
		100-110	1.7	70-87	1.5	70-87	1.9
		112-122	1.6	88-110	1.6	88-110	2.0
		124-132	1.5	111-138	1.7	111-138	2.1
		134-146	1.4	139-174	1.8	139-174	2.2
		148-160	1.3	175-220	1.9	175-220	2.3
		152-178	1.2	230-270	2.0	230-270	2.4
				280-340	2.1	280-340	2.5
				350-430	2.2	350-430	2.6
				440-550	2.3	440-550	2.7
				560-690	2.4	560-690	2.8
				700-870	2.5	700-870	2.9
				880-1000	2.6	880-1000	3.0

Fuente: SPX Cooling Technologies, 2006

Cuando el índice de saturación es igual a cero (0), el agua está en equilibrio con el CaCO_3 sólido a esa temperatura; cuando es positivo, el agua está sobresaturada de CaCO_3 y puede presentar depósitos e incrustaciones en el sistema; y cuando es negativo, el agua disolverá el CaCO_3 y tendrá tendencia corrosiva.

La **ecuación de Ryznar** proporciona una correlación más cercana entre las predicciones teóricas y los resultados obtenidos de las pruebas de campo; el valor numérico obtenido de esta ecuación se llama **índice de estabilidad (I.E.)**. Un valor entre 6 y 7 indica un agua balanceada, valores menores a 6 están en el área de la formación de incrustaciones y valores mayores a 8 indican una tendencia corrosiva creciente.

$$I.E. = (2 \cdot pH_s) - pH \quad \text{Ec. 35}$$

Estos índices son solo una medida de la tendencia direccional de los problemas que puede presentar un agua dependiendo de los contaminantes en ella contenida y de sus concentraciones. Es recomendable calcular ambos índices para predecir con mayor exactitud si el agua tiene tendencia corrosiva o incrustante (SPX Cooling Technologies, 2006).

II.6.3. Agua de reposición

Para mantener la cantidad requerida de agua en el sistema, es necesario reponer las pérdidas que ocurren en la torre. El agua de reposición debe ser tomada en cuenta en el balance de agua de enfriamiento y para los requerimientos de agua de la planta.

La cantidad de agua de reposición será calculada a partir de la suma de las pérdidas que ocurren en el sistema, de acuerdo a los siguientes criterios:

Pérdidas por Evaporación: si no se cuenta con el valor real calculado, se puede asumir un 1% del caudal por cada caída de temperatura de 5.5°C a través de la torre.

Pérdidas por Arrastre (drift): éstas se asumen generalmente 0.01% del caudal de agua de recirculación para agua salada, salobre y fresca.

Otras Pérdidas o Misceláneas: suelen ser estimadas como un séptimo (1/7) de la diferencia entre las pérdidas por evaporación y arrastre.

Purga: La cantidad de agua de reposición requerida por concepto de purga se obtiene a partir del análisis químico del agua de reposición, determinando el número máximo de ciclos permitidos por constituyente. Una vez obtenido el número de ciclos, la cantidad de agua se calcula con la siguiente fórmula:

$$L'_{BD} = \frac{L'_E}{(\text{Ciclos} - 1)} - (L'_{Df} + L'_X) \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

L'_{BD} : Purga o blowdown (m³/h)

L'_E : Pérdidas por evaporación (m³/h)

L'_{Df} : Pérdidas por arrastre (m³/h)

L'_X : Otras pérdidas o misceláneas (m³/h)

Ciclos: número de ciclos de concentración

El número de ciclos se obtiene dividiendo la concentración de cada constituyente en el agua fresca o de reposición entre la concentración máxima recomendada. El constituyente con menor factor será el de control y el que determine la cantidad de agua de reposición por purga. En la tabla 5 se muestran los límites de concentración recomendados para algunos contaminantes (Exxon Mobil R&E Co., 2000).

Entonces, el agua de reposición se calcula como:

$$L'_{MU} = L'_{BD} + L'_E + L'_{Df} + L'_X \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

L'_{MU} : Agua de reposición o Make-up (m³/h)

Tabla 5. Límite de concentración de impurezas permitidos en el agua de recirculación para agua fresca

IMPUREZA	CONCENTRACIÓN MÁXIMA
Sólidos Totales	3200 ppm
Sólidos Disueltos	3000 ppm
Sólidos Suspendedos	200 ppm
IONES ESPECÍFICOS	
Cloruros	1000 ppm
Cobre	0.2 ppm
Hierro	5 ppm
Zinc	1 ppm
Sulfato	500 ppm
Dureza Total	1500 ppm como CaCO ₃
Dureza Cálcica	1300 ppm como CaCO ₃
Dureza Magnésica	300 ppm como CaCO ₃
Alcalinidad Total	600 ppm como CaCO ₃

Fuente: Exxon Mobil R&E Co., 2000

Aunque realizar una purga de agua al sistema para evitar la concentración de impurezas es un procedimiento simple y efectivo, muchas veces no es suficiente, ya sea por el efecto de los contaminantes lavados del aire los cuales no pueden ser determinados cuantitativamente ó, principalmente, porque los ciclos de concentración del contaminante que controla la purga de agua resultan muy bajos. Esto último implica una gran pérdida de agua que debe ser purgada para mantener el agua en calidad óptima, lo cual en la mayoría de los casos resulta poco práctico y muy costoso ya que implica un flujo de agua fresca de reposición muy grande. En estos casos es necesario realizar tratamientos físicos o químicos adicionales para disminuir la concentración de contaminantes del agua y, por ende, aumentar los ciclos de concentración para lograr un equilibrio costo-beneficio.

II.6.4. Tratamientos realizados a torres de enfriamiento

Tratamiento externo: Coagulación, sedimentación, filtración, ablandamiento o suavización, desaireación, desmineralización, absorción, clarificación, etc. La combinación de estos métodos sólo son empleados en plantas que manejan enormes cantidades de agua y que hacen a estos procesos rentables (termoeléctrica, petroquímica básica y secundaria).

Tratamiento interno: Es el que comprende la utilización de químicos agregados al volumen de agua de recirculación (Isidro, 2006).

Cuando es requerido un tratamiento químico, generalmente es necesario contratar los servicios de una compañía de tratamiento de aguas confiable, ya que estas compañías poseen químicos bactericidas, antiescalantes y anticorrosivos formulados especialmente para llevar a especificación las impurezas del agua. Sin embargo, si se requiere hacer un análisis preliminar, existen compuestos simples que disminuyen la concentración de ciertas impurezas y reducen el efecto de los problemas encontrados en las torres de enfriamiento. Además, es posible determinar, mediante fórmulas sencillas las dosificaciones necesarias de dichos compuestos.

Control de la alcalinidad o el pH con ácido: Ésta es una manera de eliminar iones, ya que se eliminan los iones carbonato y bicarbonato convirtiéndolos en CO₂. Un ppm de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄ 66° Baumé) elimina 1 ppm de alcalinidad M, por tanto (Oliveros, s.f.):

$$L'_{as} = \frac{L'_{MU} \cdot C_{alk}}{\rho_{as}} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

L'_{as} : Caudal de ácido sulfúrico 66°Bé a ser dosificado (m³/h)

C_{alk} : Concentración de alcalinidad total expresada como CaCO₃ (kg/m³)

ρ_{as} : Densidad del ácido sulfúrico (kg/m³)

Inhibidores de corrosión y antiescalantes: la dosificación debe ser especificada por el vendedor, de lo contrario, se puede calcular como 100 wppm (partes por millón en masa) de concentración de cada líquido comercial en el agua de recirculación. El caudal de diseño debe ser calculado basándose en el flujo de purga de diseño, debido a que el producto se pierde a través de la purga. Así (Exxon Mobil R&E Co., 2000):

$$L'_{químico} = L'_{BD} \cdot 10^{-4} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

$L'_{químico}$: Caudal de químico anticorrosivo o antincrustante a ser dosificado (m^3/h)

Control microbiológico: El cloro es el biocida mas ampliamente usado para controlar el crecimiento de la materia orgánica en los sistemas de enfriamiento, esto se debe a su alta efectividad y bajo costo. La alta efectividad del cloro como agente biocida se debe a que éste en combinación con el agua se disocia formando ácido hipocloroso e ión hipoclorito, ambos con poder oxidante capaz de controlar el crecimiento microbiológico.

Se debe disponer de alguna fuente de cloro, ya sea en forma de hipocloritos, cloro gaseoso o compuestos de cloro de desprendimiento lento. Cuando se utiliza cloro, las siguientes cantidades son necesarias para reaccionar con las impurezas enlistadas (ver tabla 6):

Tabla 6. Dosificación de cloro para eliminar diferentes contaminantes

IMPUREZA	Cantidad de cloro (wppm) por cada wppm de impureza
Amoníaco (NH_3)	10
Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)	2.2
Sulfato de sodio (Na_2SO_4)	0.56
Hierro ferroso (Fe^{2+})	0.64

Fuente: Exxon Mobil R&E Co., 2000

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se proponen una serie de estrategias para cumplir con los objetivos de interés en este Trabajo Especial de Grado, junto con la descripción de las distintas herramientas y procedimientos a emplear para tal fin.

III.1. DATOS DEL DISEÑO

En la tabla 7 se muestran las nuevas variables de diseño luego de las modificaciones mencionadas en la sección I.3.

Tabla 7. Condiciones de diseño actual de la torre M-7000

	Unidades Inglesas	Sistema Internacional
Capacidad total de la torre (L'_D)	62500 gpm	14200 m ³ /h
Capacidad de cada celda	12500 gpm	2840 m ³ /h
Celdas en operación	5	5
Flujo volumétrico de aire (G'_D)	40200000 gpm	9120000 m ³ /h
Reposición (L'_{MUD})	1170 gpm	350 m ³ /h
Capacidad de enfriamiento (q_D)	562500000 BTU/h	165000 kW
# Aspas de los ventiladores	10	4
Inclinación de las aspas	12,5 °	15 °
Potencia de los ventiladores (BPH_D)	1250 HP	933 kW
Potencia de cada ventilador	250 HP	187 kW
Tamaño de relleno	8x4 plgxplg	20,3x10,2 cmxcm
Temperatura de agua caliente (T_{hwD})	105 °F	40,5 °C
Temperatura de agua fría (T_{cwD})	87 °F	30,5 °C
Temperatura de bulbo seco (T_{bsd})	86 °F	30 °C
Temperatura de bulbo húmedo (T_{bhd})	78 °F	25,5 °C
Rango de enfriamiento ($Rango_D$)	18 °F	10 °C
Aproximación ($Aprox_D$)	9 °F	5 °C
Ciclos de concentración ($Ciclos_D$)	4	4

III.2. COMPONENTE EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo la evaluación térmica e hidráulica de la torre de enfriamiento M-7000 se realizó un seguimiento de las variables climatológicas y de operación desde el 20 de noviembre de 2007 hasta el 4 de marzo de 2008 (estos datos se incluyen en el apéndice B). Las variables consideradas fueron: temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo (las cuales se midieron, para cada corrida a los cuatro costados de la torre, promediándose luego estos valores y reportándose dicho promedio), la temperatura de agua caliente (medida en las piscinas de agua caliente), temperatura de agua fría (medida en el pozo de succión de las bombas de recirculación), la presión de descarga de las bombas de recirculación (mediante la cual se determinó con las curvas características el flujo de agua de recirculación).

Por otro lado, se obtuvieron los valores del flujo volumétrico de aire y de la potencia de los ventiladores los cuales son valores fijos para todos los días.

III.3. BASES DE LA EVALUACIÓN

Antes de iniciar con la descripción del procedimiento a seguir para la evaluación de la torre, resulta conveniente definir las bases consideradas para los cálculos posteriores.

- La Densidad del agua ρ_L se toma como la densidad promedio entre la temperatura de agua caliente y la temperatura de agua fría (993,71 Kg/m³).
- Las temperaturas de referencia del vapor y del líquido (T_{0G} y T_{0L} respectivamente) se toman, ambas, como 0°F.
- La presión de operación p_t se toma como la presión atmosférica media de la zona (101325 Pa).
- La capacidad calorífica del agua C_{pL} se supone que no varía en el rango de temperaturas y es de 4,184 kJ/kg.K y la del aire C_{pG} es 1,005 kJ/kg.K
- Se supone que el aire sale saturado de la torre.
- El valor de la pendiente del exponente (n) de la curva característica se fijó en 0,6

- La altura de la columna de agua (z_L) para calcular el caudal de los rociadores se tomó la altura de agua promedio de diseño de las piscinas de agua caliente (10plg).
- Las pérdidas por evaporación calculadas son el 1,4% del caudal de recirculación.
- Las pérdidas por arrastre se suponen que son el 0,01% del caudal de recirculación
- Los ciclos de concentración de operación deseados, establecidos por el cliente, se fijaron en siete (7).
- La dosificación de todos los compuestos para el tratamiento químico debe ser continua según lo especificado por el cliente.
- Debe garantizarse un residual de cloro libre de 1 ppm.

III.4. PLAN DE TRABAJO

A continuación se desarrolla la metodología a seguir para alcanzar cada uno de los objetivos planteados.

III.4.1. Comportamiento de las variables de operación

Una vez realizadas todas las pruebas y recolectados todos los datos se procedió a graficar el universo de los valores experimentales de cada variable en función del día de la medida, y sus promedios aritméticos para estudiar su comportamiento. Las variables estudiadas fueron el caudal de agua recirculado (L'_P), temperatura de agua caliente (T_{hwP}), temperatura de agua fría (T_{cwP}) y la temperatura de bulbo húmedo (T_{bhP}). Este mismo procedimiento se realizó para variables calculadas relacionadas con las mediciones como:

- Rango de enfriamiento ($Rango_P$): mediante la ecuación 21
- Temperatura de acercamiento ($Aprox_P$): mediante la ecuación 22
- Eficiencia Térmica (η_T): mediante la ecuación 31
- Eficiencia de enfriamiento (η_{EP}): mediante la ecuación 32

Además, se graficó para cada variable el valor de la misma a las condiciones de diseño para posteriormente realizar un análisis comparativo, excepto para la eficiencia térmica la cual por sí misma es un valor comparativo entre la operación y el diseño.

III.4.2. Cálculo de la relación líquido-gas y del coeficiente característico de diseño o coeficiente requerido.

Para la determinación de la relación líquido-gas y coeficiente característico requerido se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Paso 1. Datos requeridos

Los datos requeridos para llevar a cabo los cálculos son los siguientes:

- Caudal de agua de recirculación a condiciones de diseño o capacidad de la torre (L'_D)
- Caudal de aire (G'_D)
- Temperatura de bulbo húmedo de diseño (T_{bhD})
- Temperatura de diseño de salida del agua o temperatura de agua fría (T_{cwD})
- Temperatura de diseño de entrada del agua o temperatura de agua caliente (T_{hwD})

Paso 2. Cálculo del flujo másico del aire (G_D)

Para esto se realizaron los siguientes cálculos:

- a. Flujo másico del líquido (L) mediante la siguiente fórmula

$$L_D = L'_D \cdot \rho_L \quad \text{Ec. 40}$$

- b. Basado en el balance de energía, el calor removido del agua por la torre (q_L):

$$q_{LD} = L_D \cdot C_{PL} \cdot \text{Rango}_D \quad \text{Ec. 41}$$

- c. Calor latente de vaporización a la temperatura de referencia (λ_0) y calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo (λ_{bh}) utilizando las

temperaturas de referencia del agua y la temperatura de bulbo húmedo respectivamente en grados Kelvin:

$$\lambda = -1.3T^2 - 1573.3T + 3029500 \quad \text{Ec. 42}$$

d. Presión de vapor del agua evaluada a la temperatura de bulbo húmedo ($p_{LD}(T_{bh})$):

$$p_{L1}(T_{bh}) = Ln(611.3) \cdot \left(\frac{1000}{T_{bh}} - \frac{1000}{373.15} \right) \Bigg/ \left(\frac{1000}{273.15} - \frac{1000}{373.15} \right)$$

$$p_{L2}(T_{bh}) = Ln(101325) \cdot \left(\frac{1000}{T_{bh}} - \frac{1000}{273.15} \right) \Bigg/ \left(\frac{1000}{373.15} - \frac{1000}{273.15} \right)$$

$$p_{L3}(T_{bh}) = \left(\frac{1000}{T_{bh}} - \frac{1000}{273.15} \right) \cdot \left(\frac{1000}{T_{bh}} - \frac{1000}{373.15} \right) \cdot \left(-0.327 + 0.03 \cdot \left(\frac{1000}{T_{bh}} \right) \right) \quad \text{Ec. 43}$$

$$p_L(T_{bh}) = \exp(p_{L1}(T_{bh}) + p_{L2}(T_{bh}) + p_{L3}(T_{bh}))$$

- e. Humedad absoluta de saturación evaluada a la temperatura de bulbo húmedo ($Y'_s(T_{bh})$) la cual se determina mediante la ecuación 3.
- f. Entalpía húmeda del aire de entrada a la torre evaluada a la temperatura de bulbo húmedo ($H_{ha1}(T_{bh})$) la cual se determina mediante la ecuación 8.

Luego se siguió un procedimiento iterativo para obtener la temperatura y la entalpía de salida del aire:

- g. Suponer $T_{G2} = T_{bh}$,
- h. Calcular la presión de vapor, la humedad de saturación, la entalpía húmeda ($H_{ha2}(T_{G2})$) y el volumen húmedo del aire evaluados a la temperatura de salida del aire supuesta mediante las ecuaciones 41, 3, 8 y 9 respectivamente.
- i. Calcular el flujo másico del aire de salida mediante la ecuación:

$$G_D = \frac{G'_D}{v_{HD}} \quad \text{Ec. 44}$$

j. El calor absorbido por el aire (q_G) se calcula como

$$q_G = G_D \cdot (H_{ha2}(T_{G2}) - H_{ha1}(T_{bh})) \quad \text{Ec. 45}$$

- k. Luego el calor retirado de la corriente de agua (q_L) debe ser igual al calor absorbido por el agua, de ser así, la temperatura de salida del aire supuesta es correcta, de no serlo, se supone una nueva temperatura de salida del aire hasta que los calores coincidan.

Luego de terminada la iteración se tendrán los valores del volumen húmedo del aire de salida y del flujo másico del aire.

Paso 3. Cálculo de la relación gas-líquido de diseño $(L/G)_D$

La relación gas-líquido de diseño se calculó por la siguiente ecuación

$$\left(\frac{L}{G}\right)_D = \frac{L_D}{G_D} \quad \text{Ec. 46}$$

Paso 4. Cálculo del coeficiente característico de la torre $(KaV/L)_D$

Para ello se utilizó el método de integración de Tchebycheff. Los pasos a seguir para el cálculo de la integral de Merkel por este método son los siguientes:

- a. Calcular T_a , T_b , T_c y T_d descritas en la ecuación 23
- b. Determinar la presión de vapor y la humedad absoluta de saturación para cada una de las temperaturas, mediante las ecuaciones 43 y 3 respectivamente.
- c. Determinar la entalpía del aire saturado para cada temperatura del agua (H_{hwa} , H_{hwb} , H_{hwc} y H_{hwd}), mediante la ecuación 8
- d. Determinar cada valor de entalpía del aire húmedo a la temperatura global del aire (H_{ha}) basado en la ecuación 20, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 H_{haa} &= H_{ha1} + 0.1 \cdot \frac{L}{G} C_{pL} \cdot (Rango_D) \\
 H_{hab} &= H_{ha1} + 0.4 \cdot \frac{L}{G} C_{pL} \cdot (Rango_D) \\
 H_{hac} &= H_{ha2} - 0.4 \cdot \frac{L}{G} C_{pL} \cdot (Rango_D) \\
 H_{had} &= H_{ha2} - 0.1 \cdot \frac{L}{G} C_{pL} \cdot (Rango_D)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 47}$$

- e. Luego se calculan los cuatro valores de ΔH_h como la resta de $H_{hw}-H_{ha}$ y por medio de la ecuación 23 se determina el coeficiente característico de la torre a condiciones de diseño $(KaV/L)_D$

III.4.3. Determinación de la curva de requerimientos de diseño y de la curva característica de la torre.

