

109



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DISEÑO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO  
CON UN ESTUDIO DE CASO

293251

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERA QUÍMICA**  
P R E S E N T A :  
**SOFIA LOPEZ OLALDE**



MEXICO, D.F.

EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Jurado Asignado:

Presidente Prof. José Antonio Ortiz Ramirez  
Vocal Prof. Mayo Gines Martínez Kahn  
Secretario Prof. José Fernando Barragán Aroche  
1er Suplente Prof. José Sabino Samano Castillo  
2o. Suplente Prof. Gerardo del Río Castillo

Sitio donde se desarrolló el tema México, D.F.

Asesor del Tema Prof. Mayo Gines Martínez Kahn



Sustentante Sofía López Olalde



*Este trabajo esta dedicado con  
todo mi amor a Aurelio Olalde  
por haberme enseñado lo que  
es la química...*

*Dedico también esta tesis a  
mi mamá, a Mario y a Aurelio  
por sus enseñanzas de vida*

*A Arturo por estar conmigo  
hoy y siempre.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento especial al Ing. Mayo Martínez Kahn por el tiempo invertido en este trabajo, por sus enseñanzas sobre torres de enfriamiento y sobre la vida, por su material bibliográfico y por su amistad.

Gracias a mi correctora de estilo (Guadalupe Olalde) por dedicar valioso tiempo a esta tesis

Gracias a Arturo por compartir conmigo sus conocimientos de ingeniería civil y por las ilustraciones de la tesis.

Gracias al Fís. Miguel Ángel Valdovinos por sus enseñanzas sobre tratamiento, aprovechamiento y recuperación de agua..

Gracias Ing. Alejandro Iñiguez por todo el apoyo para poder llegar hasta aquí.

Gracias al M. en C. Fernando Barragán y al Ing. José Antonio Ortiz por sus valiosas aportaciones a este trabajo.

# INDICE

## CAPÍTULOS

A	Introducción	1
I	Fundamentos teóricos	4
II	Diseño	16
III	Selección del tipo de torre de enfriamiento	40
IV	Prueba	49
V	Operación y control	55
VI	Consideraciones Económicas	74
VII	Cálculo de un caso	80
	Conclusiones y recomendaciones	108

## ANEXOS

111

I	Carta de humedad (psicrométrica) sistema aire – agua
II	Formato del plan de toma de datos para llevar a cabo la prueba a torre de una enfriamiento
III	Gráficas para obtener el factor de área relativa
IV	Tablas para obtener las constantes de la ecuación de Langelier
V	Estudio estadístico para obtener $T_{bh}$ de diseño

## GLOSARIO

### Bibliografía

## INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de procesos industriales y comerciales se lleva a cabo a elevadas temperaturas. Los sistemas de enfriamiento se utilizan para enfriar ciertas etapas del proceso o bien para enfriar el producto final. A través de los tiempos se han desarrollado diversas tecnologías para llevar a cabo tanto el proceso de calentamiento como el de enfriamiento.

Los métodos de enfriamiento utilizados en la actualidad incluyen: intercambio con otras corrientes más frías, con aire de enfriamiento, con agua de enfriamiento y con refrigerantes. La elección del método más apropiado depende de factores tales como la situación geográfica, las condiciones climáticas, las limitantes del proceso, los costos, los materiales, la disponibilidad y calidad de agua, etc.

El intercambio con agua de enfriamiento es uno de los métodos que más se utiliza en la actualidad. Para tener agua de enfriamiento se dispone de ríos, lagos, pozos, estanques de enfriamiento, estanques de esprea o torres de enfriamiento. La experiencia indica que una torre de enfriamiento requiere de  $1 \text{ ft}^2$  ( $0.93 \text{ m}^2$ ) de área por cada  $50 \text{ ft}^2$  ( $4.65 \text{ m}^2$ ) requeridos para un estanque de esprea y por cada  $1,000 \text{ ft}^2$  ( $92.9 \text{ m}^2$ ) requeridos para un lago o estanque convencional. Es por esta razón que de entre las tecnologías actuales para enfriar agua, la torre es la que se emplea más.

En teoría, una torre de enfriamiento es un equipo que elimina el calor contenido en el agua enviándolo a la atmósfera. En la práctica se trata de una estructura que proporciona un contacto íntimo entre el agua y el aire logrando así un efecto acelerado de enfriamiento a través de la transferencia simultánea de materia y energía. Es un equipo con buen rendimiento ya que hasta el 98% del agua bombeada a la torre de enfriamiento se enfría y regresa al sistema. El fundamento técnico de una torre de enfriamiento es la transferencia simultánea de materia y energía que se sustenta en las ecuaciones de Merckel (1925).

El primer paso en la instalación de una torre de enfriamiento es la elección del tipo de torre que se utilizará; esta elección depende de la situación geográfica, de las condiciones climatológicas, del tipo de proceso involucrado, de la cantidad de agua de enfriamiento necesaria y de los recursos económicos disponibles. Una vez que se ha seleccionado el tipo de torre habrán de hacerse los cálculos estructurales según el material elegido y el volumen de agua requerida así como el dimensionamiento y valuación donde se incluye la determinación de las propiedades psicrométricas y de la capacidad térmica. El comprador de una torre debe proporcionar a los diferentes proveedores estas especificaciones para que ellos puedan presentar su licitación.

Por su parte, el proveedor de torres de enfriamiento integra su licitación con: datos térmicos y estructurales de su oferta, un análisis fisicoquímico y biológico del agua, intensidad de sonido producido por la torre, tipo de torre, materiales de construcción, tipo de accesorios y especificaciones técnicas de los mismos, previsiones en lo que a seguridad respecta, costo, periodo de amortización, plano de diseño así como términos y condiciones de venta. El comprador entonces podrá evaluar las ofertas y elegir la que más le convenga.

Antes de poner en marcha la torre debe hacerse una prueba en las condiciones de operación que se planean tener; el análisis de los resultados obtenidos indica las posibles fallas de la torre que se deberán corregir antes de que la torre entre en operación.

Una vez que la torre está en operación se necesita llevar a cabo un control de ciertas variables tales como la calidad del agua, la calidad de la pluma de vapor de agua y los ciclos de concentración. Además, deben hacerse balances periódicos para evaluar si las pérdidas por evaporación, arrastre y/o purgas no son excesivas y si la torre realmente está funcionando como un dispositivo de ahorro de agua.

En el diseño una torre de enfriamiento, pueden también incluirse opciones para optimizar el ahorro de agua, para mejorar la calidad de la misma y para operar de la mejor manera posible.



En esta tesis se presenta un caso en donde se tocan los temas más importantes para el cálculo, diseño, operación y mantenimiento de torres de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente y se incluye, como ejemplo, el cálculo de este caso.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### *Principios básicos*

Una torre de enfriamiento es un cambiador de calor en el que se lleva a cabo un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa; se transfiere masa cuando el agua se evapora de las gotas que caen por la torre; el calor se transfiere en el proceso de enfriamiento del agua debido a la evaporación.

En el proceso de transferencia de calor existe pérdida tanto de calor sensible como de calor latente. La teoría aceptada para la transferencia de calor en una torre de enfriamiento está basada en la diferencia de entalpía potencial. Esta teoría asume que cada gota de agua está rodeada por una película de aire de tal forma que la diferencia de entalpías entre la gota de agua y la capa de aire es la fuerza que permite se lleve a cabo la transferencia de calor. La dirección y la magnitud de la transferencia simultánea de calor y masa están controladas por las condiciones de equilibrio hacia las cuales tiende dicha transferencia.

La relación de fases de una mezcla gas – vapor se representa a través de un diagrama concentración – temperatura a presión constante. En este diagrama, se presenta la concentración del gas saturado en contra de los datos de temperatura que usualmente se obtienen experimentalmente. Si se tratara de soluciones ideales en ambas fases, dicho diagrama se haría de acuerdo a las Leyes de Raoult y Dalton.

Este diagrama de fases se conoce como carta de humedad o carta psicrométrica; una versión simplificada se presenta en la figura 1. La versión completa de la carta psicrométrica para la operación de una torre de enfriamiento se presenta en el anexo I.

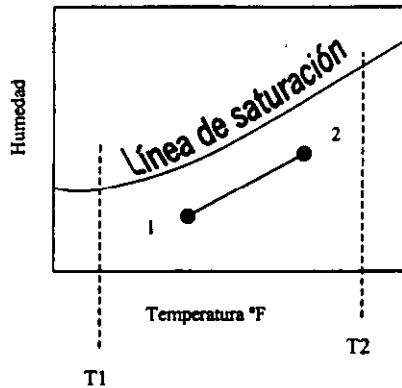


Fig. 1 Carta de humedad que ilustra la operación de una torre de enfriamiento

Esta figura ayuda a entender la operación de una torre de enfriamiento: el agua caliente entra por la parte de arriba de la torre con una temperatura T2 y sale por la parte inferior de la torre con una temperatura T1. El aire se mueve a contracorriente; entra por la parte inferior de la torre, que se representa en la figura como el punto 1, y sale por la parte superior, representada por el punto 2.

Las ecuaciones fundamentales de transferencia en una torre de enfriamiento fueron derivadas por Merkel en 1925<sup>1</sup>. Lo descrito anteriormente se expresa a través de dichas ecuaciones.

$$NTU = Ka \frac{V}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{h' - h} \quad \dots\dots\dots(I)$$

$$dH = \frac{L}{G} dT \quad \dots\dots\dots(II)$$

<sup>1</sup> Brown, George, *Unit Operations*, Vol I, John Wiley & Sons Inc. Publishers, EE.UU, 1950, 611 pp.

Donde:

$K$  = Coeficiente de transferencia de masa [ $\text{lb/h ft}^2$ ]

$a$  = área de contacto [ $\text{ft}^2/\text{ft}^3$  volumen torre]

$V$  = Volumen de enfriamiento [ $\text{ft}^3/\text{ft}^2$  área plana]

$L$  = Caudal de agua [ $\text{lb/h}$ ]

$h'$  = entalpia del aire saturado a la temperatura del agua [ $\text{Btu/lb}$ ]

$h$  = entalpia de la corriente de aire [ $\text{Btu/lb}$ ]

$T_1, T_2$  = Temperaturas del agua a la entrada y a la salida [ $^{\circ}\text{F}$ ]

El término  $KaV/L$  de la ecuación (I) relaciona al proceso de transferencia de calor con el de difusión de masa.