Para el cálculo de la curva característica y la curva de requerimientos de diseño, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Paso 1. Datos requeridos

Los datos requeridos para llevar a cabo los cálculos son los siguientes:

- Temperatura de bulbo húmedo de diseño (T_{bhD})
- Temperatura de diseño de salida del agua o temperatura de agua fría (T_{cwD})
- Temperatura de diseño de entrada del agua o temperatura de agua caliente (T_{hwD})
- Potencia de los ventiladores (BPH_D)
- Mediciones de prueba realizados a la torre (T_{bhP} , T_{cwP} , T_{hwP} , L'_P , G'_P , BPH_P)

Paso 2. Determinación de la curva característica

Como se explicó en la sección II.5.1, para la determinación de esta curva se deben suponer valores de L/G y calcular los respectivos valores de KaV/L tal cual como se

explicó en el paso 4 de la sección III.4.2. Los valores de L/G supuesto se fijaron entre 0 y 2,35.

Paso 3. Determinación de la curva característica

- a. Las medidas de los valores de prueba se tomaron para condiciones fuera de especificación para determinar los problemas que dicha torre presenta y es por esto que no todos los datos tomados cumplen con los criterios de prueba establecidos por el CTI los cuales se muestran en el apéndice A. Por tanto, el primer paso a seguir es tomar en cuenta solo días donde todos los valores medidos estén en concordancia con el código CTI-ATC-105, así se garantiza, para la determinación de la curva característica, que los valores medidos están lo mas cerca posible de los valores de diseño.
- b. Luego de seleccionar los datos, se realizó un promedio aritmético de los mismos para cada variable, para así obtener el conjunto promedio de datos de prueba más cercanos a las condiciones de diseño.
- c. Luego para los valores promedio de prueba, se siguió el procedimiento explicado en la sección II.5.2.3. donde se determinó $(L/G)_p$ por la ecuación 27 (el volumen húmedo de prueba se calculó utilizando el procedimiento descrito en el paso 2 de la sección III.4.2) y el valor de $(KaV/L)_p$ se determinó mediante el procedimiento descrito en el paso 4 de la sección III.4.2.
- d. Ya que la curva característica tiene la forma descrita en la ecuación 24, y que de acuerdo al procedimiento descrito en la sección II.5.2.3 el valor de n es igual a 0,6, entonces se puede determinar el valor de la constante C de la curva teniendo n y el punto de prueba $(L/G_D, KaV/L_D)$. Despejando de la ecuación 24:

$$C = \left(\frac{KaV}{L} \right)_p \cdot \left(\frac{L}{G} \right)_p^n \quad \text{Ec. 48}$$

- e. Finalmente se graficó la curva en escala bilogarítmica con pendiente -0.6 y punto de corte con el eje de las ordenadas igual a $\log(C)$ calculado en el punto anterior.

III.4.4. Cálculo de la capacidad térmica.

La capacidad térmica se determinó para el caso donde no se cuenta ni con las curvas de rendimiento ni con la curva característica de la torre como se explicó en la sección II.5.2.3.

Una vez teniendo definida la curva característica, según el paso 3 de la sección anterior, se grafica junto con la curva de requerimientos de diseño y el punto de corte de ambas curvas determinará la relación gas líquido para cumplir con las condiciones de diseño $(L/G)_{CD}$ y el coeficiente característico disponible $(KaV/L)_{CD}$. Finalmente, mediante la ecuación 28 se calculó el porcentaje de capacidad térmica de la torre y se calculó la capacidad térmica actual (L) como:

$$L = L_D \cdot \%C_T \quad \text{Ec. 49}$$

III.4.5. Cálculo de la capacidad hidráulica

La altura de la columna de líquido se midió como la altura máxima de agua en las piscinas de agua caliente, luego en la curva característica de los rociadores (ver apéndice C, figura C1) se entra con el valor de z_L y se corta con la curva correspondiente al d_r , y se lee en el eje X el valor del caudal de agua para cada rociador. Luego mediante la ecuación 29 se calculó la capacidad hidráulica máxima para luego comprobar con el fabricante si el relleno de la torre es capaz de soportar dicho caudal de agua. Finalmente se compara la máxima capacidad con las de prueba calculando el porcentaje de capacidad hidráulica mediante la ecuación 30.

III.4.6. Determinación del caudal de reposición o make-up deseado (L'_{MU})

Para la determinación del make-up se fijaron los ciclos de concentración en el valor deseado (7). El siguiente procedimiento fue realizado para cada caudal de agua de prueba, y luego de obtenidos todos los caudales de reposición, se promedió aritméticamente estos valores para tener un valor promedio y poder compararlo con el make-up al que actualmente opera la torre.

- a. Pérdidas por evaporación

$$L'_E = 0.014 \cdot L'_P \quad \text{Ec. 50}$$

- b. Pérdidas por arrastre

$$L'_{Df} = 0.0001 \cdot L'_P \quad \text{Ec. 51}$$

- c. Pérdidas misceláneas

$$L'_X = \frac{(L'_E - L'_{Df})}{7} \quad \text{Ec. 52}$$

- d. El caudal de purga el cual es calculado mediante la ecuación 36 con los ciclos de concentración especificada en las bases de la evaluación

- e. Finalmente el caudal de reposición se calcula mediante la ecuación 37

III.4.7. Determinación de los ciclos de concentración de contaminantes

La composición de impurezas del agua de reposición fue determinada en base a la concentración de cada contaminante, reportados y suministrados a VEPICA para su estudio. Para obtener los ciclos de concentración de cada contaminante debe dividirse la concentración máxima de dicho contaminante (C_{iMAX}), reportadas en la tabla 5, entre el valor de prueba reportado (C_{iP}), así:

$$Ciclos_i = \frac{C_{iMAX}}{C_{iP}} \quad \text{Ec. 53}$$

III.4.8. Determinación del Índice de Saturación y el Índice de Estabilidad

Para determinar si la tendencia del agua de reposición es incrustante o corrosiva se calcularon los índices de saturación y de estabilidad de la siguiente manera:

- a. Los datos necesarios para el cálculo fueron suministrados por la refinería, como se mencionó anteriormente, los cuales son la dureza cálcica, alcalinidad total, concentración de sólidos totales y pH del agua y la temperatura del agua. Dicha temperatura se tomó como la temperatura de agua caliente más alta reportada en los valores de prueba, ya que este es el valor más sensible y crítico.
- b. Se calculó el pH de saturación de carbonato de calcio (pH_s) mediante la ecuación 34, los parámetros A, B, C y D necesarios para la determinación del pH_s se obtuvieron a partir de la tabla 4.
- c. El índice de saturación de Langelier se calculó mediante la ecuación 33.
- d. El índice de estabilidad de Ryznar se calculó mediante la ecuación 35.

Finalmente el valor calculado de cada parámetro indicará la tendencia incrustante o corrosiva del agua según los criterios establecidos en la sección II.6.2, y presentados a continuación en la tabla 8:

Tabla 8. Tendencia corrosiva o incrustante de un agua basado en el I.S. y en el I.E.

Tendencia	I.S.	I.E.
Corrosiva	< 0	>8
Equilibrada	0	6 < I.E. < 7
Incrustante	> 0	<6

III.4.9. Estudio del control de impurezas

El procedimiento a seguir en esta sección depende de los ciclos de concentración obtenidos para cada contaminante. Debido a que el número mínimo de ciclos de concentración permitido en la operación de la torre se estableció como 7, cualquier

valor calculado en la sección III.4.5 que sea menor al establecido se encuentra fuera de especificación y debe ser ajustado disminuyendo la concentración de dicho contaminante mediante tratamiento químico. Cualquier valor mayor a 7 garantiza que no traerá problemas determinantes en la operación de la torre y por tanto no se requiere tratamiento químico.

Paso 1. Cálculo del caudal de ácido sulfúrico (L'_{as}) requerido para la disminución de la alcalinidad

Si se requiere, para ajustar la alcalinidad total al valor deseado se añade ácido sulfúrico, y la cantidad que debe ser agregada se determina de la siguiente manera:

- a. Determinar la concentración de alcalinidad que es necesario reducir para garantizar 7 ciclos de concentración

$$C_{alkr} = C_{alkP} - \frac{C_{alkMAX}}{Ciclos} \quad \text{Ec. 54}$$

Donde:

C_{alkr} : concentración de alcalinidad a ser reducida (ppm de CaCO_3)

C_{alkP} : concentración de alcalinidad de prueba (ppm de CaCO_3)

C_{alkMAX} : concentración de alcalinidad máxima permitida (ppm de CaCO_3)

- b. Debido que 1 ppm de ácido sulfúrico elimina un ppm de alcalinidad, la concentración de dicho ácido que debe ser agregado es igual a la concentración C_{alkr} y el caudal de ácido sulfúrico que debe agregarse se calcula mediante la ecuación 38.

Luego se compara este valor con el caudal de ácido dosificado actualmente a la torre y se determina si se está sobredosificando o si es necesario añadir más cantidad de dicho ácido.

Paso 2. Dosificación de químicos para el control de corrosión e incrustaciones

Como se explicó en la sección I.2, el químico añadido para el control de incrustaciones y corrosión es el multifuncional XLP-3252. La formulación química de este compuesto no fue especificada por la empresa que lo produce, y por ende se realizó un cálculo a groso modo de la cantidad de químico que debe ser agregado a la torre mediante la ecuación 39.

Paso 3. Dosificación de cloro para el control microbiológico

Para el control microbiológico se utiliza dosificación de cloro, por tanto se calculó el caudal total de cloro que debe ser añadido como la suma de los caudales que deben ser agregados para eliminar cada contaminante causante de crecimiento microbiológico, según las concentraciones establecidas en la tabla 6.

Finalmente, se realizó una comparación entre los caudales de químicos obtenidos y los dosificados actualmente al sistema de enfriamiento.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos luego de aplicar la metodología descrita en la sección anterior, la cual permitió cumplir con los objetivos planteados en este Trabajo Especial de Grado.

IV.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUAL

Antes de comenzar con el análisis de las variables climatológicas y de operación, es importante puntualizar las condiciones físicas en las cuales se encuentra la torre en estos momentos, basado en la observación visual de la misma:

- Los rociadores de agua presentan taponamiento frecuente de lodos, algas y costras
- Altos niveles de agua en las piscinas superiores de la torre, con presencia de materia orgánica como algas.
- El sistema de dosificación de cloro es puntual
- El empaque de la torre presenta láminas rotas en varios sectores, lo que se traduce en presencia de caminos preferenciales (canalizaciones).

Durante la realización de las pruebas, específicamente el 16 de enero de 2008 (día 35), se realizó una limpieza en las piscinas de agua superiores.

IV.2. COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

Una vez medidos los valores de las variables operacionales de la torre de enfriamiento M-7000 se graficaron dichos valores en función del día de la medición. A continuación se muestran dichas gráficas, donde se compara la variable de operación y su valor promedio con el valor de dicha variable especificada en el diseño de la torre. En el apéndice B se muestran los valores medidos de las variables de operación (tabla B1), así como las calculadas a partir de estas mediciones (tabla

B2 y B3). En la siguiente tabla se muestran los valores promedios de dichas variables comparadas con los valores de diseño y su respectivo porcentaje de desviación.

Tabla 9. Comparación entre las variables de operación promedio y la variable de diseño

Variable	Valor de diseño	Valor de operación promedio	Porcentaje de desviación, %Desv (%)
Caudal de recirculación, L' (gpm)	62500	68500	10
Caudal de reposición, L'_{MU} (gpm)	1167	1225	4
Temperatura de agua caliente, T_{hw} (°F)	105	100,71	16
Temperatura de agua fría, T_{cw} (°F)	87	86,85	0,17
Temperatura de bulbo húmedo, T_{bh} (°F)	78	75,58	3
Salto Térmico, <i>Rango</i> (°F)	18	13,86	23
Temperatura aproximación, <i>Aprox</i> (°F)	9	11,27	25
Eficiencia de enfriamiento, η_E (%)	67	55	17

La figura 10 muestra el comportamiento del caudal de recirculación de agua a condiciones de operación (L'_p), el caudal de operación promedio ($\overline{L'_p}$) y el caudal de agua de recirculación de diseño, el cual se conoce como capacidad de la torre de diseño (L'_D).

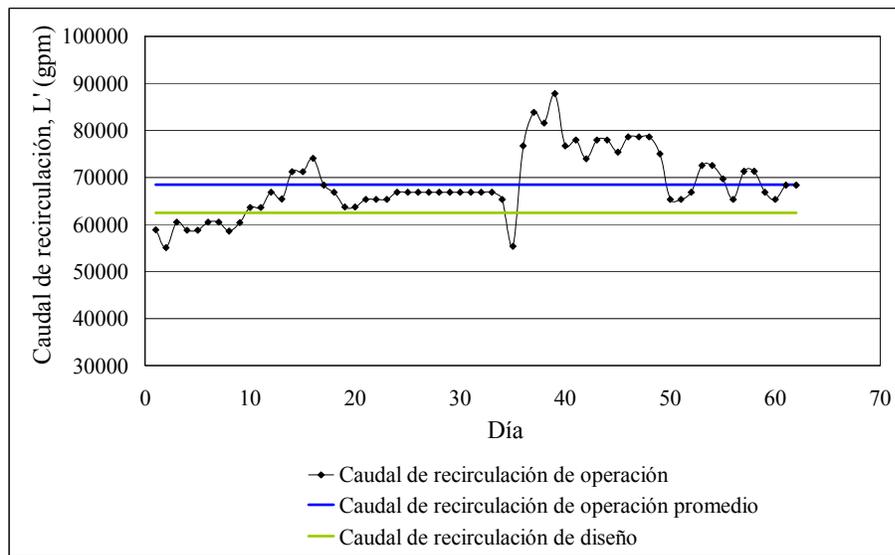


Figura 10. Variación del Caudal de Recirculación

En la figura 10 se puede observar que la torre ha operado con flujos de agua promedio mayores a los de diseño, manejando caudales de hasta 88000 gpm, un flujo 41% mayor al especificado en el diseño. La tendencia al aumento en los caudales de recirculación manejados luego del día 35 se atribuye al mantenimiento de las piscinas de agua superiores realizados en esta fecha, ya que luego de dicha limpieza, los rociadores fueron destapados y por ende la torre aumentó su capacidad.

En la figura 11 se muestra el comportamiento de la temperatura de agua caliente indicando que para la mayoría de los días de prueba, el agua está entrando a la torre a una temperatura más baja que la especificada en su diseño. En promedio, el agua entra a la torre 4°F más bajo que la temperatura de diseño.

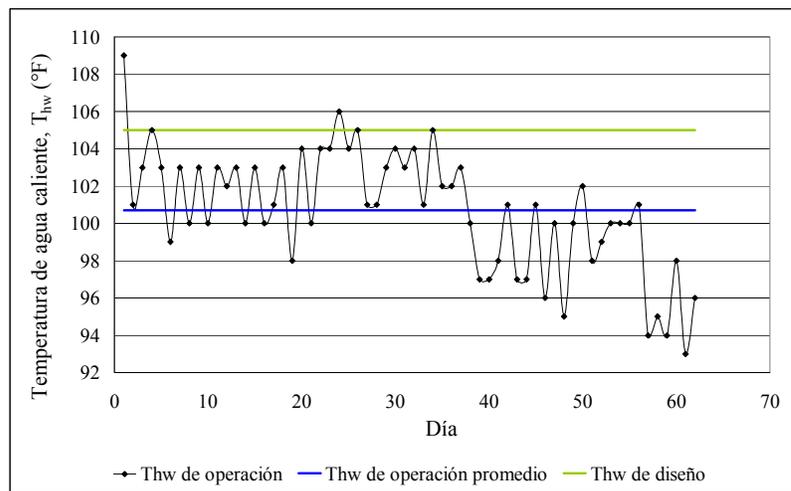


Figura 11. Variación de la temperatura del agua de entrada o agua caliente

Generalmente, una de las principales razones de la disminución de la temperatura de agua de entrada es que los equipos que utilizan esta agua como medio de enfriamiento presentan incrustaciones y por ende, la transferencia de calor hacia el agua disminuye con respecto a la especificada al momento de diseñar estos equipos. Es por esto que se realizó una inspección a los intercambiadores que utilizan agua proveniente de la torre M-7000 y se comprobó que, efectivamente, estos se encuentran afectados por incrustaciones y corrosión, donde se observó como se ve

disminuida la superficie de transferencia de calor y, por ende, el flujo de calor en sí hacia el agua de servicio. En la siguiente figura se observa lo anteriormente descrito.



Figura 12. Intercambiadores de calor afectados por incrustaciones

Con respecto a la temperatura de salida de la torre, como se observa en la figura 13, en promedio, se aproxima bastante a la temperatura de diseño, con una diferencia de menos de 1% (menos de 1°F). Sin embargo, los valores de prueba difieren considerablemente de la temperatura de agua requerida en el diseño, donde hasta el mes de enero se estaban obteniendo valores superiores a la temperatura requerida, pero luego del mantenimiento, el agua pudo ser enfriada hasta temperaturas considerablemente más bajas (hasta 79°F).

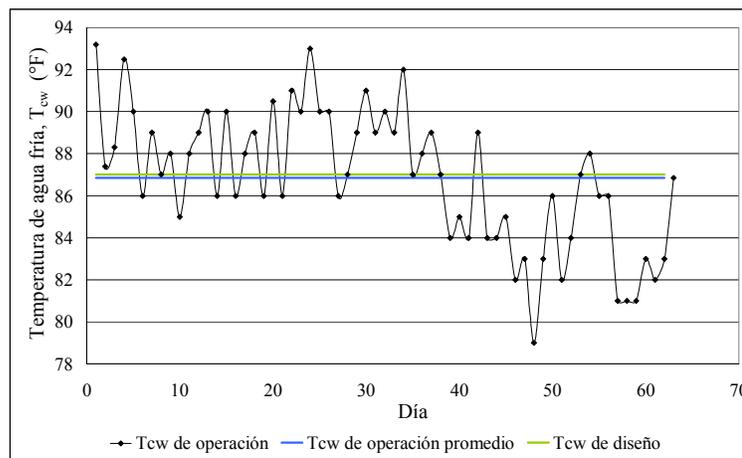


Figura 13. Variación de la temperatura del agua de salida o agua fría

Esta disminución se debió a que los rociadores, luego de la limpieza, distribuyeron el agua más uniformemente en el relleno y a través de la torre, aumentando así la superficie de contacto entre el agua y el aire y por ende mejorando el enfriamiento.

Por otra parte, en la figura 14 se muestra la variación de la temperatura de bulbo húmedo a lo largo del período de pruebas, donde se observa que la temperatura de bulbo húmedo de operación promedio es más baja que la de diseño. Esta variable es casi totalmente dependiente de las condiciones ambientales, aunque en cierta medida se ve influenciada por la recirculación de aire caliente y húmedo que pueda haber hacia la entrada de la torre. Debido a que en este caso en particular, la recirculación es poca, la temperatura de bulbo húmedo puede considerarse dependiente solo de las condiciones ambientales, y por ende, no puede ser controlada.