Las dimensiones de un equipo de enfriamiento de agua para un volumen y condiciones de operación dadas se calculan mediante tres ecuaciones básicas: una para la velocidad de transferencia de calor sensible entre el aire y la superficie del agua; otra para la velocidad de difusión del vapor de agua entre el aire y la misma superficie de agua; y la tercera para la velocidad de transferencia de calor entre la interfase y la masa principal de agua. Las ecuaciones de Merckel surgen, precisamente, de estas tres ecuaciones básicas que a continuación se analizan.

Si se considera una torre de enfriamiento en estado estacionario en la cual el aire entra por la parte de abajo y sale por la parte superior mientras que el agua lo hace en forma inversa (contracorriente); en cualquier sección transversal la masa de aire tendrá una temperatura de bulbo seco  $t$ , una humedad absoluta  $H$  y una velocidad de flujo de masa  $w$ . En esta misma sección, la velocidad de flujo de masa líquida (agua) es  $L$ ; la masa se encuentra a una temperatura  $T$  y la interfase del agua y el aire está a una temperatura  $t_i$ . La ecuación de balance general de agua sería entonces:

$$L_1 - L_2 = w (H_1 - H_2)$$

Enfocándose a lo que sucede en una altura diferencial  $dZ$  correspondiente al volumen diferencial  $dV$ , teniendo una sección transversal  $S$ ;  $dV$  será igual a  $S dZ$ . Los balances de masa y energía correspondientes serían entonces:

$$-dL = -w dH \dots \dots \dots (1)$$

$$-L dT = -ws dt - wr dH \dots \dots \dots (2)$$

El área diferencial de la interfase  $dA$  es igual al producto de la superficie húmeda  $a$  por unidad de volumen de torre y el volumen  $dV$  de la sección diferencial; es decir,  $dA = a dV$ . La velocidad de transferencia de calor sensible entre la masa de aire a  $t$  y la superficie del agua a  $t_i$  es entonces:

$$ws dt = (h_G) (a dV) (t - t_i) \dots \dots \dots (3)$$

La velocidad de difusión del vapor de agua entre la masa principal de gas (con humedad absoluta  $H$ ) y la interfase (con humedad absoluta  $H_i$ ) está dada por la ecuación de transferencia de masa:

$$-w dH = (k'a) (dV) (H - H_i) \dots \dots \dots (4)$$

Entonces, la velocidad de transferencia de calor de la interfase a la masa principal de agua será:

$$-L dT = (h_L) (a dV) (t_i - T) \dots \dots \dots (5)$$

Estas cinco ecuaciones diferenciales junto con los datos de los diferentes coeficientes son la solución al problema de contacto directo entre aire y agua en un aparato a régimen permanente. Si se divide la ecuación (4) entre la (3) se obtiene la relación:

$$\frac{dH}{dT} = \frac{k's}{h_G} \left( \frac{H - H_i}{t - t_i} \right) \dots \dots \dots (6)$$

Debido a las propiedades físicas del aire y del agua el valor de la relación ( $h_G / k's$ ) es casi 1, por lo tanto la ecuación (6) se convierte en:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{H - H_i}{t - t_i} \dots \dots \dots (7)$$

En la práctica, existe un método de cálculo que asume que  $h_L a$  es tan grande que  $t_i$  iguala a  $T$  de tal forma que la ecuación 5 se elimina. En este caso, el coeficiente individual  $k'$  multiplicado por el diferencial de humedad (interfase y aire) se reemplaza por un coeficiente global  $K$  multiplicado por una fuerza impulsora global ( $H_T - H$ ) y la ecuación 4 se convierte en:

$$w dH = Ka dV (H_T - H) \dots \dots \dots (8)$$

y la ecuación 3 se convierte de forma similar en:

$$ws dt = U_G a dV (T - t) \dots \dots \dots (9)$$

donde  $U_G$  es el coeficiente global de transferencia de calor sensible basado en el diferencial global de temperatura.

### ***Psicrometría***

La operación de una torre de enfriamiento es un proceso de humidificación en el que el agua se vaporiza en un gas, en este caso, el gas es aire. Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, la humidificación implica el incremento en el punto de rocío de la mezcla con respecto a cualquier clase de vapor que sea considerado. Una torre de enfriamiento lleva a cabo un proceso de humidificación con el objetivo de enfriar agua basándose en las propiedades psicrométricas del agua y del aire. Las propiedades psicrométricas a las que hacemos referencia se encuentran descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Definición de las propiedades psicrométricas o términos de humedad

Propiedad	Significado	Unidades	Notación
1. Humedad	Contenido de vapor en un gas	Masa de vapor / masa de gas no condensable	$Y' = Y (M_a/M_b)$
2. Humedad molal	Contenido de vapor en un gas	Moles vapor / moles de gas no condensable	Y
3. Humedad o saturación relativa	Radio de presión parcial de vapor y presión parcial de vapor de saturación	atm/atm o fracción molar/fracción molar o bien %	100 (y / ys)
4. Humedad o saturación porcentual	Radio de las concentraciones de vapor y vapor saturado (en radios molares)	Radio molar/radio molar; expresada en %	100 (Y / Ys)
5. Volumen húmedo molal	Volumen de 1 mol de gas seco y su vapor asociado	Volumen / moles de gas seco	$V_h = (1 + Y) * 359 (T / 492 P)$
6. Calor húmedo molal	Calor requerido para elevar un grado la temperatura de un mol de gas seco y su vapor asociado	Cantidad de calor / moles de gas seco, grados	$ch = cb + Yca$
7. Temperatura de saturación adiabática	Temperatura que se obtendría si el gas se saturara en el proceso adiabático	Grados (°F, °C, °R o K)	$T_{sa}$
8. Temperatura de bulbo húmedo	Temperatura en el estado estacionario que se obtiene por un termómetro de bulbo húmedo a condiciones estándar	Grados (°F, °C, °R o K)	$T_{bh}^2$
9. Temperatura de rocío	Temperatura a la cual el vapor comienza a condensarse cuando la fase gas se enfría a presión constante	Grados (°F, °C, °R o K)	$T_r^3$

<sup>2</sup> En inglés se utiliza  $T_w$ <sup>3</sup> En inglés se utiliza  $T_d$



Todos los términos a los que se hace referencia en la tabla 1 se presentan esquemáticamente en una carta psicrométrica (Apéndice A). Es importante comprender que la zona de saturación y las líneas de humedad, ya sea constante, porcentual o relativa son de importancia primordial en esta carta. La zona, línea o sitio de saturación está relacionada directamente con la curva de presión de vapor y las líneas de humedad son de curvatura similar y se encuentran por abajo de la línea de saturación.

El equilibrio de fases del que se ha hablado y la psicrometría del proceso de humidificación en una torre pueden representarse también como se muestra en la figura 2.

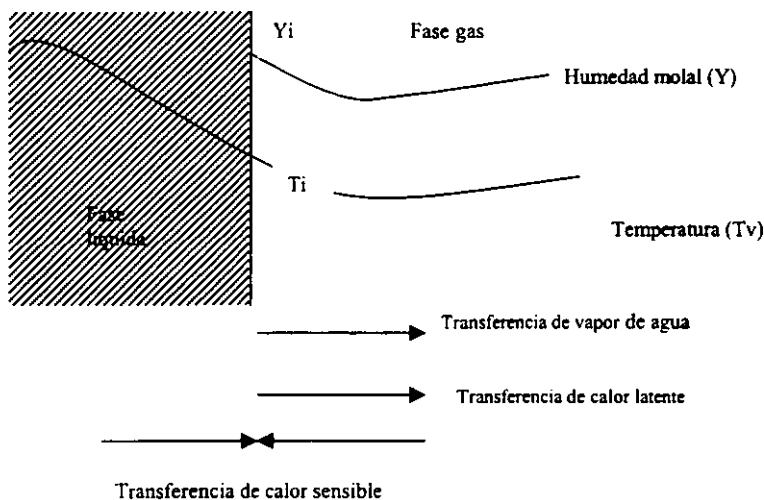


Figura 2. Condiciones de equilibrio de fases en una torre de enfriamiento

Como se puede ver en esta figura, el agua caliente entra en contacto con una mezcla gas – vapor enfriadora. Tanto masa como calor son transferidos hacia la fase gas. Como resultado de esto y por conveniencia, los signos de los términos que hacen referencia a las fuerzas impulsoras de la transferencia y las velocidades de transferencia son positivos.

Con base en estos fundamentos, para una torre de sección transversal constante, el balance general de materia es:

$$L_1 - L_2 = V_1 - V_2 \dots \dots \dots (10)$$

Mientras que el balance entálpico resulta ser:

$$L_2 H_{L2} + V' H_{V1} + q = L_1 H_{L1} + V' H_{V2} \dots \dots \dots (11)$$

Usualmente, una torre opera a condiciones cercanas a las adiabáticas y por lo tanto  $q$  tiende a cero. Para el cambio en la entalpía de la fase gas, la expresión en términos de temperatura es rigurosa si el calor húmedo molar  $c_h$  es constante.

$$\begin{aligned} V' dH_V &= V' d[c_h (T_V - T_o) + Y\lambda_o] \\ &= V' c_h dT_V + V' \lambda_o dY \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

Para la transferencia de calor sensible en la fase gas,

$$\frac{V'}{S} c_h dT_V = h_c a (T_i - T_V) dz \dots \dots \dots (13)$$

y, para la transferencia de calor latente en la fase gas,

$$\frac{V'}{S} \lambda_o dY = \lambda_o k_y a (Y_i - Y) dz \dots \dots \dots (14)$$

Donde  $Y_i$  es el radio molar en la fase gas de soluto – solvente en la interfase.