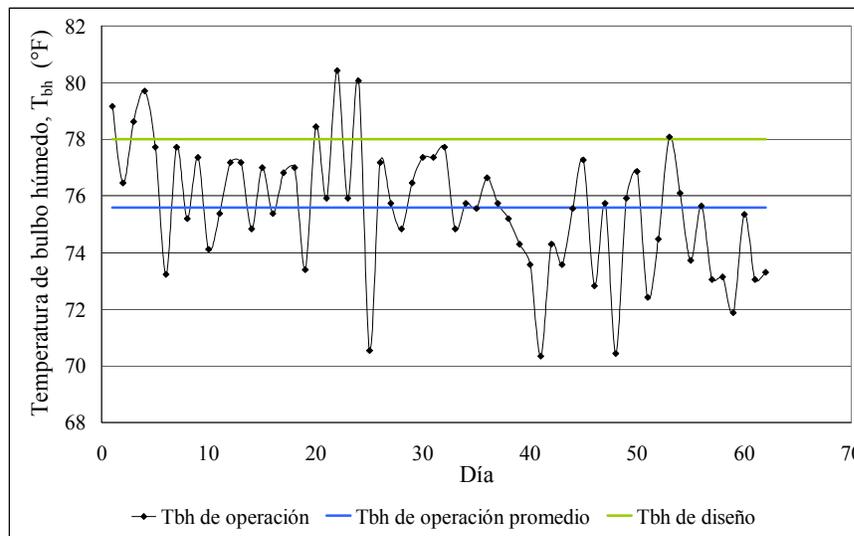


Figura 14. Variación de la temperatura de bulbo húmedo

Con respecto a lo observado en la figura 14, se puede decir que el hecho de que la temperatura de bulbo húmedo a la cual opera la torre sea más baja que la de diseño favorece la operación de la misma, ya que la fuerza impulsora que promueve la evaporación aumenta, y por ende la torre es capaz de enfriar mayores caudales de agua como se observó en la figura 10.

El hecho de que la torre opere con temperaturas de bulbo húmedo inferiores a la de diseño implica que se pueden obtener, para un flujo de agua dado, temperaturas de agua fría menores, o en su defecto, retirar mayor cantidad de calor manteniendo dicho flujo. En la figura 15 se observa el comportamiento de la temperatura de agua fría en función de la temperatura de bulbo húmedo de operación, donde se evidencia lo dicho anteriormente.

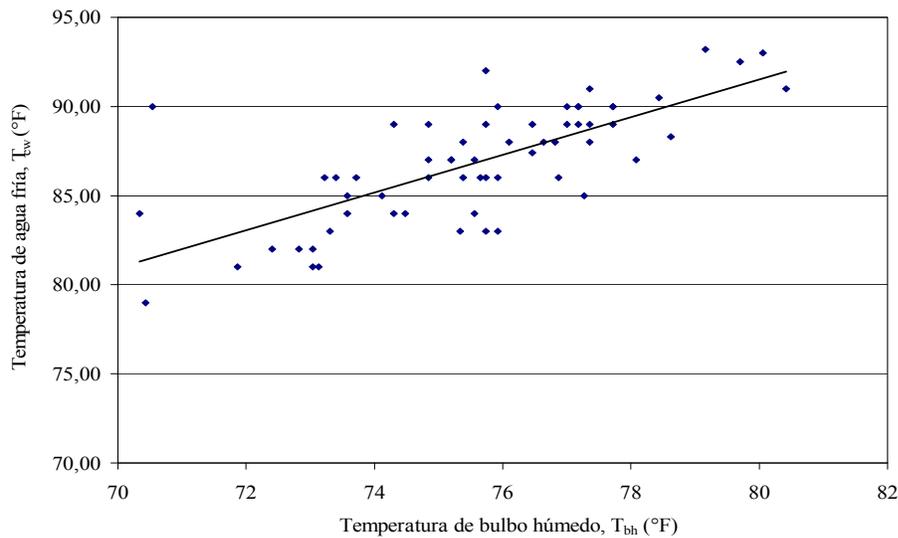


Figura 15. Comportamiento de la temperatura de salida del agua en función de la temperatura de bulbo húmedo

Con respecto al rango de enfriamiento o salto térmico de operación, éste se encuentra, para todos los días, por debajo del valor de diseño (ver figura 16), con una desviación bastante alta (23%). La disminución del rango de enfriamiento tiene un impacto negativo en la operación de la torre, ya que este valor es directamente proporcional al calor retirado del agua, es por esto que las condiciones mas desfavorables se manifiestan con temperaturas de bulbo húmedo altas y rangos de enfriamiento más bajos.

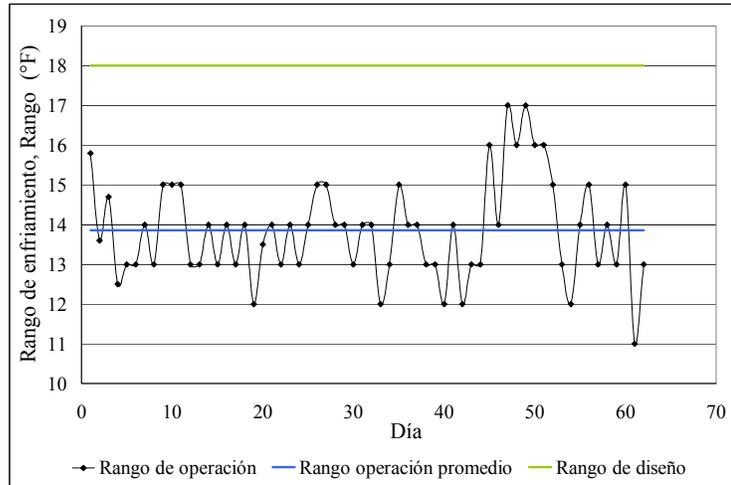


Figura 16. Variación del salto térmico o rango de enfriamiento

Por otra parte, en la figura 17 se observa que antes de realizar la limpieza de las piscinas, las temperaturas de aproximación eran mucho más altas que luego de realizar la limpieza, debido a que dicho mantenimiento favoreció la transferencia de calor desde el agua hacia el aire, lo cual se tradujo en temperaturas de agua fría mas bajas y por ende en un mayor acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo. Por otra parte, el valor promedio de operación es más de 2°F más alto que el valor de 2°F más alto que el valor de diseño, como consecuencia de los bajos rangos de enfriamiento presentados en la torre.

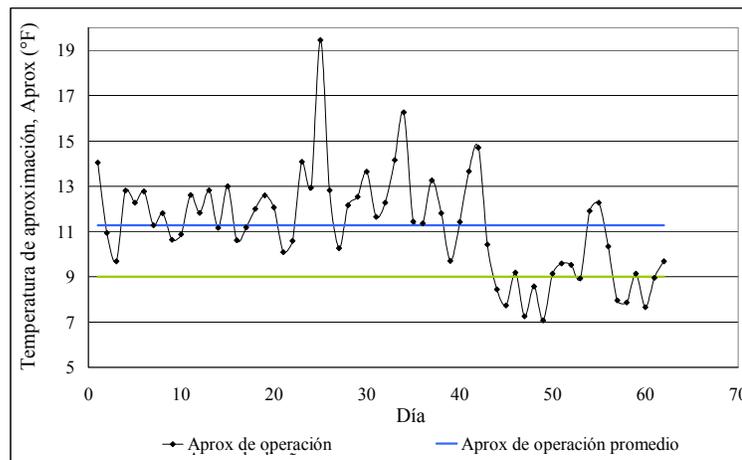


Figura 17. Variación de la temperatura de aproximación

La operación con una aproximación mayor a la establecida en el diseño implica una disminución en la fuerza motriz, y por ende disminuye la eficiencia de enfriamiento de la torre. En la figura 18 se muestra el comportamiento de la eficiencia de enfriamiento calculada para los valores de prueba y la eficiencia de enfriamiento a condiciones de diseño.

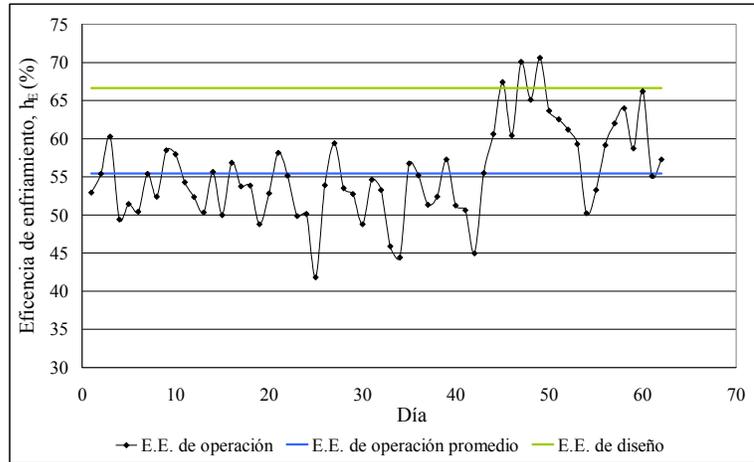


Figura 18. Variación de la eficiencia de enfriamiento

La eficiencia de enfriamiento de operación se encuentra por debajo de la eficiencia de diseño, lo cual se debe principalmente a los bajos rangos de enfriamiento. Sin embargo, luego de la limpieza de las piscinas, donde se mejoró la distribución del agua en la torre, la eficiencia de enfriamiento mejoró considerablemente. Es por esto, que el fabricante recomienda realizar mantenimiento a la torre por lo menos una vez al mes, ya que para lograr obtener una eficiencia de enfriamiento cercana a la de diseño, es necesario que todos sus componentes operen en condiciones óptimas.

Aunque el fabricante recomienda un programa de mantenimiento una vez al mes, es recomendable realizar un estudio donde, midiendo las variables operacionales a las que está sujeta la torre por un amplio período de tiempo, se determine un tiempo real en el cual las variables de operación comienzan a desviarse considerablemente de las especificaciones y así establecer un programa de mantenimiento más apegado a lo que realmente está ocurriendo en la torre.

La falta de mantenimientos continuos provoca altos niveles de agua en las piscinas superiores, ya que, al taponarse algunos rociadores, el agua se acumula creando desbordamientos hacia las piscinas de la celda que se encuentra fuera de operación, afectando negativamente la eficiencia global de la torre y, en algunos casos, el agua se desborda de estas piscinas y cae fuera de la torre ocasionando pérdidas de agua, y por ende, mayores caudales de reposición, lo cual se traduce en un aumento de los costos operacionales.

Adicionalmente, las canalizaciones contribuyen a la disminución de la eficiencia de enfriamiento de la torre, ya que el tiempo de contacto y el área de transferencia entre el aire y el agua que fluye por estos canales es menor, lo que hace que su enfriamiento disminuya, y como consecuencia, la temperatura de agua fría se incrementa.

Con respecto a la eficiencia térmica de la torre, se observa, en la figura 19, que el valor promedio está alrededor del 85%, es decir, que el calor que está siendo retirado del agua, en promedio, es 15% menor que el calor que debería ser retirado según las especificaciones de diseño. Así, las roturas en los empaques, los taponamientos de los rociadores, las canalizaciones y otros factores disminuyen tanto la eficiencia térmica como la eficiencia de enfriamiento de la torre.

Evidencia de esto es el hecho de que luego de realizar el mantenimiento, la eficiencia térmica se incrementó inclusive por encima del 100%, es decir, que la torre llegó a retirar del agua un flujo de calor mayor al de diseño, lo cual es perfectamente posible ya que el hecho de que la temperatura de bulbo húmedo de operación sea mucho mas baja que la de diseño implica que se puede enfriar una mayor caudal de agua a temperaturas tan o mas bajas, y por ende, lograr retirar una carga calórica mayor a la de diseño.

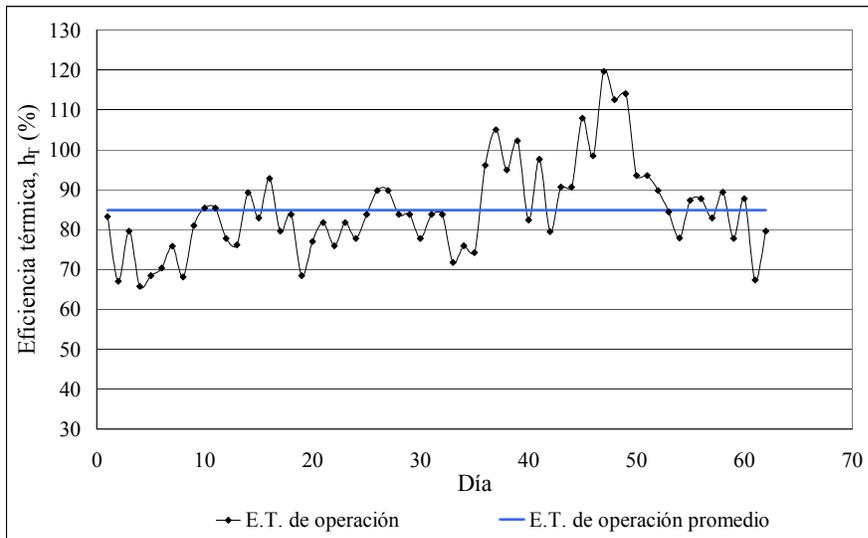


Figura 19. Variación de la eficiencia térmica

Como se puede observar, la operación eficiente de la torre depende de muchos factores, unos controlables y otros dependientes de las condiciones ambientales. Es por esto, que aunque una variable presente un comportamiento favorable para la buena operación de la torre, puede que la eficiencia de la misma no se vea directamente influenciada por dicha variable, ya que existen otros factores que a su vez hayan influido de manera negativa. Es por esto que el coeficiente característico de la torre reduce un grupo de condiciones de operación a un valor numérico, representando, como se explicó en la sección II.5.1., el grado de dificultad de enfriamiento.

De esta manera, se simplifica el estudio de la influencia de las variables de operación con respecto al coeficiente característico de la torre, donde un mayor coeficiente, representa una operación más desfavorable y viceversa. En la figura 20 se muestra el comportamiento del coeficiente característico calculado para cada prueba, en función del flujo de recirculación de agua. Los valores calculados de los coeficientes característicos para cada día de prueba se muestran en la tabla D1 del apéndice D.

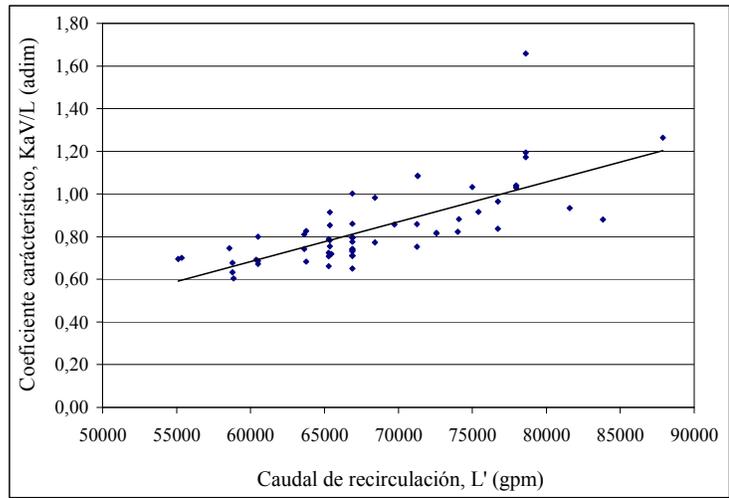


Figura 20. Variación del coeficiente característico con el caudal de recirculación

La carga térmica de una torre es la combinación del flujo de agua que recircula y el rango de enfriamiento (diferencia entre la temperatura de agua caliente y la del agua fría). Como se observa, la operación se ve favorecida con un menor flujo de agua ya que se puede enfriar el agua a una menor temperatura retirando la misma cantidad de calor.

Por otra parte, el comportamiento del coeficiente característico con la temperatura de aproximación se expone en la figura 21.

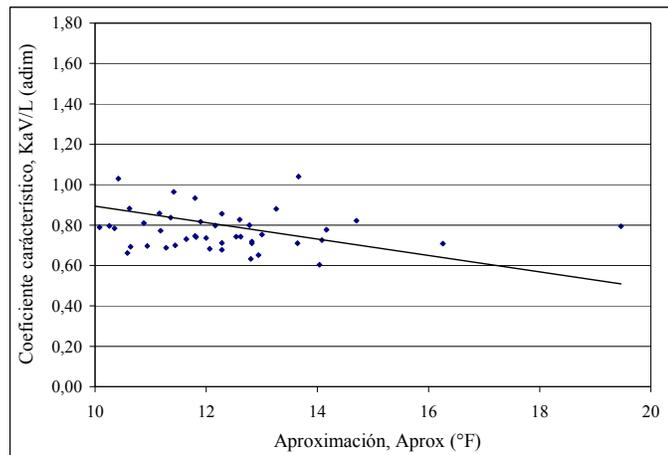


Figura 21. Variación del coeficiente característico con la temperatura de aproximación

El acercamiento o diferencial entre la temperatura de agua fría y la de bulbo húmedo también afecta en gran medida la operación de la torre. El comportamiento de la aproximación concuerda con lo esperado teóricamente, es decir, menores acercamientos reducen el potencial de enfriamiento, y por ende, aumenta la dificultad de enfriamiento.

IV.3. CURVA CARACTERÍSTICA Y CURVA DE REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Para la determinación de la capacidad térmica de la torre M-7000, se empleó el método de evaluación para el caso en donde no están disponibles ni las curvas de rendimiento ni la curva característica de la torre (ver sección II.5.2.3) según la metodología expuesta en la sección III.4.2. Esto se debe a que las curvas de la torre, tanto las de rendimiento como la característica, no estaban ajustadas de acuerdo a las modificaciones a las que fue sometida la torre anteriormente. Los cálculos tipos pertinentes se presentan en los apéndices F al H.

En primer lugar se seleccionaron los valores de prueba que cumplen con los rangos establecidos en el código CTI-ATC-105 (apéndice A) y luego se determinó el promedio aritmético de cada variable. Los valores seleccionados y sus respectivos promedios se muestran en la tabla H2 del apéndice H.

Por otra parte, se calculó la relación gas-líquido de diseño y el coeficiente característico requerido de la torre y se determinó la curva de requerimientos de diseño (figura 22). Finalmente se calculó el valor de prueba ajustado de la relación gas-líquido y su respectivo coeficiente característico, con el cual se determinó la curva de requerimientos de diseño. La ecuación de la curva característica resultó:

$$\left(\frac{KaV}{L}\right) = 1,36 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{-0,6}$$

La siguiente gráfica muestra las curvas obtenidas mediante los procedimientos de cálculo, así como los valores de la relación gas-líquido y coeficiente característico de la torre a condiciones de prueba y a condiciones actuales de diseño.