### ***Ecuación de diseño***

Las ecuaciones que expresan el balance entálpico y las ecuaciones de velocidad pueden combinarse para dar lugar a la ecuación de diseño. Así que, combinando la ecuación (12) con la (13) y la (14) se obtiene:

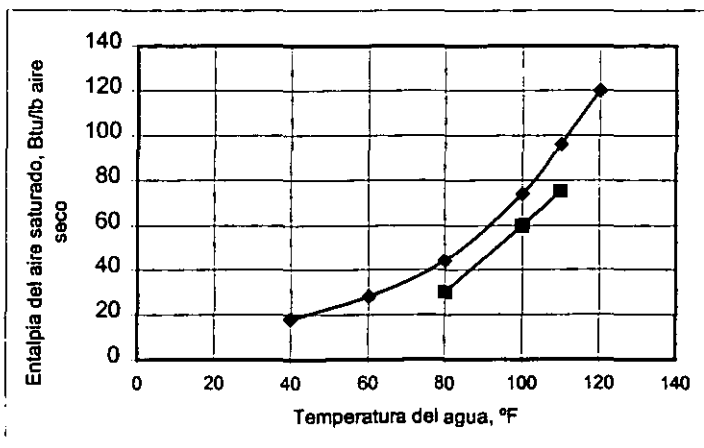
$$\frac{V'}{S} dH_V = h_c a (T_i - T_V) dz + \lambda_o k_Y a (Y_i - Y) dz \dots \dots \dots (15)$$

Esta ecuación se conoce como ecuación de diseño y su versión integrada es la siguiente:

$$\frac{H_{V2} - H_{V1}}{T_{L2} - T_{L1}} = \frac{L_{av} c_L}{V'} \dots \dots \dots (16)$$

Esta ecuación proporciona la pendiente de la línea de operación en la forma  $L_{av} c_L / V'$ . Esta línea de operación está representada en la figura 3 por la línea que une los puntos 1 y 2. La distancia existente entre la línea de operación y la de saturación representa el potencial existente en una torre para llevar a cabo el enfriamiento.

Este método de diseño no es del todo preciso, sin embargo, es una forma simple y práctica de entender la operación de las torres. Así podemos entender que conforme la temperatura disminuye, disminuyen la entalpía y la humedad del aire; es decir conforme el aire enfría al agua, éste se va secando.



*Figura 3. Diagrama que representa la aplicación de la ecuación de diseño de una torre de enfriamiento*

*Como consecuencia de las ecuaciones, figuras y relaciones antes presentadas tenemos que:*

- 1) Una torre de enfriamiento lleva a cabo un proceso de transferencia simultánea de calor y masa denominado humidificación*
- 2) El proceso de humidificación tiene sus fundamentos en la psicrometría y el equilibrio de fases*
- 3) El equilibrio de fases para una torre de enfriamiento se representa con una carta psicrométrica*
- 4) En una torre de enfriamiento existe transferencia de calor latente de la fase líquida a la fase gas y transferencia de calor sensible en ambas direcciones*
- 5) La entalpía depende principalmente de la humedad que a su vez puede cuantificarse a través de la temperatura de bulbo húmedo*
- 6) La temperatura de salida del agua es independiente de la temperatura de bulbo seco*
- 7) Con la ecuación (16) se puede diseñar una torre basándose en los coeficientes de transferencia en lugar de utilizar gráficas empíricas de operación*

## CAPITULO II

### DISEÑO

#### 1. Térmico

##### (a) Capacidad térmica (*Heat load*).

La determinación de la cantidad de calor que se disipará en una torre es esencial pues no sólo afecta el tamaño de la torre sino también su efectividad. Una determinación excedida o escasa puede costar mucho dinero. La capacidad térmica necesaria en una torre de enfriamiento se determina de acuerdo al proceso involucrado. Existe un compendio de fórmulas para llevar a cabo esta determinación además de tablas confiables en las que se muestra el calor absorbido por el agua de enfriamiento en diversos tipos de equipo energético, es decir: condensadores de vapor, compresoras, motores diesel y motores de gas natural. La tabla 1, que se presenta a continuación, muestra información de este tipo.

##### (b) Temperatura de bulbo húmedo (*Wet bulb temperature*)

Para hacer esta determinación deben tomarse en cuenta la naturaleza del proceso y las condiciones atmosféricas locales. La definición de este valor tendrá consecuencias en el diseño, tamaño y selección del equipo de evaporación del agua de enfriamiento. La temperatura de bulbo húmedo de una mezcla gas - vapor proporciona una medida de la humedad de la mezcla; entre menos humedad exista, más distarán las temperaturas de bulbo húmedo y seco. Teóricamente, una torre de enfriamiento enfría el agua a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura mínima a la cual el agua puede enfriarse). El acercamiento obtenido está en función de las condiciones térmicas y de la capacidad de la torre.