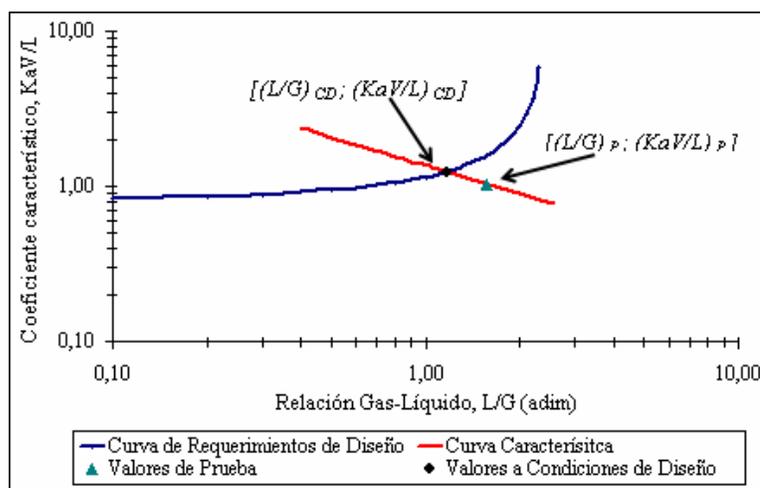


Figura 22. Curva Característica y Curva de Requerimientos de Diseño

IV.4. CAPACIDAD TÉRMICA DE LA TORRE

Los valores a condiciones de diseño o disponibles, los cuales se obtuvieron de la intersección de la curva característica con la curva de requerimientos de diseño, representan la relación de flujo agua-aire y la característica de la torre para las cuales la torre M-7000 opera a las condiciones de diseño actuales, considerando todas las modificaciones a las que se ha sometido la torre hasta el momento. En otras palabras, si la torre opera a una temperatura de bulbo húmedo, y entrada de agua iguales a las especificadas en el diseño, se necesitará de flujos de aire y agua tales que la relación L/G sea la obtenida de la intersección, para lograr enfriar el agua hasta la temperatura de salida de diseño.

Finalmente se determinó el porcentaje de capacidad térmico de la torre como la división entre $(L/G)_{CD}$ y $(L/G)_D$ y se determinó el caudal de agua que puede manejar la torre, desde el punto de vista térmico (para un flujo de aire de diseño) para obtener las condiciones de operación deseadas.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos mediante el procedimiento señalado anteriormente.

Tabla 10. Valores característicos a condiciones de prueba y diseño

	Diseño o Requerido	Prueba	Condiciones de Diseño o Disponible
Relación Gas-Líquido, L/G	1,44	1,58	1,17
Coefficiente Característico, KaV/L	1,45	1,03	1,24
Porcentaje de capacidad térmica, %C_T	82%		
Capacidad térmica actual de la torre	50900 gpm		

Estos resultados indican que la torre puede operar con un flujo máximo de agua que corresponde al 82% del flujo de diseño (equivalente a 50900 gpm para 5 celdas de operación), manteniendo las condiciones térmicas establecidas en dicho diseño.

De esta manera, pareciera que las modificaciones realizadas a la torre desfavorecieron la operación de la misma y causaron una disminución en la capacidad de enfriamiento, sin embargo, este valor no es concluyente acerca de si las modificaciones realizadas a la torre fueron perjudiciales o no, ya que aunque se seleccionaron valores de prueba cercanos a los de diseño para realizar los cálculos, esta determinación no toma en cuenta los daños sufridos en los empaques, los taponamientos en los equipos, las canalizaciones en la torre, la presencia de contaminantes fuera de especificación, entre otros factores que contribuyen a la disminución de la capacidad de la torre.

Lo que sí se puede decir de este porcentaje de capacidad, que es concluyente y determinante, es que los problemas actuales existentes en la torre, han causado efectivamente, una disminución de la capacidad térmica de la misma, y que es necesario tomar medidas tanto correctivas como preventivas para controlar las variables que están causando dichos problemas.

Así, se propone como plan correctivo, sustituir las secciones de relleno y los rociadores dañados, y realizar una limpieza profunda de todas las secciones de la

torre, y como plan preventivo implementar un mantenimiento continuo de la torre para mantener en especificación sus variables y componentes, el cual debe realizarse por lo menos una vez al mes.

Finalmente, una vez realizadas las medidas correctivas e implementadas las medidas preventivas, se podrá repetir la evaluación de la torre para determinar la máxima capacidad térmica de la misma, donde el valor obtenido representará, en efecto, la capacidad térmica de diseño tomando en cuenta las modificaciones realizadas a la torre.

IV.5. CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LA TORRE

La capacidad hidráulica de la torre se calculó conforme al procedimiento explicado en la sección III.4.3, y los cálculos tipo se muestran en el apéndice I. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 11. Capacidad hidráulica de la torre de enfriamiento M-7000

Altura de la columna de agua	z_L	10 plg
Caudal manejado por c/ rociador	L'_{cr}	81 gpm
Capacidad hidráulica de la torre	L'_H	90700 gpm
Porcentaje de Capacidad hidráulica promedio	$\%C_H$	76 %

La capacidad hidráulica indica el caudal máximo de agua que puede manejar la torre sin presentar problemas en los empaques y/o soportes. En el caso de la torre M-7000 la capacidad hidráulica calculada está dentro del rango permitido de resistencia de los empaques.

Debido a que la capacidad hidráulica depende del diámetro y del número de rociadores, se calcula suponiendo que los rociadores están totalmente limpios, es decir que las 2 plg de diámetro están disponibles para el paso del fluido, y que todos los rociadores se encuentran en operación y en óptimas condiciones. Es decir, que para una misma altura de líquido en las piscinas de agua caliente, un 100% de capacidad solo se podrá obtener con la totalidad de los rociadores operando sin

ningún obstáculo, taponamiento o reducción del diámetro por incrustaciones, presencia de algas, entre otros.

Por esta razón, se observa que la torre opera a un porcentaje de capacidad promedio de 76%, ya que como se mencionó anteriormente, se presentaron taponamientos de los rociadores debido a presencia de materia orgánica en las piscinas de agua caliente, lo cual impide que el caudal manejado por dichos rociadores sea igual al especificado en el diseño o lo que es igual, igual a la capacidad hidráulica.

La siguiente figura muestra el comportamiento del porcentaje de capacidad hidráulico para el período de mediciones.

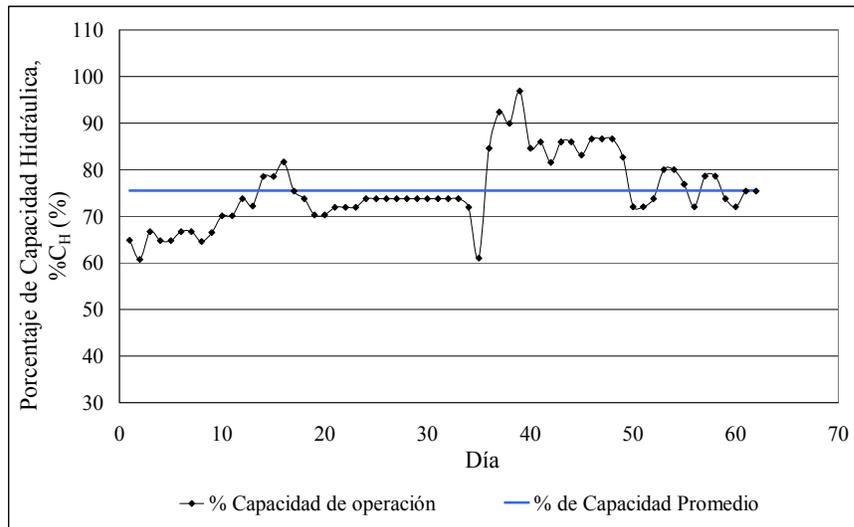


Figura 23. Porcentaje de Capacidad Hidráulica

Según se observa en la figura, la torre opera con porcentajes de capacidad de hasta 97%, esto se a dos razones:

1. Los mayores porcentajes de capacidad hidráulica se observaron luego de la limpieza de las piscinas donde los rociadores aumentaron su capacidad, aumentando con esto la capacidad hidráulica global de la torre.

2. En los puntos de descarga de las tuberías de retorno de agua de enfriamiento hacia las piscinas superiores se genera una sobrepresión en la columna de agua, es decir, se presentaron valores de altura de la columna de líquido en las piscinas superiores a la altura de diseño (10 plg), lo cual ocasionó que los rociadores manejaran un caudal mucho más alto que el especificado para las condiciones hidráulicas de diseño (81 gpm), aumentando en porcentaje de capacidad.

Esto último, lejos de ser una ventaja representa un problema, ya que en rociadores parcialmente obstruidos, lo cual se traduce en un menor diámetro, un caudal de agua tan alto representa una mala distribución de agua a través del relleno. Esto contribuye a la presencia de canalizaciones que además de disminuir el área y tiempo de contacto entre el agua y el aire, causan que el relleno sufra un impacto más fuerte debido a que el agua choca contra éste a una mayor velocidad, provocando la rotura del mismo. Por esto es recomendable realizar un chequeo del sistema de descarga de agua a las piscinas superiores.

IV.6. CAUDAL DE REPOSICIÓN

En las bases aplicadas para la evaluación (ver sección III.3) se especifica, que el cliente requiere que los ciclos de concentración de la torre deben ser siete, debido a que actualmente se está retirando un caudal de purga muy alto para mantener los sólidos dentro del rango de especificación. Debido a que los ciclos de concentración de diseño originales eran de 4, se requirió recalcular el caudal de reposición necesario para operar la torre a 7 ciclos de concentración. En la figura 24 se presentan los valores calculados de reposición de agua día a día y su respectivo promedio, comparando estos valores con el caudal de diseño y con el caudal de operación actual.

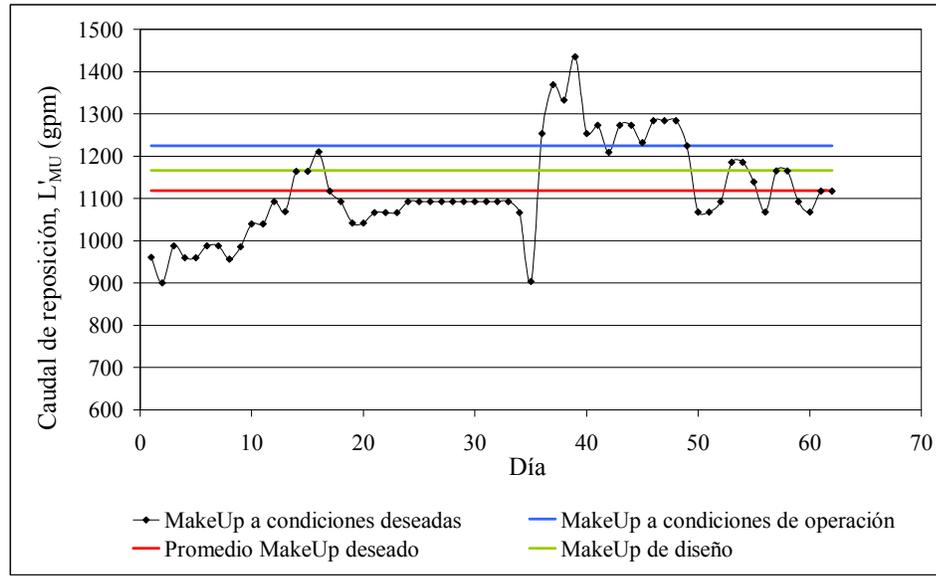


Figura 24. Caudal de reposición

Nótese que el caudal de reposición de operación actual es un valor fijo y no se está agregando a la torre basada en el balance de las pérdidas con respecto a los caudales de operación. Lo ideal, es controlar el make-up de la torre mediante una válvula de control, dependiendo del caudal de agua de recirculación que maneje la torre en ese momento, para que el valor fijo sean los ciclos de concentración. Así se garantiza que la reposición no sea mayor ni menor de lo necesario para mantener las concentraciones de contaminantes en especificación. Es por esto que se recomienda instalar un control de flujo de make-up mediante la instalación de un sistema de control cuyo elemento final sea una válvula colocada en la tubería de entrada de agua fresca a la torre.

Con lo explicado anteriormente, entonces fue necesario calcular los caudales de reposición por día de operación, como se muestra en la figura. Nótese entre los tres valores de caudales (diseño, operación y requerido), el caudal de operación es el más alto, es decir, se está agregando actualmente más cantidad de agua fresca que la especificada en el diseño y que la requerida. Por el contrario, el valor promedio de agua de reposición requerido es el mas bajo de los tres valores, lo cual es favorable a

la operación de la torre si lo que se busca es reducir la cantidad de agua que es necesario agregar, como es el caso, para así reducir los costos que implica el la obtención y el transporte de dicha agua.

La reducción del caudal de reposición tiene una relación inversa con los ciclos de concentración, es por esto que el make-up requerido es el menor valor ya que está relacionado con 7 ciclos de concentración mientras que el valor de diseño fue calculado a 4 ciclos de concentración y los valores de prueba presentan valores de hasta 3 ciclos de concentración.

Sin embargo, el hecho de aumentar los ciclos y reducir el caudal de reposición implica un caudal de purga menor, lo cual a su vez se traduce en una mayor acumulación de contaminantes en el sistema. Es por esto que es necesario ajustar las dosis de químicos añadidos para reducir o eliminar las concentraciones de dichas impurezas. En la siguiente sección se estudia el ajuste en la dosificación de químicos.

IV.7. EFECTO DE LOS CONTAMINANTES DEL AGUA Y CONTROL DE IMPUREZAS DE LA TORRE.

Al momento de diseñar la torre, se tenía una fuente de agua cruda con una cierta cantidad y tipo de contaminantes, y los cálculos de las cantidades de químicos que debían ser añadidos a la torre para controlar la deposición, crecimiento bacteriano, incrustaciones y/o corrosión se realizaron para estas condiciones. Sin embargo, esta fuente fue sustituida por otra proveniente de un río adyacente a la refinería, y por tanto, la composición del agua de reposición cambió. Es por esto que fue necesario realizar un estudio al sistema de dosificación de químicos para ajustarla a las condiciones actuales del agua. Los cálculos tipos para el ajuste en la dosificación de químicos se encuentran los apéndices L al O.

En la siguiente tabla se muestran las cantidades actuales y tipo de químico que son agregadas actualmente a la torre y la manera en que dichos químicos son dosificados.

Tabla 12. Dosificación actual de químicos

Compuesto	Tipo de Control	Dosificación actual	Tipo de dosificación
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	pH y alcalinidad	70 gal/día	Continua
Cloro (Cl ₂)	Control microbiológico	746 gal/día	Puntual
Multifuncional XLP-3252	Incrustaciones, deposición y corrosión	15 gal/día	Continua

IV.7.1. Ciclos de concentración por contaminante

Debido a que los ciclos de concentración especificados por la refinería fueron 7, el ajuste fue hecho en base a que cualquier impureza cuyos ciclos de concentración calculados fueran menores que este valor, requerían de tratamiento químico. Así, se calcularon los ciclos de concentración por contaminantes como la división de entre la concentración máxima de cada impureza (ve tabla 4 de la sección II.6.3) entre la concentración de dicha impureza en el agua de reposición. En la siguiente tabla se muestra la composición actual del agua de reposición (proveniente del río adyacente), la composición máxima permitida (proveniente de la tabla 4) y los ciclos de concentración de contaminantes obtenidos.

Tabla 13. Ciclos de concentración por cada contaminante

Impureza	Concentración		Ciclos
	Agua de reposición	Máxima permitida	
Cloruros, ppm	21	1000	47,62
Cobre, ppm	0	0,2	∞
Hierro, ppm	0,25	5	20,00
Zinc, ppm	0	1	∞
Sílice, ppm	10	150	15,00
Sulfato de sodio, ppm	176	500	2,84
Sólidos Totales, ppm	400	3200	8,00
Sólidos disueltos, ppm	350	3000	8,57
Sólidos Suspendidos, ppm	20	200	10,00
Dureza Total, ppm	143	1500	10,49
Dureza Cálcica, ppm	175	1300	7,46
Dureza Magnésica, ppm	33	300	9,09
Alcalinidad Total, ppm	150	600	4,00
pH	8,2	6,5 - 9	-

Según la tabla 13, todas las impurezas presentes en el agua de reposición se encuentran dentro de los límites permitidos, excepto el sulfato de sodio y la alcalinidad total. Esto es, son los únicos dos parámetros cuyos ciclos de concentración son menores que 7 y por tanto requieren de tratamiento químico para disminuir su concentración y llevar los ciclos al valor mínimo requerido.

IV.7.2. Tendencia del agua de reposición

El valor obtenido del **índice de saturación de Langelier** fue de **1,2** y el **índice de estabilidad de Ryznar** de **5,8**. Ambos valores indican que el agua de reposición tiene una tendencia incrustante, es decir que lo más probable es que se presenten deposiciones e incrustaciones.

Esto es lógico si se revisa la tabla 13, ya que se muestra que la concentración de alcalinidad se encuentra por encima de los valores permitidos, y la alcalinidad junto con la dureza cálcica es una de las principales causantes de la formación de incrustaciones. Además, aunque los ciclos de concentración por dureza cálcica se encuentran por encima del mínimo permitido, su valor es bastante cercano al límite, lo cual es un indicativo de que también podría contribuir a la formación de incrustaciones.

Estos índices reforzaron, entonces, la necesidad de ajustar el tratamiento químico para el control de la alcalinidad, y la necesidad de mantener la dosificación del multifuncional XLP-3252 para el control de incrustaciones.

IV.7.2. Dosificación de ácido sulfúrico

Como se pudo observar en la tabla 12, el químico añadido para el control de la alcalinidad fue el ácido sulfúrico. Mediante la metodología explicada en el paso 1 de la sección III.4.7, se calculó el nuevo caudal de ácido sulfúrico que debe agregarse a

la torre para mantener la alcalinidad en el valor deseado (los cálculos tipos se desarrollan en el apéndice M). En la siguiente tabla se muestra el valor promedio de dosificación de ácido sulfúrico calculado en base al caudal de reposición requerido. Los valores calculados de caudal de ácido por día se encuentran en la tabla M1 del apéndice M.

Tabla 14. Dosificación ácido sulfúrico

Compuesto	Actual	Requerida
Caudal de H_2SO_4 , $L'_{H_2SO_4}$ (gal/día)	30	58,8
Concentración de alcalinidad, C_{alk} (ppm)	150	85,7
Ciclos de concentración de alcalinidad, $Ciclos_{alk}$	4	7
Porcentaje de desviación, $\%Desv_{H_2SO_4}$ (%)	49%	

Estos valores indican que la dosificación de ácido sulfúrico a la torre es actualmente menor a la requerida para mantener controlada la alcalinidad, específicamente se añadía 49% menos de ácido. Este factor es el causante de la elevada deposición de carbonatos y bicarbonatos en los equipos de proceso (ver figura 10), ya que la inadecuada dosificación de ácido hizo que se tuviese una concentración de sales mayor al límite de solubilidad de las mismas y por ende, se produjo precipitación y posterior formación de escalas.

IV.7.3. Dosificación de cloro

El cloro se utiliza para controlar el crecimiento microbiológico, el cual, en este caso en particular, y a las condiciones de operación actuales, se presenta sólo a consecuencia de la elevada concentración de sulfato de sodio, cuyos ciclos de concentración actuales se encuentran en menos de 3. Por esto se realizó el ajuste en la dosificación de cloro conforme a la metodología propuesta en el paso 3 de la sección III.4.7.

En la siguiente tabla se muestra el valor promedio de dosificación de cloro calculado en base al caudal de reposición requerido, para garantizar 1 ppm de cloro libre. Los valores calculados de caudal de ácido por día se encuentran en la tabla N1 del apéndice N.

Tabla 15. Dosificación cloro

Compuesto	Actual	Requerida
Caudal de Cl_2 , L'_{Cl} (gal/día)	746	372
Concentración de Sulfato de sodio, $C_{Na_2SO_4}$ (ppm)	176	71,4
Ciclos de concentración de sulfato, $Ciclos_{Na_2SO_4}$	3	7
Porcentaje de desviación, %Desv $_{Cl}$ (%)	102%	

Como se observa en la tabla anterior, se está sobredosificando una gran cantidad de cloro a la torre (102% más de lo requerido). Esto se debe a que la fuente de la cual se tomaba el agua de reposición tenía un alto contenido de hierro ferroso, causante de crecimiento microbiológico, y era necesario agregar una mayor cantidad de cloro.

Sin embargo, existe actualmente presencia de algas y hongos en las piscinas de agua caliente que están obstruyendo el paso del fluido hacia la torre, lo cual no debería suceder si como se determinó, se está agregando más cloro del realmente requerido.

Este hecho podría indicar que existe una fuga de hidrocarburos en alguna de las unidades de proceso, ya que, en presencia de hidrocarburos ácidos y/o de sulfuros, el cloro pierde su poder oxidante, ya que no se produce su disociación, ocurriendo más rápidamente la reacción del cloro con el hidrocarburo y/o con el sulfuro, lo cual provoca el crecimiento descontrolado de la materia orgánica ocasionando el bioensuciamiento del sistema.

Debe entonces, realizarse una revisión de los intercambiadores de calor y otras unidades que utilizan agua proveniente de la torre M-7000 para verificar si en efecto existe una fuga de hidrocarburos ácidos que puedan estar causando el crecimiento

microbiano en la torre, para posteriormente tomar las medidas de contingencia necesarias, dentro de las cuales podría estar, aumentar el flujo de purga temporalmente para eliminar el hidrocarburo presente en el agua.

Finalmente, debe cambiarse el sistema de dosificación de cloro de puntual a continuo, como especifica la Refinería en sus bases de la evaluación, ya que esto puede ser otra causa por lo cual se presenta crecimiento bacteriano, en los períodos donde no se está inyectando cloro.

IV.7.4. Dosificación del multifuncional XLP-3252

El cálculo de este valor se realizó sólo para tener una idea de cuanto caudal podría necesitarse de dicho componente para el control de incrustaciones, corrosión y deposición. Por ser este un compuesto formulado, la empresa productora es la responsable de determinar la dosificación exacta de dicho químico para las condiciones deseadas, ya que solo ellos saben la manera, concentración y composición apropiada.

El cálculo con intenciones meramente comparativas se realizó basado en mantener 100 wppm de producto en el agua de recirculación, tal como se explicó en la sección II.6.4 del marco teórico, utilizando la metodología planteada en el paso 2 de la sección III.4.7. Así, el valor promedio obtenido fue de **2,44 gal/día**, es decir, 12,66 gal/día menos que lo especificado por el fabricante del producto.

Si, la concentración de químico real se encuentra cercana a los 100 wppm, entonces se puede decir que actualmente existe una sobredosificación del producto, y es por esto que se recomienda contratar los servicios del fabricante para ajustar el caudal del multifuncional a las condiciones deseadas.

Finalmente, con respecto al control de impurezas con tratamiento químico de la torre M-7000, se puede decir que depende en gran medida no solo de la composición del

agua de reposición, sino de la contaminación del agua de recirculación por fuga en los procesos. Por ejemplo, es común en la torre M-7000 que exista contaminación con hidrocarburos provenientes de fugas en las Unidades de Crudo, y estos contaminantes contribuyen también a la formación de incrustaciones, corrosión y deposición.

Es por esto que debe realizarse una revisión periódica de la composición del agua de recirculación y de los equipos de proceso involucrados con la torre, para determinar la presencia de contaminantes adicionales causantes de problemas no solo en dicha torre sino también en los equipos. Así, luego de la revisión, podrá ajustarse el flujo de químicos a los requerimientos de la torre para ese momento.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 CONCLUSIONES

- Las variables de operación mejoraron luego del mantenimiento de la torre, lo que indica que la capacidad de enfriamiento de la torre M-7000 se ve favorecida con un mantenimiento adecuado.
- La temperatura del agua de entrada a la torre es menor a la especificada en su diseño debido a la disminución de la transferencia de calor en las unidades de proceso por presencia de incrustaciones en dichos equipos.
- La disminución de la temperatura de bulbo húmedo favorece la capacidad de enfriamiento de la torre disminuyendo la temperatura de agua de salida.
- Dado que la torre M-7000 tiene una capacidad térmica actual de 81% comparada con las condiciones de diseño, actualmente se ha estado sobreutilizando con caudales de agua hasta de 88000 gpm, afectando negativamente la eficiencia térmica y de enfriamiento.
- La eficiencia de enfriamiento de operación es menor a la de diseño debido a la obstrucción causada por algas y lodos y a las canalizaciones y ruptura de los empaques.
- El coeficiente característico de prueba aumenta con el aumento del flujo de agua y la disminución de la aproximación lo cual provoca un incremento de la dificultad de enfriamiento.
- El sistema de enfriamiento de la torre M-7000 tiene capacidad para manejar un caudal de recirculación por el orden de los 90700 gpm, operando con 5 celdas,

garantizando una condición de operación confiable desde el punto de vista hidráulico.

- Se está agregando a la torre un caudal de agua de reposición mayor al realmente requerido para mantener los ciclos de concentración en 7.
- El agua cruda utilizada como make-up, tiene propiedades incrustantes debido al alto índice de alcalinidad de la misma.
- Las concentraciones de impurezas presentes en el agua de reposición no representan un problema de operación para 7 ciclos de concentración, excepto por el sulfato de sodio y la alcalinidad cuyos valores son mayores de los recomendados.
- La dosificación actual de ácido sulfúrico es 49% menor que la requerida para mantener la alcalinidad en la concentración deseada lo cual es causante de la formación de incrustaciones en los equipos de proceso.
- La dosificación de cloro es 102% mayor que la requerida para evitar el crecimiento microbiológico lo cual se traduce en pérdidas innecesarias de producto.
- El multifuncional aplicado para control de corrosión e incrustaciones presenta un valor mucho mayor al calculado, por lo que debe ser revisado por el proveedor de dicho químico.

V.2 RECOMENDACIONES

- Poner en práctica un programa de mantenimiento continuo de las piscinas superiores (agua de retorno) de la torre M-7000 con el fin de mantener una alta eficiencia en dicha torre.
- Sustituir los empaques del relleno que se encuentren rotos o resquebrajados para evitar las canalizaciones y secciones secas.
- Realizar mediciones de campo de todas las variables climatológicas y de operación de la torre inmediatamente después del mantenimiento y sustitución de los empaques de la misma para determinar la relación gas-líquido y el coeficiente característico de la torre a condiciones operacionales lo más cercanamente posible a las condiciones de diseño y para determinar el intervalo de tiempo óptimo de mantenimiento.
- Instalar un sistema de control de purga e inyección de agua de reposición para garantizar 7 ciclos de concentración, cualquiera que sea el caudal de recirculación.
- Instalar un sistema de dosificación de cloro continuo que permita la distribución uniforme de este último en el agua a ser recirculada, para mejorar la efectividad biocida del mismo.
- Realizar una revisión a las unidades de proceso asociadas a la torre para determinar si existen fugas, y si es así, repararla y aumentar el caudal de purga de la torre momentáneamente para eliminar los contaminantes asociados a la fuga.
- Realizar un análisis periódico del agua de recirculación para ajustar la dosificación de químicos según los cambios en la composición de impurezas que presente dicha agua debido a fugas en los equipos y así mantener estos valores en especificación.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AERSTIN, F. y Street, G. (1978). **Applied Chemical Process Design**. New York, U.S.A.: Plenum Press. 293 p.
- BAKER, D. y Shryock, H. (s.f.). **A Comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance**. The Marley Company Technical Bulletin, 61, 1-12.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1988. **Water Cooling Tower, Part 2 Methods for performance testing**. British Standards, 4485, part 2, 1-35.
- CUEVAS, K. (2003). **Desarrollo de un software para el diseño y evaluación de torres de enfriamiento**. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- DAEIL AQUA CO., LTD. (s.f.). **Cooling Tower Thermal Design Manual**. Recuperado el 20 de mayo de 2008 en <http://myhome.hanafos.com/~criok/english/publication/thermal/thermallisteng.htm>.
- EXXON MOBIL RESEARCH & ENGINEERING CO., (2000). **Cooling water systems**. Exxon Mobil Design Practices, sección XXVII, 1-48.
- GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION. (1994). **Cooling Towers**. GPSA Electronic Engineering Databook. Volúmen 1. 11, 16 pp.
- ISIDRO, A. (2006). **Elaboración de un plan de mantenimiento y evaluación del sistema de la Torre de Enfriamiento del edificio sede de PDVSA Puerto la Cruz**. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

- MOBLEY, K. (2001). **Plant Engineering's Handbook**. Tennessee, U.S.A.: Butterworth-Heinemann. 1190 p.
- OLIVEROS, J. (s.f.). **Agua de Enfriamiento, Manual Técnico**. Illinois, U.S.A.: Nalco Chemical Company.
- PERRY, R. y Green, D. (1999). **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7ma ed. New York, U.S.A.: McGraw-Hill.
- SPX COOLING TECHNOLOGIES. (1986). **Cooling Towers Performance**. Cooling Tower Information Index, 1, 1-4.
- SPX COOLING TECHNOLOGIES. (2006). **Cooling Towers Fundamentals** (2^{da} ed.). Kansas, USA: The Marley Cooling Towers Company.
- STANFORD, H. (2003). **HVAC Water Chillers and Cooling Towers. Fundamentals, Application and Operation**. New York, U.S.A.: Marcel Dekker, Inc. 309 p.
- TREYBAL, R. (2000). **Operaciones de transferencia de masa**, 2da ed. Madrid, España: McGraw-Hill. 858 p.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA (2000). **Torres de Enfriamiento de Tiro Forzado**. Córdoba, España: Dpto. Aeronáutica.

CAPÍTULO VII

APÉNDICES

APÉNDICE A. Estándares del Cooling Tower Institute para la realización de pruebas de campo a Torres de enfriamiento para determinación de capacidades térmicas. Código CTI-ATC-105 (Standford, 2003).

Dentro de los estándares del CTI, el código ATC-105 es el que se aplica para realizar los ensayos para la determinación de las capacidades térmicas y las pruebas de aceptación.

Los valores de los siguientes parámetros, no deberán variar respecto de las condiciones de diseño, por encima de:

- Temperatura de bulbo seco: ± 2.5 °C
- Temperatura de bulbo húmedo: ± 1.5 °C
- Rango de enfriamiento: ± 20 %
- Caudal de agua: ± 10 %
- Presión barométrica: $\pm 3,385$ kPa (± 1 mm Hg)

APÉNDICE B. Seguimiento de las variables climatológicas y de operación de la torre de enfriamiento M-7000

Tabla B1. Variables climatológicas y de operación

Fecha	DÍA	TEMPERATURA (°F)				FLUJO (gpm)	
		Bulbo seco, T _{bs}	Bulbo Húmedo, T _{bh}	Agua Fría, T _{cw}	Agua Caliente, T _{hw}	Agua, L'	Reposición, L' _{MU}
20/11/2007	1	84,20	79,16	93,20	109,00	58855,00	1225
21/11/2007	2	80,42	76,46	87,40	101,00	55121,00	1225
21/11/2007	3	85,46	78,62	88,30	103,00	60514,00	1225
23/11/2007	4	86,36	79,70	92,50	105,00	58787,00	1225
24/11/2007	5	86,36	77,72	90,00	103,00	58787,00	1225
27/11/2007	6	78,80	73,22	86,00	99,00	60514,00	1225
28/11/2007	7	86,72	77,72	89,00	103,00	60514,00	1225
04/12/2007	8	82,22	75,20	87,00	100,00	58584,00	1225
04/12/2007	9	85,64	77,36	88,00	103,00	60378,00	1225
05/12/2007	10	80,24	74,12	85,00	100,00	63627,00	1225
05/12/2007	11	84,92	75,38	88,00	103,00	63627,00	1225
07/12/2007	12	85,46	77,18	89,00	102,00	66876,00	1225
08/12/2007	13	85,82	77,18	90,00	103,00	65465,00	1225
11/12/2007	14	82,58	74,84	86,00	100,00	71241,00	1225
11/12/2007	15	86,54	77,00	90,00	103,00	71241,00	1225
12/12/2007	16	76,46	75,38	86,00	100,00	74084,00	1225
12/12/2007	17	85,82	76,82	88,00	101,00	68399,00	1225
14/12/2007	18	86,18	77,00	89,00	103,00	66876,00	1225
18/12/2007	19	80,42	73,40	86,00	98,00	63763,00	1225
18/12/2007	20	85,82	78,44	90,50	104,00	63763,00	1225
19/12/2007	21	79,52	75,92	86,00	100,00	65286,00	1225
19/12/2007	22	87,08	80,42	91,00	104,00	65286,00	1225
21/12/2007	23	85,82	75,92	90,00	104,00	65286,00	1225
22/12/2007	24	86,90	80,06	93,00	106,00	66876,00	1225
26/12/2007	25	87,44	70,54	90,00	104,00	66876,00	1225
27/12/2007	26	86,36	77,18	90,00	105,00	66876,00	1225
02/01/2008	27	81,68	75,74	86,00	101,00	66876,00	1225
03/01/2008	28	85,28	74,84	87,00	101,00	66876,00	1225
04/01/2008	29	85,82	76,46	89,00	103,00	66876,00	1225
05/01/2008	30	85,28	77,36	91,00	104,00	66876,00	1225
08/01/2008	31	84,74	77,36	89,00	103,00	66876,00	1225
09/01/2008	32	85,46	77,72	90,00	104,00	66876,00	1225
11/01/2008	33	88,34	74,84	89,00	101,00	66876,00	1225
12/01/2008	34	84,56	75,74	92,00	105,00	65286,00	1225
16/01/2008	35	84,95	75,56	87,00	102,00	55335,00	1225
19/01/2008	36	84,56	76,64	88,00	102,00	76723,00	1225

Tabla B1. Variables climatológicas y de operación (cont.)

Fecha	DÍA	TEMPERATURA (°F)				FLUJO (gpm)	
		Bulbo seco, T_{bs}	Bulbo Húmedo, T_{bh}	Agua Fría, T_{cw}	Agua Caliente, T_{hw}	Agua, L'	Reposición, L' _{MU}
22/01/2008	37	85,28	75,74	89,00	103,00	83826,00	1225
23/01/2008	38	83,84	75,20	87,00	100,00	81594,00	1225
25/01/2008	39	83,66	74,30	84,00	97,00	87883,00	1225
26/01/2008	40	83,48	73,58	85,00	97,00	76723,00	1225
29/01/2008	41	75,74	70,34	84,00	98,00	77974,00	1225
29/01/2008	42	84,02	74,30	89,00	101,00	74016,00	1225
30/01/2008	43	78,26	73,58	84,00	97,00	77974,00	1225
30/01/2008	44	84,56	75,56	84,00	97,00	77974,00	1225
01/02/2008	45	84,47	77,27	85,00	101,00	75403,00	1225
05/02/2008	46	79,07	72,82	82,00	96,00	78609,00	1225
05/02/2008	47	84,65	75,74	83,00	100,00	78609,00	1225
06/02/2008	48	75,47	70,43	79,00	95,00	78609,00	1225
06/02/2008	49	79,70	75,92	83,00	100,00	74996,00	1225
08/02/2008	50	83,62	76,87	86,00	102,00	65353,00	1225
12/02/2008	51	77,09	72,41	82,00	98,00	65353,00	1225
13/02/2008	52	78,71	74,48	84,00	99,00	66876,00	1225
15/02/2008	53	86,90	78,08	87,00	100,00	72561,00	1225
16/02/2008	54	85,55	76,10	88,00	100,00	72561,00	1225
19/02/2008	55	81,10	73,72	86,00	100,00	69719,00	1225
22/02/2008	56	86,54	75,65	86,00	101,00	65353,00	1225
26/02/2008	57	88,43	73,04	81,00	94,00	71309,00	1225
26/02/2008	58	85,87	73,13	81,00	95,00	71309,00	1225
27/02/2008	59	78,71	71,87	81,00	94,00	66876,00	1225
27/02/2008	60	86,99	75,34	83,00	98,00	65353,00	1225
01/03/2008	61	85,28	73,04	82,00	93,00	68399,00	1225
04/03/2008	62	79,66	73,31	83,00	96,00	68399,00	1225
Promedio		86,85	75,58	86,85	100,71	68493,37	1225

Tabla B2. Rango y Temperatura de aproximación calculados

Fecha	DÍA	Temperatura de Aproximación, Aprox (°F)	Salto térmico, Rango (°F)
20/11/2007	1	14,04	15,80
21/11/2007	2	10,94	13,60
21/11/2007	3	9,68	14,70
23/11/2007	4	12,80	12,50
24/11/2007	5	12,28	13,00
27/11/2007	6	12,78	13,00
28/11/2007	7	11,28	14,00
04/12/2007	8	11,80	13,00
04/12/2007	9	10,64	15,00
05/12/2007	10	10,88	15,00
05/12/2007	11	12,62	15,00
07/12/2007	12	11,82	13,00
08/12/2007	13	12,82	13,00
11/12/2007	14	11,16	14,00
11/12/2007	15	13,00	13,00
12/12/2007	16	10,62	14,00
12/12/2007	17	11,18	13,00
14/12/2007	18	12,00	14,00
18/12/2007	19	12,60	12,00
18/12/2007	20	12,06	13,50
19/12/2007	21	10,08	14,00
19/12/2007	22	10,58	13,00
21/12/2007	23	14,08	14,00
22/12/2007	24	12,94	13,00
26/12/2007	25	19,46	14,00
27/12/2007	26	12,82	15,00
02/01/2008	27	10,26	15,00
03/01/2008	28	12,16	14,00
04/01/2008	29	12,54	14,00
05/01/2008	30	13,64	13,00
08/01/2008	31	11,64	14,00
09/01/2008	32	12,28	14,00
11/01/2008	33	14,16	12,00
12/01/2008	34	16,26	13,00
16/01/2008	35	11,44	15,00
19/01/2008	36	11,36	14,00
22/01/2008	37	13,26	14,00
23/01/2008	38	11,80	13,00
25/01/2008	39	9,70	13,00
26/01/2008	40	11,42	12,00
29/01/2008	41	13,66	14,00

Tabla B2. Rango y Temperatura de aproximación calculados (cont.)