Tabla 2. Ejemplo de calores absorbidos por el agua de enfriamiento de diversos equipos

Equipo Mecánico	kcal / min Ton	kcal / kg de vapor	kcal / bhp h
Compresor de aire			
- Una etapa			96
- Una etapa y postenfriador			641
- Dos etapas con interenfriador			385.5
- Dos etapas con interenfriador y postenfriador			641
Refrigeración, compresión	63		
Refrigeración, absorción	126		
Refrigeración - condensación con chorro de vapor			
- Suministro de vapor de 100 psi (seco) y condensador de 2" Hg	227	610.5	
Condensador de turbina de vapor		55.5	
Motor diesel (y combustible doble) de chaqueta de agua y aceite lubricante:			
- 4 ciclos sobrealimentado			655
- 4 ciclos no sobrealimentado			756
- 2 ciclos compresor cárter (caja de cigüeñal)			504
- 2 ciclos bomba de barrido, unidad grande			580
- 2 ciclos bomba de barrido, alta velocidad			529
Motores de gas natural			
- 4 ciclos (compr. 250 psi)			1134
- 2 ciclos (compr. 250 psi)			756

La selección de la temperatura de bulbo húmedo de diseño debe hacerse de acuerdo a las condiciones existentes en el lugar. La temperatura seleccionada está generalmente cerca del valor máximo promedio para los meses de más calor. Sin embargo, se recomienda hacer un análisis estadístico de los datos históricos para obtener la moda del máximo promedio. Este análisis deberá incluir idóneamente el ciclo diario para los meses de calor (figura 4), el ciclo anual (figura 5) y la curva de duración (figura 6); de esta forma el estudio incluirá las cargas por estación del año y el patrón de conducta anual de la temperatura de bulbo húmedo. En casos especiales no es necesario realizar el análisis completo; la figura 4 suele ser suficiente cuando se tienen estaciones bien definidas y tan sólo en un par de meses se registran las más altas temperaturas; si la temperatura es constante la mayor parte del año la figura 5 basta; la figura 6 permite evaluar y comparar los costos del equipo instalado, los costos de operación, eficiencias y capacidades a diferentes temperaturas de bulbo húmedo.

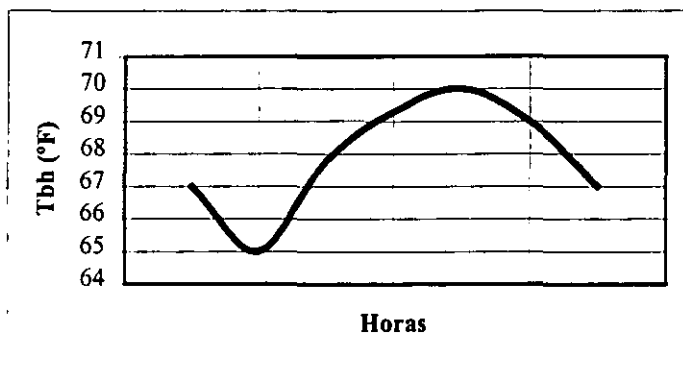


Figura 4. Variación diaria de la Tbh



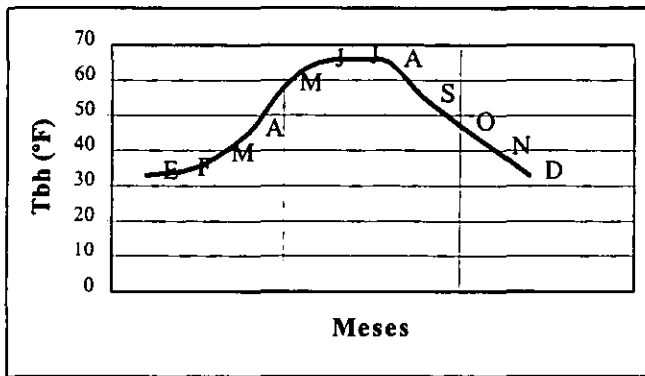


Figura 5. Variación anual de la Tbh

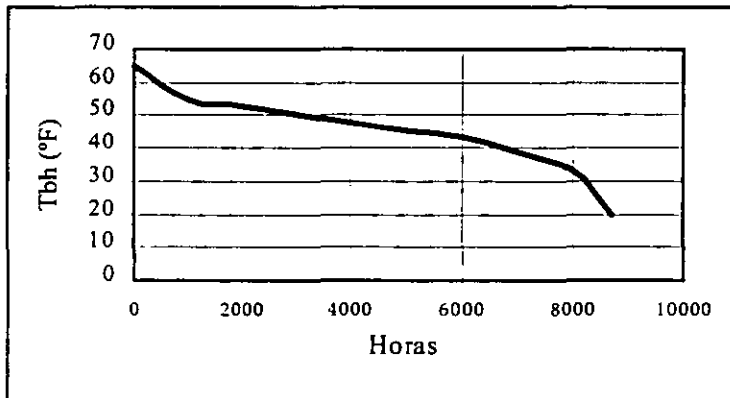


Figura 6. Curva típica de la duración de la Tbh

Un aspecto importante de la temperatura de bulbo húmedo es si se trata de la que se registra en el ambiente o de la que se registra en la entrada. La ambiente corresponde a la temperatura existente en el área donde se ubicará la torre mientras que la de entrada corresponde a la que tiene el aire al entrar a la torre de enfriamiento y puede verse afectada por los vapores provenientes de la misma torre. La temperatura de bulbo húmedo a la entrada se eleva con la recirculación y por lo tanto el agua a la entrada estará a una temperatura menor. Sin embargo, el código para prueba de torres ASME<sup>1</sup> especifica el uso de la temperatura de bulbo húmedo del ambiente para llevar a cabo la prueba.

(c) Diferencial de temperaturas (*Temperature differential*)

Este diferencial es el existente entre la temperatura que tiene el agua a la entrada y salida de la torre; es una variable que indica qué tantos grados enfría la torre. La temperatura del agua a la entrada de la torre recibe la influencia de los vapores de la recirculación; sin embargo, para fines de diseño y prueba se considera la temperatura tal cual sin ningún factor influyente.

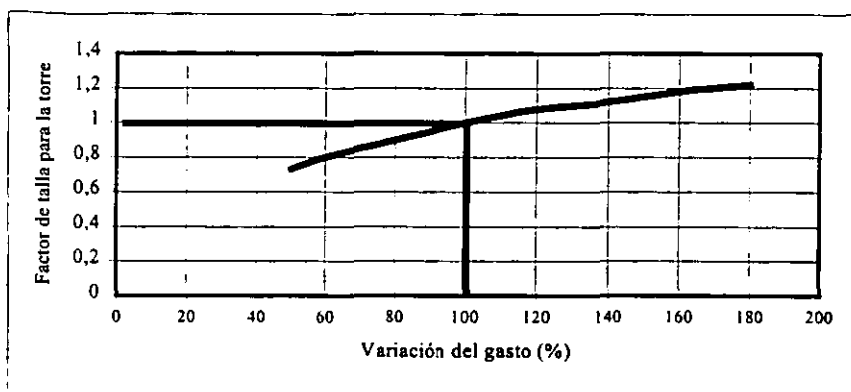
(d) Gasto (GPM) (*Flow*)

El volumen de agua que circula a través de la torre esta dado en GPM y se denomina gasto. Esta variable está íntimamente relacionada con el intervalo de temperaturas pues un aumento en el gasto propicia una disminución en el rango de enfriamiento.

Además, esta variable es de utilidad para dimensionar la torre. La figura 7 muestra cómo la variación en el gasto a  $T_{bh}$ , diferencial de temperaturas y capacidad térmica constantes propicia una variación en el tamaño de la torre.

---

<sup>1</sup> ASME Power Test Code on Atmospheric Water Cooling Equipment



*Figura 7. Efecto de la variación del gasto sobre el tamaño de la torre*

(e) Rango (*Range*)

La selección del rango de enfriamiento óptimo depende de las características de operación del equipo al cual se le suministra agua de enfriamiento así como del tipo de torre de enfriamiento seleccionado. El rango no está en función del tipo de torre de enfriamiento pero sí es función de la capacidad térmica y del gasto.

En general, los rangos pueden clasificarse como largos (25°F - 65°F); medianos (10°F - 25°F) y cortos (5°F - 10°F). Los rangos largos se utilizan generalmente en refinerías y en fundidoras de acero; los medianos en plantas generadoras de condensados de vapor y en muchos otros procesos; los cortos se utilizan en acondicionamiento de aire, refrigeración y ciertos procesos críticos. El rango se determina con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\text{Rango, } ^\circ\text{F} = \frac{\text{Capacidad térmica en BTU}/\text{min}}{\text{lb agua}/\text{min}}$$

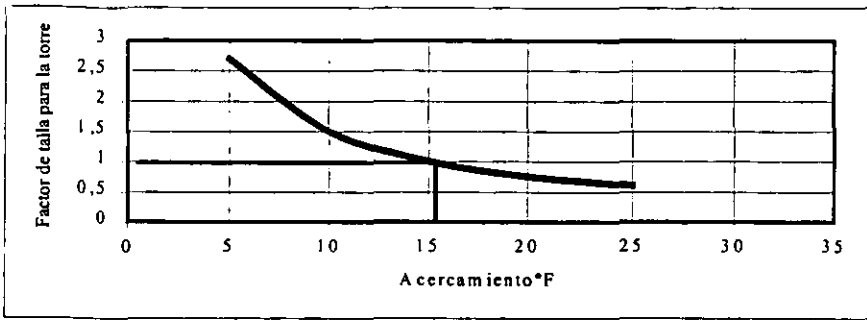
O bien

$$\text{Rango, } ^\circ\text{F} = \frac{\text{BTU}/\text{min}}{\text{GPM} * 8.33}$$

(f) Acercamiento o aproximación (*Approach*)

Se puede decir que el acercamiento es la variable más importante de entre las que consideran a la temperatura pues se trata de la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo que como ya se dijo antes es la mínima temperatura a la cual puede enfriarse el agua.

De las variables involucradas, el acercamiento es el que puede tener mayor repercusión en el tamaño y costo de la torre; a una capacidad térmica dada, el tamaño de la torre aumenta conforme el acercamiento disminuye. La figura 8 muestra cómo influye la variación del acercamiento en el tamaño de la torre.