Fecha	DÍA	Temperatura de Aproximación, Aprox (°F)	Salto térmico, Rango (°F)
29/01/2008	42	14,70	12,00
30/01/2008	43	10,42	13,00
30/01/2008	44	8,44	13,00
01/02/2008	45	7,73	16,00
05/02/2008	46	9,18	14,00
05/02/2008	47	7,26	17,00
06/02/2008	48	8,57	16,00
06/02/2008	49	7,08	17,00
08/02/2008	50	9,13	16,00
12/02/2008	51	9,59	16,00
13/02/2008	52	9,52	15,00
15/02/2008	53	8,92	13,00
16/02/2008	54	11,90	12,00
19/02/2008	55	12,28	14,00
22/02/2008	56	10,35	15,00
26/02/2008	57	7,96	13,00
26/02/2008	58	7,87	14,00
27/02/2008	59	9,13	13,00
27/02/2008	60	7,66	15,00
01/03/2008	61	8,96	11,00
04/03/2008	62	9,69	13,00
Promedio		11,27	13,86

Tabla B3. Eficiencia de enfriamiento y eficiencia térmica calculadas

Fecha	DÍA	Eficiencia de enfriamiento, η_E (%)	Eficiencia Térmica, η_T (%)
20/11/2007	1	52,95	83,18
21/11/2007	2	55,42	67,06
21/11/2007	3	60,30	79,57
23/11/2007	4	49,41	65,73
24/11/2007	5	51,42	68,36
27/11/2007	6	50,43	70,37
28/11/2007	7	55,38	75,78
04/12/2007	8	52,42	68,13
04/12/2007	9	58,50	81,01
05/12/2007	10	57,96	85,37
05/12/2007	11	54,31	85,37
07/12/2007	12	52,38	77,77
08/12/2007	13	50,35	76,13
11/12/2007	14	55,64	89,22
11/12/2007	15	50,00	82,84
12/12/2007	16	56,86	92,78
12/12/2007	17	53,76	79,54
14/12/2007	18	53,85	83,75
18/12/2007	19	48,78	68,44
18/12/2007	20	52,82	77,00
19/12/2007	21	58,14	81,76
19/12/2007	22	55,13	75,92
21/12/2007	23	49,86	81,76
22/12/2007	24	50,12	77,77
26/12/2007	25	41,84	83,75
27/12/2007	26	53,92	89,73
02/01/2008	27	59,38	89,73
03/01/2008	28	53,52	83,75
04/01/2008	29	52,75	83,75
05/01/2008	30	48,80	77,77
08/01/2008	31	54,60	83,75
09/01/2008	32	53,27	83,75
11/01/2008	33	45,87	71,79
12/01/2008	34	44,43	75,92
16/01/2008	35	56,73	74,25
19/01/2008	36	55,21	96,08
22/01/2008	37	51,36	104,98
23/01/2008	38	52,42	94,88
25/01/2008	39	57,27	102,20
26/01/2008	40	51,24	82,36
29/01/2008	41	50,61	97,65

Tabla B3. Eficiencia de enfriamiento y eficiencia térmica calculadas (cont.)

Fecha	DÍA	Eficiencia de enfriamiento, η_E (%)	Eficiencia Térmica, η_T (%)
29/01/2008	42	44,94	79,45
30/01/2008	43	55,51	90,67
30/01/2008	44	60,63	90,67
01/02/2008	45	67,43	107,92
05/02/2008	46	60,40	98,44
05/02/2008	47	70,07	119,54
06/02/2008	48	65,12	112,51
06/02/2008	49	70,60	114,04
08/02/2008	50	63,67	93,53
12/02/2008	51	62,52	93,53
13/02/2008	52	61,17	89,73
15/02/2008	53	59,31	84,38
16/02/2008	54	50,21	77,89
19/02/2008	55	53,27	87,31
22/02/2008	56	59,17	87,69
26/02/2008	57	62,02	82,92
26/02/2008	58	64,01	89,30
27/02/2008	59	58,74	77,77
27/02/2008	60	66,20	87,69
01/03/2008	61	55,11	67,30
04/03/2008	62	57,29	79,54
Promedio		55,43	84,88

APÉNDICE C. Capacidad de los rociadores

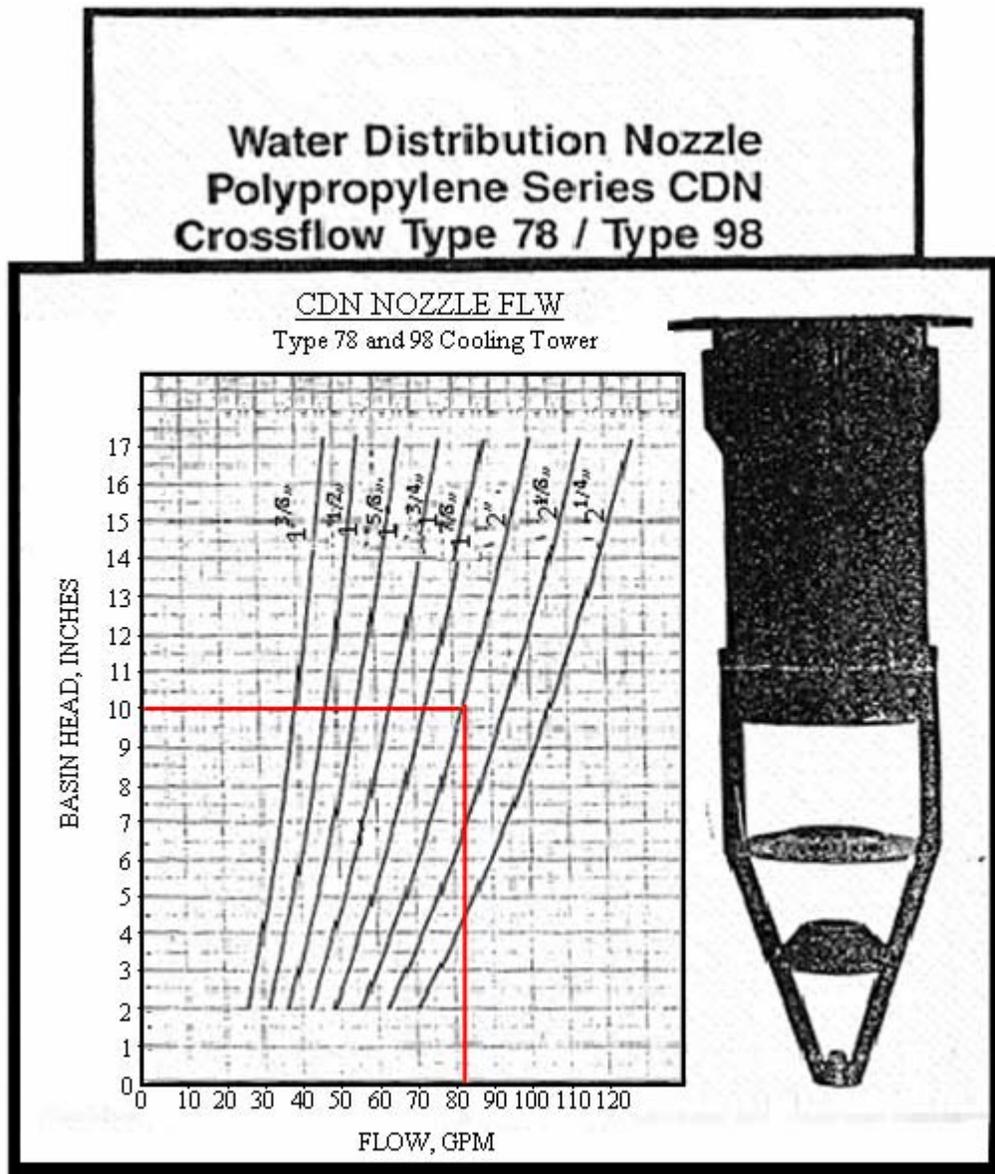


Figura C1. Curvas de Capacidad de los Rociadores

APÉNDICE D. Coeficientes característicos y relaciones gas/líquido de operación

Tabla D1. Coeficientes característicos y relaciones gas-líquido de operación

Fecha	DÍA	Relación Gás/Líquido, L/G	Característica de la torre, KaV/L
20/11/2007	1	1,26	0,60
21/11/2007	2	1,16	0,70
21/11/2007	3	1,29	0,67
23/11/2007	4	1,25	0,63
24/11/2007	5	1,25	0,68
27/11/2007	6	1,27	0,80
28/11/2007	7	1,29	0,69
04/12/2007	8	1,23	0,75
04/12/2007	9	1,29	0,69
05/12/2007	10	1,35	0,81
05/12/2007	11	1,35	0,74
07/12/2007	12	1,42	0,74
08/12/2007	13	1,39	0,72
11/12/2007	14	1,52	0,86
11/12/2007	15	1,52	0,75
12/12/2007	16	1,58	0,88
12/12/2007	17	1,46	0,77
14/12/2007	18	1,43	0,74
18/12/2007	19	1,34	0,83
18/12/2007	20	1,36	0,68
19/12/2007	21	1,39	0,79
19/12/2007	22	1,40	0,66
21/12/2007	23	1,39	0,73
22/12/2007	24	1,43	0,65
26/12/2007	25	1,41	0,79
27/12/2007	26	1,43	0,71
02/01/2008	27	1,43	0,80
03/01/2008	28	1,42	0,80
04/01/2008	29	1,43	0,74
05/01/2008	30	1,42	0,71
08/01/2008	31	1,43	0,73
09/01/2008	32	1,43	0,71
11/01/2008	33	1,41	0,78
12/01/2008	34	1,38	0,71
16/01/2008	35	1,17	0,70
19/01/2008	36	1,65	0,84
22/01/2008	37	1,81	0,88
23/01/2008	38	1,75	0,93

Tabla D1. Coeficientes característicos y relaciones gas-líquido de operación

Fecha	DÍA	Relación Gás/Líquido, L/G	Característica de la torre, KaV/L
25/01/2008	39	1,88	1,26
26/01/2008	40	1,62	0,96
29/01/2008	41	1,65	1,04
29/01/2008	42	1,57	0,82
30/01/2008	43	1,66	1,03
30/01/2008	44	1,67	1,04
01/02/2008	45	1,63	0,92
05/02/2008	46	1,68	1,19
05/02/2008	47	1,71	1,17
06/02/2008	48	1,68	1,66
06/02/2008	49	1,62	1,03
08/02/2008	50	1,40	0,75
12/02/2008	51	1,39	0,92
13/02/2008	52	1,42	0,86
15/02/2008	53	1,55	0,82
16/02/2008	54	1,54	0,82
19/02/2008	55	1,48	0,86
22/02/2008	56	1,39	0,78
26/02/2008	57	1,51	1,08
26/02/2008	58	1,51	1,09
27/02/2008	59	1,41	1,00
27/02/2008	60	1,39	0,85
01/03/2008	61	1,43	0,98
04/03/2008	62	1,44	0,94

APÉNDICE E. Cálculos tipo para la determinación de las variables de operación calculadas

Los cálculos se realizarán para la variable de operación medida el primer día (20/11/2007).

1. Salto térmico o rango de enfriamiento

$$Rango_{P1} = (T_{hwP1} - T_{cwP1}) = 109,00^{\circ} F - 93,20^{\circ} F = 15,80^{\circ} F$$

2. Temperatura de aproximación

$$Aprox_{P1} = (T_{cwP1} - T_{bhP1}) = 93,20^{\circ} F - 79,16^{\circ} F = 14,04^{\circ} F$$

3. Eficiencia de enfriamiento

$$\eta_{EP1} = \frac{(T_{hwP1} - T_{cwP1})}{(T_{hwP1} - T_{bhP1})} \cdot 100 = \frac{(109,00 - 93,20)^{\circ} F}{(109,00 - 79,16)^{\circ} F} \cdot 100 = 52,95\%$$

4. Flujo másico de agua

$$L_{P1} = L'_{P1} \cdot \rho_L = 58855 \frac{gal}{min} \cdot 62,01 \frac{lbm}{pie^3} \cdot 0,1368 \frac{pie^3}{gal} = 490946,75 \frac{lbm}{min}$$

5. Calor retirado en la torre

$$q_{LP1} = L'_{P1} \cdot C_{pL} (T_{hwP1} - T_{cwP1}) = 490946,75 \frac{lbm}{min} \cdot 1 \frac{BTU}{lbm^{\circ} F} \cdot (109,00 - 93,20)^{\circ} F$$

$$q_{LP1} = 7756959 \frac{BTU}{min}$$

6. Eficiencia térmica

$$\eta_{TP1} = \frac{q_{LP1}}{q_{LD}} \cdot 100 = \frac{7756959 BTU/min}{9325307 BTU/min} \cdot 100 = 83,18\%$$

Para el cálculo tipo del porcentaje de desviación con respecto al valor de diseño se utilizó el ejemplo del rango de aproximación, para las demás variables el cálculo es el mismo.

7. Promedio aritmético del rango de enfriamiento

$$\overline{Rango}_p = \frac{\sum_{i=1}^{62} Rango_{p_i}}{62} = \frac{859,10^\circ F}{62} = 13,86^\circ F$$

8. Porcentaje de desviación

$$\%Desv_{rango} = \frac{|Rango_D - \overline{Rango}_p|}{Rango_D} \cdot 100 = \frac{|18 - 13,86|^\circ F}{18^\circ F} \cdot 100 = 23,02\%$$

APÉNDICE F. Cálculos tipo para la determinación del coeficiente característico de diseño o requerido

Para esto se realizaron los siguientes cálculos:

1. Flujo másico del líquido

$$L_D = L'_D \cdot \rho_L = 62500 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \cdot 62,01 \frac{\text{lbm}}{\text{pie}^3} \cdot 0,13368 \frac{\text{pie}^3}{\text{gal}} = 518073 \frac{\text{lbm}}{\text{min}}$$

2. Calor removido del agua por la torre

$$q_{LD} = L_D \cdot C_{PL} \cdot \text{Rango}_D = 518073 \frac{\text{lbm}}{\text{min}} \cdot 1 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}^\circ F} \cdot 18^\circ F = 9325307 \frac{\text{BTU}}{\text{min}}$$

3. Calor latente de vaporización a la temperatura de referencia a la temperatura de bulbo húmedo:

$$T_{0L}=0^\circ F=255,37K \text{ y } T_{bh}=78^\circ F=298,71K$$

$$\lambda_0 = -1,3T_{0L}^2 - 1573,3T_{0L} + 3029500$$

$$\lambda_0 = -1,3(255,37K)^2 - 1573,3(255,37K) + 3029500$$

$$\lambda_0 = 2542943,42J / kg$$

$$\lambda_{bh} = -1,3T_{bh}^2 - 1573,3T_{bh} + 3029500$$

$$\lambda_{bh} = -1,3(298,71K)^2 - 1573,3(298,71K) + 3029500$$

$$\lambda_{bh} = 2443554,04J / kg$$

4. Presión de vapor del agua evaluada a la temperatura de bulbo húmedo:

$$p_{L1}(T_{bh}) = Ln(611.3) \cdot \left(\frac{1000}{298,71K} - \frac{1000}{373,15} \right) / \left(\frac{1000}{273,15} - \frac{1000}{373,15} \right)$$

$$p_{L1}(T_{bh}) = Ln(611.3) \cdot \left(\frac{1000}{298,71K} - \frac{1000}{373,15} \right) / \left(\frac{1000}{273,15} - \frac{1000}{373,15} \right) = 4,37$$

$$p_{L2}(T_{bh}) = Ln(101325) \cdot \left(\frac{1000}{T_{bh}} - \frac{1000}{273,15} \right) / \left(\frac{1000}{373,15} - \frac{1000}{273,15} \right)$$

$$p_{L2}(T_{bh}) = Ln(101325) \cdot \left(\frac{1000}{298,71K} - \frac{1000}{273,15} \right) / \left(\frac{1000}{373,15} - \frac{1000}{273,15} \right) = 3,68$$

$$p_{L3}(T_{bh}) = \left(\frac{1000}{T_{bh}} - \frac{1000}{273,15} \right) \cdot \left(\frac{1000}{T_{bh}} - \frac{1000}{373,15} \right) \cdot \left(-0,327 + 0,03 \cdot \left(\frac{1000}{T_{bh}} \right) \right)$$

$$p_{L3}(T_{bh}) = \left(\frac{1000}{298,71K} - \frac{1000}{273,15} \right) \cdot \left(\frac{1000}{298,71K} - \frac{1000}{373,15} \right) \cdot \left(-0,327 + 0,03 \cdot \left(\frac{1000}{298,71K} \right) \right) = 0,05$$

$$p_L(T_{bh}) = \exp(p_{L1}(T_{bh}) + p_{L2}(T_{bh}) + p_{L3}(T_{bh}))$$

$$p_L(T_{bh}) = \exp(4,37 + 3,68 + 0,05) = 3275,61Pa$$

5. Humedad absoluta de saturación evaluada a la temperatura de bulbo húmedo

$$Y'_s(T_{bh}) = \frac{p_L(T_{bh})}{p_t - p_L(T_{bh})} \times \frac{M_L}{M_G} = \frac{3275,61Pa}{101325Pa - 3275,61Pa} \times \frac{18,02g/mol}{28,97g/mol} = 0,021$$

6. Entalpía húmeda del aire de entrada a la torre evaluada a la temperatura de bulbo húmedo

$$H_{ha1}(T_{bh}) = Cp_G(T_{bh} - T_{0G}) + Y'_s(T_{bh})[Cp_L(T_{bh} - T_{0L}) + \lambda_0]$$

$$= 1005 \frac{J}{kgK} (298,71 - 255,37)K + 0,021 \left[4184 \frac{J}{kgK} (298,71 - 255,37)K + 2542943 \frac{J}{kg} \right]$$

$$H_{ha1}(T_{bh}) = 100161J/kg = 43,06BTU / lbm$$

Procedimiento iterativo para obtener la temperatura y la entalpía de salida del aire:

7. Suponer $T_{G2}=T_{bh}$, $T_{G2}=78^{\circ}\text{F}$

8. Calcular la presión de vapor a T_{G2sup} de la misma manera que en el paso 4

$$p_L(T_{G2sup}) = 3275,61\text{Pa}$$

9. Calcular la humedad de saturación a T_{G2sup} de la misma manera que en el paso 5

$$Y'_s(T_{G2sup}) = 0,021$$

10. Calcular la entalpía húmeda a T_{G2sup} de la misma manera que en el paso 6

$$H_{ha2}(T_{G2sup}) = 100161\text{J/kg} = 43,06\text{BTU} / \text{lbm}$$

11. Calcular el volumen húmedo del aire a T_{G2sup}

$$v_H(T_{G2sup}) = \left(\frac{Y'_s(T_{G2sup})}{M_L} + \frac{1}{M_G} \right) \times \left(\frac{R \cdot T_{G2sup}}{p_t(T_{G2sup})} \right)$$

$$v_H(T_{G2sup}) = \left(\frac{0,021}{18,02\text{kg} / \text{kmol}} + \frac{1}{28,97\text{kg} / \text{kmol}} \right) \times \left(\frac{10,73 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cdot 298,71\text{K}}{3275,61\text{Pa}} \right)$$

$$v_H(T_{G2sup}) = 218,88\text{m}^3 / \text{kg} = 14,01\text{pie}^3 / \text{lbm}$$

12. Calcular el flujo másico del aire:

$$G_D = \frac{G'_D}{v_{HD}} = \frac{5370000\text{pie}^3 / \text{min}}{14,89\text{pie}^3 / \text{lbm}} = 383341,99\text{lbm} / \text{min}$$

13. Calcular el calor absorbido por el aire

$$q_G = G_D \cdot (H_{ha2}(T_{G2sup}) - H_{ha1}(T_{bh}))$$

$$q_G = 383341,99\text{lbm} / \text{min} \cdot (43,06\text{BTU} / \text{lbm} - 43,06\text{BTU} / \text{lbm}) = 0,00\text{BTU} / \text{min}$$

14. Comprobar si $q_L=q_G$, en este caso son diferentes $q_L \neq q_G$
15. Entonces $T_{G2sup}=T_{bh}+0.01^\circ F$
16. Repetir los pasos 7 al 13 hasta que $q_L=q_G$

Luego de la iteración se obtuvieron los siguientes resultados

$$\begin{aligned}
 T_{G2} &= 96,54^\circ F \\
 p_L(T_{G2}) &= 5898,87 Pa \\
 Y'_s(T_{G2}) &= 0,038 \\
 H_{ha2}(T_{G2}) &= 68,91 BTU / lbm \\
 v_{HD}(T_{G2}) &= 14,89 pie^3 / lbm \\
 G_D(T_{G2}) &= 360655,67 lbm / min
 \end{aligned}$$

17. Calcular T_a, T_b, T_c y T_d

$$\begin{aligned}
 T_a &= T_{cwD} + 0,1 \cdot Rango_D = 87^\circ F + 0,1 \cdot 18^\circ F = 88,80^\circ F \\
 T_b &= T_{cwD} + 0,4 \cdot Rango_D = 87^\circ F + 0,4 \cdot 18^\circ F = 94,20^\circ F \\
 T_c &= T_{hwD} - 0,4 \cdot Rango_D = 105^\circ F - 0,4 \cdot 18^\circ F = 97,80^\circ F \\
 T_d &= T_{hwD} - 0,1 \cdot Rango_D = 105^\circ F - 0,1 \cdot 18^\circ F = 103,20^\circ F
 \end{aligned}$$

18. Calcular la presión de vapor a T_a, T_b, T_c y T_d de la misma manera que en el paso 4

$$\begin{aligned}
 p_L(T_a) &= 4639,62 Pa \\
 p_L(T_b) &= 5489,94 Pa \\
 p_L(T_c) &= 6129,10 Pa \\
 p_L(T_d) &= 7208,30 Pa
 \end{aligned}$$

19. Calcular la humedad de saturación a T_a, T_b, T_c y T_d de la misma manera que en el paso 5

$$Y'_s(T_a) = 0,030$$

$$Y'_s(T_b) = 0,036$$

$$Y'_s(T_c) = 0,040$$

$$Y'_s(T_d) = 0,048$$

20. Calcular la entalpía húmeda a T_a , T_b , T_c y T_d de la misma manera que en el paso 6

$$H_{hwa}(T_a) = 56,59 BTU / lbm$$

$$H_{hwb}(T_b) = 64,91 BTU / lbm$$

$$H_{hwc}(T_c) = 71,17 BTU / lbm$$

$$H_{hwd}(T_d) = 81,76 BTU / lbm$$

21. Calcular la relación gas-líquido

$$\left(\frac{L}{G}\right)_D = \frac{L_D}{G_D} = \frac{518072,60 lbm / min}{360655,67 lbm / min} = 1,44$$

22. Calcular la entalpía del aire húmedo a la temperatura global del aire

$$H_{haa} = H_{ha1} + 0,1 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)_D C_{pL} \cdot (Rango_D) = 43,06 \frac{BTU}{lbm} + 0,1 \cdot 1,44 \cdot 1 \frac{BTU}{lbm^\circ F} \cdot (18^\circ F)$$

$$H_{haa} = 45,64 BTU / lbm$$

$$H_{hab} = H_{ha1} + 0,4 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)_D C_{pL} \cdot (Rango_D) = 43,06 \frac{BTU}{lbm} + 0,4 \cdot 1,44 \cdot 1 \frac{BTU}{lbm^\circ F} \cdot (18^\circ F)$$

$$H_{hab} = 53,40 BTU / lbm$$

$$H_{hac} = H_{ha2} - 0,4 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)_D C_{pL} \cdot (Rango_D) = 68,91 \frac{BTU}{lbm} - 0,4 \cdot 1,44 \cdot 1 \frac{BTU}{lbm^\circ F} \cdot (18^\circ F)$$

$$H_{hac} = 58,57 BTU / lbm$$

$$H_{had} = H_{ha2} - 0,1 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)_D C_{pL} \cdot (Rango_D) = 68,91 \frac{BTU}{lbm} - 0,1 \cdot 1,44 \cdot 1 \frac{BTU}{lbm^\circ F} \cdot (18^\circ F)$$

$$H_{had} = 66,33 BTU / lbm$$

23. Calcular los cuatro valores de ΔH_h

$$\Delta H_{ha} = H_{hwa} - H_{haa} = 10,95 BTU / lbm$$

$$\Delta H_{hb} = H_{hwb} - H_{hab} = 11,52 BTU / lbm$$

$$\Delta H_{hc} = H_{hwc} - H_{hac} = 12,59 BTU / lbm$$

$$\Delta H_{hd} = H_{hwd} - H_{had} = 15,43 BTU / lbm$$

24. Calcular el coeficiente característico requerido de la torre mediante el método de Tchebyshev

$$\left(\frac{KaV}{L} \right)_D = C_{pL} \cdot \frac{(Rango_D)}{4} \cdot \left(\frac{1}{(\Delta H_h)_a} + \frac{1}{(\Delta H_h)_b} + \frac{1}{(\Delta H_h)_c} + \frac{1}{(\Delta H_h)_d} \right)$$

$$\left(\frac{KaV}{L} \right)_D = 1 \frac{BTU}{lbm^\circ F} \cdot \frac{(18^\circ F)}{4} \cdot \left(\frac{1}{10,95} + \frac{1}{11,52} + \frac{1}{12,59} + \frac{1}{15,43} \right) \frac{lbm}{BTU}$$

$$\left(\frac{KaV}{L} \right)_D = 1,45$$

APÉNDICE G. Cálculos tipo para la determinación de la curva de requerimientos de diseño

Para la determinación de esta curva se deben suponer valores de L/G y calcular los respectivos valores de KaV/L mediante la ecuación de Merkel. Se supusieron valores entre 0 y 2.35, y para este cálculo se tomará el valor L/G=1.17.

1. Los valores de H_{ha1} , H_{hwa} , H_{hwb} , H_{hwc} y H_{hwd} son los mismos que los calculados en el apéndice F, los valores de H_{ha} se calculan según el método de Tchebyshev, como el calculado en el paso 22 del apéndice F pero esta vez con los diferentes valores de $(L/G)_i$ supuestos. Así,

$$\begin{aligned}(H_{haa})_i &= 45,16BTU / lbm \\ (H_{hab})_i &= 51,48BTU / lbm \\ (H_{hac})_i &= 55,69BTU / lbm \\ (H_{had})_i &= 62,01BTU / lbm\end{aligned}$$

2. Luego los diferentes $(\Delta H_h)_i$ resultan

$$\begin{aligned}(\Delta H_{ha})_i &= H_{hwa} - (H_{haa})_i = 11,43BTU / lbm \\ (\Delta H_{hb})_i &= H_{hwb} - (H_{hab})_i = 13,43BTU / lbm \\ (\Delta H_{hc})_i &= H_{hwc} - (H_{hac})_i = 15,47BTU / lbm \\ (\Delta H_{hd})_i &= H_{hwd} - (H_{had})_i = 19,75BTU / lbm\end{aligned}$$

3. Finalmente se calcula $(KaV/L)_i$ como:

$$\begin{aligned}\left(\frac{KaV}{L}\right)_i &= C_{pL} \cdot \frac{(Rango_D)}{4} \cdot \left(\frac{1}{(\Delta H_h)_{ai}} + \frac{1}{(\Delta H_h)_{bi}} + \frac{1}{(\Delta H_h)_{ci}} + \frac{1}{(\Delta H_h)_{di}}\right) \\ \left(\frac{KaV}{L}\right)_i &= 1 \frac{BTU}{lbm^\circ F} \cdot \frac{(18^\circ F)}{4} \cdot \left(\frac{1}{11,43} + \frac{1}{13,43} + \frac{1}{15,47} + \frac{1}{19,75}\right) \frac{lbm}{BTU} \\ \left(\frac{KaV}{L}\right)_i &= 1,24\end{aligned}$$

Para todos los valores de L/G supuestos, los resultados son los siguientes:

Tabla G1. Valores para construir la curva de requerimientos de diseño

i	(L/G) _i	(KaV/L) _i
1	0,00	0,81
2	0,10	0,84
3	0,20	0,86
4	0,30	0,89
5	0,40	0,92
6	0,50	0,95
7	0,60	0,98
8	0,70	1,02
9	0,80	1,06
10	0,90	1,10
11	1,00	1,15
12	1,10	1,21
13	1,17	1,24
14	1,30	1,34
15	1,40	1,42
16	1,50	1,51
17	1,60	1,63
18	1,70	1,76
19	1,80	1,93
20	1,90	2,16
21	2,00	2,46
22	2,10	2,92
23	2,20	3,72
24	2,30	5,82

APÉNDICE H. Cálculos tipo para la determinación de la curva característica y la capacidad térmica de la torre

1. Cálculo de las desviaciones de los valores de prueba con respecto a los criterios de prueba establecidos por el CTI enlistados en el apéndice B. Los cálculos se realizaron para la variable de operación medida el primer día (20/11/2007)

a. Criterio para la temperatura de bulbo seco ($T_{bsD} - T_{bsP} \leq \pm 2,5^{\circ}\text{C}$)

$$T_{bsD} - T_{bsP1} = (86 - 84,20)^{\circ}\text{F} = 1,80^{\circ}\text{F} = 1,0^{\circ}\text{C} < \pm 2,5^{\circ}\text{C}$$

Esta temperatura entra dentro del rango establecido por CTI para la realización de las pruebas.

b. Criterio para la temperatura de bulbo húmedo ($T_{bhD} - T_{bhP} \leq \pm 1,5^{\circ}\text{C}$)

$$T_{bhD} - T_{bhP1} = (78 - 79,16)^{\circ}\text{F} = -1,16^{\circ}\text{F} = -0,64^{\circ}\text{C} < \pm 1,5^{\circ}\text{C}$$

Esta temperatura entra dentro del rango establecido por CTI.

c. Criterio para el salto térmico (El rango de prueba no debe diferir del de diseño en $\pm 20\%$)

$$\%Desv = \frac{|Rango_D - Rango_{P1}|}{Rango_D} \cdot 100 = \frac{|18 - 15,8|^{\circ}\text{F}}{18^{\circ}\text{F}} = 12,22\% < \pm 20\%$$

El salto térmico entra dentro del rango establecido por CTI para la realización de las pruebas.

d. Criterio del caudal de recirculación de agua (L'_P no debe diferir del de diseño en $\pm 10\%$)

$$\%Desv = \frac{|L'_D - L'_{P1}|}{L'_D} \cdot 100 = \frac{|62500 - 58855| \text{gpm}}{62500 \text{gpm}} = 5,83\% < \pm 10\%$$

El caudal de recirculación entra dentro del rango establecido por CTI para la realización de las pruebas.

Para el día 1, todos los valores medidos cumplen con los rangos de desviación especificados en el código CTI-ATC-105, por tanto este día puede ser considerado para la determinación de la curva característica.

- e. Repetir los pasos “a” a “d” para todos los demás valores de prueba y descartar el conjunto de valores en las que al menos una de las variables de prueba no cumpla con las especificaciones establecidas por el CTI.

En la siguiente tabla se muestran los porcentajes de desviación para todos los valores de prueba.

Tabla H1. Desviaciones de las variables de prueba con respecto a las de diseño

Día	ΔT_{bs} (°C)	ΔT_{bh} (°C)	%Desv Rango (%)	%Desv L' (%)
1	1,00	-0,64	12,22	5,83
2	3,10	0,86	24,44	11,81
3	0,30	-0,34	18,33	3,18
4	-0,20	-0,94	30,56	5,94
5	-0,20	0,16	27,78	5,94
6	4,00	2,66	27,78	3,18
7	-0,40	0,16	22,22	3,18
8	2,10	1,56	27,78	6,27
9	0,20	0,36	16,67	3,40
10	3,20	2,16	16,67	1,80
11	0,60	1,46	16,67	1,80
12	0,30	0,46	27,78	7,00
13	0,10	0,46	27,78	4,74
14	1,90	1,76	22,22	13,99
15	-0,30	0,56	27,78	13,99
16	5,30	1,46	22,22	18,53
17	0,10	0,66	27,78	9,44
18	-0,10	0,56	22,22	7,00
19	3,10	2,56	33,33	2,02
20	0,10	-0,24	25,00	2,02
21	3,60	1,16	22,22	4,46
22	-0,60	-1,34	27,78	4,46
23	0,10	1,16	22,22	4,46
24	-0,50	-1,14	27,78	7,00

Tabla H1. Desviaciones de las variables de prueba con respecto a las de diseño (cont.)

Día	ΔT_{bs} (°C)	ΔT_{bh} (°C)	%Desv Rango (%)	%Desv L _r (%)
25	-0,80	4,14	22,22	7,00
26	-0,20	0,46	16,67	7,00
27	2,40	1,26	16,67	7,00
28	0,40	1,76	22,22	7,00
29	0,10	0,86	22,22	7,00
30	0,40	0,36	27,78	7,00
31	0,70	0,36	22,22	7,00
32	0,30	0,16	22,22	7,00
33	-1,30	1,76	33,33	7,00
34	0,80	1,26	27,78	4,46
35	0,58	1,36	16,67	11,46
36	0,80	0,76	22,22	22,76
37	0,40	1,26	22,22	34,12
38	1,20	1,56	27,78	30,55
39	1,30	2,06	27,78	40,61
40	1,40	2,46	33,33	22,76
41	5,70	4,26	22,22	24,76
42	1,10	2,06	33,33	18,43
43	4,30	2,46	27,78	24,76
44	0,80	1,36	27,78	24,76
45	0,85	0,41	11,11	20,64
46	3,85	2,88	22,22	25,77
47	0,75	1,26	5,56	25,77
48	5,85	4,21	11,11	25,77
49	3,50	1,16	5,56	19,99
50	1,32	0,63	11,11	4,56
51	4,95	3,11	11,11	4,56
52	4,05	1,96	16,67	7,00
53	-0,50	-0,04	27,78	16,10
54	0,25	1,06	33,33	16,10
55	2,72	2,38	22,22	11,55
56	-0,30	1,31	16,67	4,56
57	-1,35	2,76	27,78	14,09
58	0,07	2,71	22,22	14,09
59	4,05	3,41	27,78	7,00
60	-0,55	1,48	16,67	4,56
61	0,40	2,76	38,89	9,44
62	3,52	2,61	27,78	9,44

Las casillas en amarillo representan las variables que cumplen con los límites establecidos por el CTI, Las casillas en color oro representan los días en los cuales todas las variables cumplen con los criterios establecidos por el CTI, y fueron éstos los días tomados en cuenta para la determinación de la curva característica.

2. Cálculo de los promedios aritméticos de las variables de operación seleccionados para la determinación de la curva característica. Cálculo realizado para la temperatura de bulbo seco, el cual es igual para todas las demás variables

$$\bar{T}_{bsP} = \frac{T_{bsP1} + T_{bsP3} + T_{bsP9} + T_{bsP11} + T_{bsP26} + T_{bsP27} + T_{bsP50} + T_{bsP56} + T_{bsP60}}{9}$$

$$\bar{T}_{bsP} = \frac{(84,20 + 85,46 + 85,64 + 84,92 + 86,36 + 81,68 + 83,62 + 86,54 + 86,99)^{\circ}F}{9} = 85,05^{\circ}F$$

En la siguiente tabla se muestran los diferentes grupos de valores seleccionados según los criterios del CTI y su respectivo promedio

Tabla H2. Conjunto de valores seleccionados para la determinación de la curva característica

DÍA	TEMPERATURA (°F)						Caudal de agua de Recirculación (gpm)	v_H (pie ³ /Lbm)
	Bulbo seco	Bulbo Húmedo	Agua fría	Agua Caliente	Aprox	Rango		
1	84,20	79,16	93,20	109,00	14,04	15,80	58855,00	14,74
3	85,46	78,62	88,30	103,00	9,68	14,70	60514,00	14,70
9	85,64	77,36	88,00	103,00	10,64	15,00	60378,00	14,66
11	84,92	75,38	88,00	103,00	12,62	15,00	63627,00	14,62
26	86,36	77,18	90,00	105,00	12,82	15,00	66876,00	14,72
27	81,68	75,74	86,00	101,00	10,26	15,00	66876,00	14,67
50	83,62	76,87	86,00	102,00	9,13	16,00	65353,00	14,74
56	86,54	75,65	86,00	101,00	10,35	15,00	65353,00	14,65
60	86,99	75,34	83,00	98,00	7,66	15,00	65353,00	14,64
Prm	85,05	76,81	87,61	102,78	10,80	15,17	63687,22	14,68

3. Cálculo de la relación gas-líquido de prueba

$$\left(\frac{L}{G}\right)_P = \left(\frac{L}{G}\right)_D \left(\frac{L'_P}{L'_D}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{BPH_D}{BPH_P}} \cdot \left(\frac{v_{HP}}{v_{HD}}\right)^{2/3}$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_P = 1,44 \cdot \left(\frac{63687,22 \text{ gpm}}{62500 \text{ gpm}}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{1250 \text{ HP}}{972 \text{ HP}}} \cdot \left(\frac{14,68 \text{ pie}^3 / \text{lbm}}{14,89 \text{ pie}^3 / \text{lbm}}\right)^{2/3} = 1,58$$

4. Cálculo del coeficiente característico de la torre de prueba

Para este cálculo se repitieron los pasos 1 al 24 del apéndice F utilizando como datos los valores promedio de la tabla H2 y el $(L/G)_P$ obtenido en el paso anterior, así los resultados son los siguientes:

Tabla H3. Variables calculadas para la determinación del coeficiente característico de prueba

Flujo másico del agua	$L=$	527913,6773	lbm/min
Calor removido en la torre	$q_L=$	8006690,772	Btu/min
Calor latente a Tvo	$\lambda_{of}=$	2542943,42	J/Kg
Calor latente a Tbh	$\lambda_{bh}=$	2445105,59	J/Kg
Presión de vapor 1 bh	$p_{L1}=$	4,42	
Presión de vapor 2 bh	$p_{L2}=$	3,59	
Presión de vapor 3 bh	$p_{L3}=$	0,05	
Presión de vapor a Tbh	$p_{Lbh}=$	3149,39	Pa
Humedad absoluta de bulbo húmedo	$Y'_{sbh}=$	0,020	Kg/Kg
Entalpía del aire de entrada	$H_{ha1}=$	41,77949243	Btu/lb as
Temperatura del aire de salida	$T_{G2}=$	92,58	°F
Presión de vapor 1 salida	$p_{L1}=$	3,79	
Presión de vapor 2 salida	$p_{L2}=$	4,72	
Presión de vapor 3 salida	$p_{L3}=$	0,05	
Presión de vapor a Ts	$p_{LG2}=$	5221,57	Pa
Humedad absoluta de salida	$Y'_{sG2}=$	0,034	Kg/Kg
Entalpía del aire de salida	$H_{ha2}=$	62,29	Btu/lb as
Volumen húmedo	$v_H=$	14,68	pie ³ /lbm
Flujo másico de aire	$G=$	390360,90	Lbm/min

Tabla H4. Resultado del cálculo de $(KaV/L)_P$ por el Método de Tchebyshev

	a	b	c	d
Temperatura T (°F)	89,13	93,68	96,71	101,26
Presión de vapor 1 p_{L1}	3,92	3,75	3,63	3,46
Presión de vapor 2 p_{L2}	4,48	4,79	5,00	5,31
Presión de vapor 3 p_{L3}	0,05	0,05	0,05	0,05
Presión de vapor p_L (Pa)	4687,76	5402,20	5929,31	6803,33
Humedad Abs Y_s (Kg/Kg)	0,030	0,035	0,039	0,045
Entalpía Hum H_{hw} (Btu/lb)	57,06	64,06	69,21	77,77
Entalpía Hum H_{ha} (Btu/lb)	44,17	51,35	52,72	59,90
Diferencia de entalpia ($H_{hw}-H_{ha}$)	12,89	12,71	16,49	17,88
Coficiente Característico $(KaV/L)_P$	1,03			

5. Cálculo del coeficiente C de la curva característica conocido el valor de n (6) y un punto de la curva $[(L/G)_P; (KaV/L)_P]$

$$C = \left(\frac{KaV}{L} \right)_P \cdot \left(\frac{L}{G} \right)_P^n = 1,03 \cdot (1,58)^{0,6} = 1,36$$

Entonces la forma de la curva característica es la siguiente:

$$\left(\frac{KaV}{L} \right) = 1,36 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{-0,6}$$

6. Suponer valores de L/G y calcular los respectivos valores de KaV/L mediante la ecuación anterior. Se supusieron valores entre 0,4 y 2,58, y para este cálculo se tomará el valor $L/G=1.17$.

$$\left(\frac{KaV}{L} \right) = 1,36 \cdot (1,17)^{-0,6} = 1,24$$

De esta manera, la curva se construye graficando el conjunto de pares de datos mostrados en la siguiente tabla.

Tabla H5. Valores para graficar la curva característica

(L/G)	(KaV/L)
0,4	2,36
0,5	2,06
0,6	1,85
0,7	1,68
0,8	1,55
0,9	1,45
1	1,36
1,1	1,28
1,15	1,25
1,16	1,24
1,17	1,24
1,18	1,23
2,08	0,88
2,58	0,77

7. El coeficiente característico disponible de la torre y la relación gas-líquido para cumplir con las condiciones de diseño se obtiene como el punto de corte entre la curva característica y la curva de requerimientos de diseño, los resultados obtenidos son:

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{CD} = 1,17 \quad y \quad \left(\frac{KaV}{L}\right)_{CD} = 1,24$$

8. Cálculo del porcentaje de capacidad térmica

$$\%C_T = \frac{\left(\frac{L}{G}\right)_{CD}}{\left(\frac{L}{G}\right)_D} \cdot 100 = \frac{1,24}{1,44} \cdot 100 \Rightarrow \%C_T = 81,45\%$$

9. Cálculo de la capacidad térmica

$$L' = L'_D \cdot \frac{\%C_T}{100} = 62500 \text{ gpm} \cdot \frac{81,45\%}{100\%} \Rightarrow L' = 50905,89 \text{ gpm}$$

APÉNDICE I. Cálculos tipo para la determinación de la capacidad hidráulica de la torre

1. Cálculo de la capacidad de cada rociador

La altura de la columna de líquido z_L es de 10 plg y el diámetro de cada rociador d_r es de 2 plg, con estos valores se entra en la figura B1 del apéndice B y se lee el valor del caudal de agua para cada rociador, L'_{cr} . De la gráfica se obtiene que:

$$L'_{cr} = 81gpm$$

2. Cálculo del número de rociadores totales n_r , sabiendo que el número de rociadores por cada celda (n_{rc}) es de 224, y que se tienen 5 celdas en operación.

$$n_r = n_{rc} \times Nro\ celdas = 224 \times 5 = 1120$$

3. Cálculo de la capacidad hidráulica máxima

$$L'_H = n_r \cdot L'_{cr} = 1120 \cdot 81gpm = 9720gpm$$

4. Cálculo del porcentaje de capacidad hidráulica, se realiza para todos los flujos de agua de prueba y se calcula el promedio aritmético como se mostró en el punto 7 del apéndice E. Para el primer día de las medidas:

$$\%C_H = \frac{L'_{p1}}{L'_H} \cdot 100 = \frac{58855gpm}{9720gpm} \cdot 100 = 64,88\%$$

Los porcentajes de capacidad hidráulica para todos los datos de prueba son presentados en la siguiente tabla junto con su promedio aritmético.

Tabla II. Porcentaje de capacidad hidráulica

Día	%C _H
1	64,88
2	60,76
3	66,70
4	64,80
5	64,80
6	66,70
7	66,70
8	64,58
9	66,55
10	70,14
11	70,14
12	73,72
13	72,16
14	78,53
15	78,53
16	81,66
17	75,40
18	73,72
19	70,29
20	70,29
21	71,96
22	71,96
23	71,96
24	73,72
25	73,72
26	73,72
27	73,72
28	73,72
29	73,72
30	73,72
31	73,72
32	73,72
33	73,72
34	71,96
35	61,00
36	84,57
37	92,40
38	89,94
39	96,87
40	84,57
41	85,95

Día	%C _H
42	81,59
43	85,95
44	85,95
45	83,12
46	86,65
47	86,65
48	86,65
49	82,67
50	72,04
51	72,04
52	73,72
53	79,98
54	79,98
55	76,85
56	72,04
57	78,60
58	78,60
59	73,72
60	72,04
61	75,40
62	75,40
promedio	75,50

APÉNDICE J. Cálculos tipo para la determinación del caudal de reposición o make-up deseado (L'_{MU})

El siguiente procedimiento fue realizado para cada caudal de agua de prueba, y luego de obtenidos todos los caudales de reposición, se realizó un promedio aritmético como se mostró en el punto 7 del apéndice E. El cálculo tipo se realizó para el primer valor de prueba (día 1):

1. Pérdidas por evaporación

$$L'_{E1} = 0,014 \cdot L'_{P1} = 0,014 \cdot 58855 \text{ gpm} = 823,97 \text{ gpm}$$

2. Pérdidas por arrastre

$$L'_{Df1} = 0,0001 \cdot L'_{P1} = 0,0001 \cdot 58855 \text{ gpm} = 5,89 \text{ gpm}$$

3. Pérdidas misceláneas

$$L'_{X1} = \frac{(L'_{E1} - L'_{Df1})}{7} = \frac{(823,97 \text{ gpm} - 5,89 \text{ gpm})}{7} = 116,87 \text{ gpm}$$

4. Caudal de purga con los ciclos de concentración especificados (7)

$$L'_{BD1} = \frac{L'_{E1}}{(\text{Ciclos} - 1)} - (L'_{Df1} + L'_{X1}) = \frac{823,97 \text{ gpm}}{(7 - 1)} - (5,89 + 116,87) \text{ gpm} = 14,57 \text{ gpm}$$

5. Caudal de reposición

$$L'_{MU1} = L'_{BD1} + L'_{E1} + L'_{Df1} + L'_{X1} = (14,57 + 823,97 + 5,89 + 116,87) \text{ gpm} = 961,30 \text{ gpm}$$

Los valores de make-up para todos los valores de prueba y el promedio del caudal de reposición se reportan en la siguiente tabla:

Tabla J1. Caudal de reposición deseado

Día	Caudal de reposición L' MU (gpm)
1	961,30
2	900,31
3	988,40
4	960,19
5	960,19
6	988,40
7	988,40
8	956,87
9	986,17
10	1039,24
11	1039,24
12	1092,31
13	1069,26
14	1163,60
15	1163,60
16	1210,04
17	1117,18
18	1092,31
19	1041,46
20	1041,46
21	1066,34
22	1066,34
23	1066,34
24	1092,31
25	1092,31
26	1092,31
27	1092,31
28	1092,31
29	1092,31
30	1092,31
31	1092,31
32	1092,31
33	1092,31
34	1066,34
35	903,81
36	1253,14
37	1369,16
38	1332,70
39	1435,42
40	1253,14
41	1273,58

Día	Caudal de reposición L' MU (gpm)
42	1208,93
43	1273,58
44	1273,58
45	1231,58
46	1283,95
47	1283,95
48	1283,95
49	1224,93
50	1067,43
51	1067,43
52	1092,31
53	1185,16
54	1185,16
55	1138,74
56	1067,43
57	1164,71
58	1164,71
59	1092,31
60	1067,43
61	1117,18
62	1117,18
promedio	1118,73

APÉNDICE K. Cálculos tipo para la determinación de los ciclos de concentración de contaminantes

Cálculo tipo se realizó para la determinación de los ciclos de concentración de alcalinidad total, donde según la tabla 8, la concentración de alcalinidad total en el agua de reposición (C_{alkP}) es de 150 ppm expresado como carbonato de calcio (CaCO_3), y la concentración máxima permitida es de 600 ppm como CaCO_3 . Así,

$$Ciclos_{alk} = \frac{C_{alkMAX}}{C_{alkP}} = \frac{600 ppm}{150 ppm} = 4$$

El cálculo de los ciclos de concentración para el resto de los contaminantes es igual, pero tomando de la tabla 8 las concentraciones máximas y las concentraciones del agua de reposición que se requieran

APÉNDICE L. Cálculos tipo para la determinación del Índice de Saturación y el Índice de Estabilidad

Para determinar si la tendencia del agua de reposición es incrustante o corrosiva se calcularon los índices de saturación y de estabilidad de la siguiente manera:

1. Determinación de los parámetros A, B, C y D encontrados en la tabla 3
 - Para concentración de sólidos totales $C_{stP}=400 \text{ ppm}$, $A=0,1$
 - Para la temperatura de agua caliente de prueba más alta $T_{hwPI}=109^{\circ}F$, $B=1,7$
 - Para concentración de dureza cálcica $C_{CaP}=175 \text{ ppm}$, $C=1,9$
 - Para concentración de alcalinidad total $C_{alk}=150 \text{ ppm}$, $D=2,2$
2. Determinación del pH de saturación de carbonato cálcico

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) = (9,3 + 0,1 + 1,7) - (1,9 + 2,2) = 7$$

3. Determinación del índice de saturación

$$I.S. = pH - pH_s = 8,2 - 7 = 1,2$$

4. Determinación del índice de estabilidad

$$I.E. = (2 \cdot pH_s) - pH = (2 \cdot 7) - 8,2 = 5,8$$

APÉNDICE M. Cálculos tipo para la determinación del caudal de ácido sulfúrico (L'_{as}) requerido para la disminución de la alcalinidad

Debido a que el número de ciclos de concentración por alcalinidad estuvo por debajo de los ciclos mínimos especificados, como se calculó en el apéndice K, es necesario ajustar la dosificación de ácido sulfúrico para llevar los ciclos de concentración de 4 a 7.

1. Concentración de alcalinidad que es necesario reducir para garantizar 7 ciclos de concentración

$$C_{alkr} = C_{alkP} - \frac{C_{alkMAX}}{Ciclos} = 150 ppm - \frac{600 ppm}{7} = 64,29 ppm$$

2. Caudal de ácido sulfúrico a agregar en el agua de reposición

Debido que 1 ppm de ácido sulfúrico elimina un ppm de alcalinidad, $C_{as}=C_{alk}$. El cálculo del caudal de ácido sulfúrico se realizó para el valor de caudal de reposición **requerido** calculado para el primer día.

$$L'_{as1} = \frac{L'_{MU1} \cdot C_{alkr}}{\rho_{as}} = \frac{961,30 gal / min \cdot 64,29 mg / l}{14,7 lbm / gal} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \frac{lbm}{mg} \cdot 3,785 \frac{l}{gal} \cdot 1440 \frac{min}{día}$$

$$L'_{as1} = 50,49 \frac{gal}{día}$$

3. Comparación entre el caudal de ácido sulfúrico requerido y el dosificado actualmente

Se debe calcular el porcentaje de desviación entre el caudal de ácido sulfúrico requerido y el dosificado actualmente mediante la siguiente fórmula

$$\%Desv_{as1} = \frac{L'_{as1} - L'_{asP}}{L'_{as1}} \cdot 100 = \frac{(50,49 - 30)gal / día}{50,49gal / día} = 40,58\%$$

La siguiente tabla muestra el caudal de ácido sulfúrico que debió ser dosificado a la torre a lo largo de los días de prueba, así como el valor promedio de dosificación y su respectivo porcentaje de desviación

Tabla M1. Dosificación diaria de ácido sulfúrico

Día	Caudal de H ₂ SO ₄ requerido, L' _{as} (gal/día)	%Desv _{as} (%)
1	50,49	40,58
2	47,28	36,55
3	51,91	42,21
4	50,43	40,51
5	50,43	40,51
6	51,91	42,21
7	51,91	42,21
8	50,26	40,30
9	51,79	42,08
10	54,58	45,04
11	54,58	45,04
12	57,37	47,71
13	56,16	46,58
14	61,11	50,91
15	61,11	50,91
16	63,55	52,79
17	58,67	48,87
18	57,37	47,71
19	54,70	45,15
20	54,70	45,15
21	56,00	46,43
22	56,00	46,43
23	56,00	46,43
24	57,37	47,71
25	57,37	47,71
26	57,37	47,71
27	57,37	47,71
28	57,37	47,71
29	57,37	47,71
30	57,37	47,71

Tabla M1. Dosificación diaria de ácido sulfúrico (cont.)

Día	Caudal de H₂SO₄ requerido, L'as (gal/día)	%Desvas (%)
31	57,37	47,71
32	57,37	47,71
33	57,37	47,71
34	56,00	46,43
35	47,47	36,80
36	65,82	54,42
37	71,91	58,28
38	69,99	57,14
39	75,39	60,21
40	65,82	54,42
41	66,89	55,15
42	63,49	52,75
43	66,89	55,15
44	66,89	55,15
45	64,68	53,62
46	67,43	55,51
47	67,43	55,51
48	67,43	55,51
49	64,33	53,37
50	56,06	46,49
51	56,06	46,49
52	57,37	47,71
53	62,24	51,80
54	62,24	51,80
55	59,81	49,84
56	56,06	46,49
57	61,17	50,96
58	61,17	50,96
59	57,37	47,71
60	56,06	46,49
61	58,67	48,87
62	58,67	48,87
promedio	58,76	48,94

APÉNDICE N. Cálculos tipo para la determinación del caudal de multifuncional XLP-3252 requerido.

Se calcula para una concentración de 100 wppm de químico en el agua de recirculación, lo que implica que el caudal de multifuncional añadido debe ser igual al caudal de este perdido por la purga de la torre. Para el día uno se tiene que:

$$L'_{mult1} = L'_{BD1} \cdot C_{mult} = 14,57 \frac{gal}{min} \cdot 100 \frac{mg}{kg} \cdot \frac{1kg}{10^6 mg} \cdot 1440 \frac{min}{día} = 2,10 \frac{gal}{día}$$

En la siguiente tabla se tienen los caudales de multifuncional requeridos y su promedio

Tabla N1. Caudal de multifuncional requerido

Día	Caudal de multifuncional L'mult (gal/día)	Día	Caudal de multifuncional L'mult (gal/día)	Día	Caudal de multifuncional L'mult (gal/día)
1	2,10	22	2,33	43	2,78
2	1,97	23	2,33	44	2,78
3	2,16	24	2,38	45	2,69
4	2,10	25	2,38	46	2,80
5	2,10	26	2,38	47	2,80
6	2,16	27	2,38	48	2,80
7	2,16	28	2,38	49	2,67
8	2,09	29	2,38	50	2,33
9	2,15	30	2,38	51	2,33
10	2,27	31	2,38	52	2,38
11	2,27	32	2,38	53	2,59
12	2,38	33	2,38	54	2,59
13	2,33	34	2,33	55	2,49
14	2,54	35	1,97	56	2,33
15	2,54	36	2,74	57	2,54
16	2,64	37	2,99	58	2,54
17	2,44	38	2,91	59	2,38
18	2,38	39	3,13	60	2,33
19	2,27	40	2,74	61	2,44
20	2,27	41	2,78	62	2,44
21	2,33	42	2,64	prom	2,44

APÉNDICE O. Cálculos tipo para la determinación del caudal de cloro requerido para el control microbiológico.

Los compuestos causantes de crecimiento microbiológico presentes en el agua de reposición son hierro y sulfato de sodio. Debido a que la concentración de hierro en dicha agua se encuentra de los límites permitidos, es decir, que los ciclos de concentración por hierro son mayores a 7, la dosificación de cloro se realizó exclusivamente para la reducción del sulfato de sodio.

1. Concentración de sulfato de sodio que es necesario reducir para garantizar 7 ciclos de concentración

$$C_{Na_2SO_4 r} = C_{Na_2SO_4 P} - \frac{C_{Na_2SO_4 MAX}}{Ciclos} = 176 ppm - \frac{500 ppm}{7} = 104,57 ppm$$

2. Concentración de cloro a agregar en el agua de reposición

Se requiere de un residual de cloro de 1 ppm, y como 2,2 ppm de cloro elimina un ppm de Na₂SO₄, según lo especificado en la tabla 6.

$$C_{Cl} = 2,2C_{Na_2SO_4 r} + 1 ppm = 2,2 \cdot 104,57 ppm + 1 ppm = 231,06 ppm$$

3. Caudal de cloro a agregar en el agua de reposición

El cálculo del caudal de cloro se realizó para el valor de caudal de reposición **requerido** calculado para el primer día.

$$L'_{Cl} = L'_{MU1} \cdot C_{Cl} = 961,30 \frac{gal}{min} \cdot 231,05 \frac{mg}{kg} \cdot 10^{-6} \frac{kg}{mg} \cdot 1440 \frac{min}{día} = 319,85 \frac{gal}{día}$$

4. Comparación entre el caudal de cloro requerido y el dosificado actualmente

Se debe calcular el porcentaje de desviación entre el caudal de ácido sulfúrico requerido y el dosificado actualmente mediante la siguiente fórmula

$$\%Desv_{Cl} = \frac{L'_{Cl} - L'_{ClP}}{L'_{Cl}} \cdot 100 = \frac{(319,85 - 745,6) \text{ gal / día}}{319,85 \text{ gal / día}} = -148,9\%$$

El valor negativo del porcentaje indica que se está sobredosificando cloro en un 148,9% para este día. La siguiente tabla muestra el caudal de cloro que debió ser dosificado a la torre a lo largo de los días de prueba, así como el valor promedio de dosificación y su respectivo porcentaje de desviación

Tabla O1. Dosificación diaria de cloro

Día	Caudal de Cl requerido, L'Cl (gal/día)	%DesvCl (%)
1	319,85	-148,90
2	299,55	-126,72
3	328,86	-133,38
4	319,48	-133,38
5	319,48	-126,72
6	328,86	-126,72
7	328,86	-134,19
8	318,37	-127,23
9	328,12	-115,63
10	345,78	-115,63
11	345,78	-105,15
12	363,44	-109,58
13	355,77	-92,58
14	387,16	-92,58
15	387,16	-85,19
16	402,61	-100,59
17	371,71	-105,15
18	363,44	-115,17
19	346,52	-115,17
20	346,52	-110,15
21	354,79	-110,15
22	354,79	-110,15
23	354,79	-105,15

Tabla O1. Dosificación diaria de cloro (cont.)

Día	Caudal de Cl requerido, L'Cl (gal/día)	%Desv_{Cl} (%)
24	363,44	-105,15
25	363,44	-105,15
26	363,44	-105,15
27	363,44	-105,15
28	363,44	-105,15
29	363,44	-105,15
30	363,44	-105,15
31	363,44	-105,15
32	363,44	-105,15
33	363,44	-110,15
34	354,79	-147,94
35	300,72	-78,82
36	416,95	-63,67
37	455,55	-68,15
38	443,42	-56,11
39	477,60	-78,82
40	416,95	-75,95
41	423,75	-85,36
42	402,24	-75,95
43	423,75	-75,95
44	423,75	-81,95
45	409,77	-74,53
46	427,20	-74,53
47	427,20	-74,53
48	427,20	-82,94
49	407,56	-109,93
50	355,16	-109,93
51	355,16	-105,15
52	363,44	-89,08
53	394,33	-89,08
54	394,33	-96,79
55	378,89	-109,93
56	355,16	-92,40
57	387,53	-92,40
58	387,53	-105,15
59	363,44	-109,93
60	355,16	-100,59
61	371,71	-100,59
62	371,71	-100,31
promedio	372,22	-101,75