*Figura 8. Efecto de la variación del acercamiento sobre el tamaño de la torre*

### (g) Pérdidas (*Losses*)

En una torre de enfriamiento existen tres tipos de pérdidas:

- Pérdidas por arrastre ( $A_a$ )
- Pérdidas por evaporación ( $A_e$ )
- Purgas ( $A_p$ )

Las primeras se deben a la presencia del viento que se lleva consigo pequeñas gotas de agua; este tipo de pérdida es común en torres de tiro inducido y de tiro forzado pues el viento pasa a través de las mismas; las pérdidas por arrastre en torres hiperbólicas son casi nulas.

Las pérdidas por evaporación pueden alcanzar porcentajes significativos en lugares donde la temperatura ambiente es alta la mayor parte del año y por ende la evaporación del agua es constante.

Las purgas se llevan a cabo para regular los ciclos de concentración de una torre y son consecuencia directa de los dos tipos de pérdidas antes citados así como de la calidad del agua. El agua de la torre comienza a evaporarse y los sólidos presentes en ella se van concentrando; llega un momento en que la acumulación de sólidos en el bacín es muy grande y es necesario purgar. El número de ciclos que completa el agua de la torre antes de ser purgada recibe el nombre de ciclos de concentración. Los ciclos de concentración

pueden calcularse base sílice o base conductividad simplemente haciendo la diferencia entre la concentración de sílice o la conductividad a la entrada y a la salida de la torre.

La experiencia ha llevado a formular relaciones<sup>2</sup> para calcular estas pérdidas con la finalidad de conocer el volumen de agua de repuesto ( $A_r$ ) necesario para completar el volumen constante de agua en la torre ( $A_t$ ).

$$A_e = 0.00048 A_t (\Delta T)$$

$$A_a = 0.002 A_t$$

$$A_p = \frac{A_e}{\text{ciclos de conc.} - 1}$$

$$A_r = A_e + A_a + A_p$$

A partir de estas relaciones es posible también calcular los ciclos de concentración como:

$$\text{c.c.} = \frac{A_p + A_a}{A_r}$$

#### (h) Factor de seguridad (*Safety consideration*)

Todo proyecto de construcción debe tener en cuenta consideraciones de seguridad; la torre de enfriamiento no es la excepción. En primer lugar, debe tomarse en cuenta un factor de seguridad de diseño; antiguamente muchos diseñadores tomaban valores arbitrarios tales como  $\pm 3$  grados, valor que aunque parece pequeño traducido a costo total de la torre representa un incremento en un 50%. Cálculos de este tipo se hicieron durante mucho tiempo cuando el dimensionamiento de torres era aún un arte y no una técnica como lo es hoy en día.

Hoy se tienen una serie de consideraciones preestablecidas para llevar a cabo este trabajo:

---

<sup>2</sup> PERRY, *Manual del Ingeniero Químico*, 6ª edición

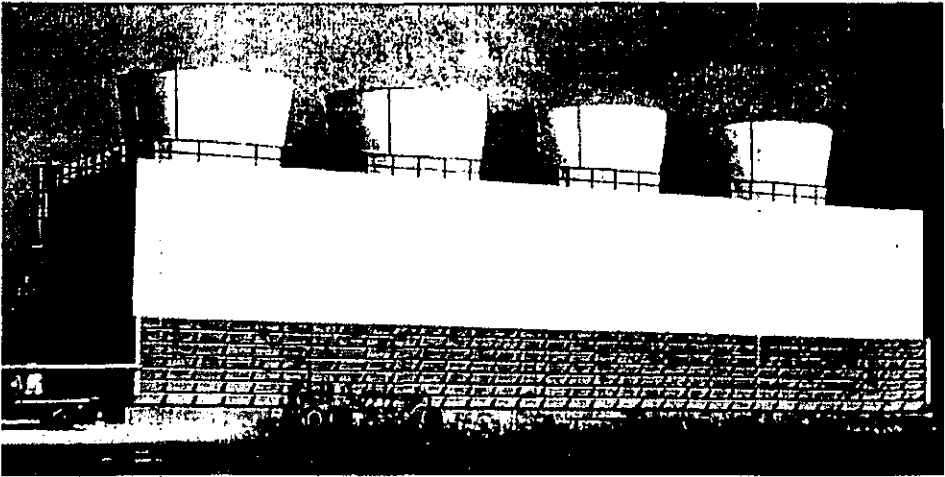
- 1) El factor de seguridad únicamente se aplica al flujo en GPM
- 2) Si se aplica un pequeño factor de seguridad al acercamiento, otro al rango, otro más a los GPM y un último a la Tbh; puede dar como resultado un factor de seguridad total del 100%
- 3) La aplicación de un factor de seguridad a la carga térmica puede repercutir en un cambio en la temperatura de salida del agua

- *En el diseño térmico de una torre de enfriamiento hay que poner especial cuidado en las condiciones climatológicas de la región; con la finalidad de obtener los valores más precisos es necesario hacer un análisis estadístico de la temperatura de bulbo húmedo a lo largo del año y durante los meses en los que se presentan temperaturas extremas así como la variación a lo largo del día*
- *No deberá nunca diseñarse una torre para un gasto mucho mayor al que se tiene; el gasto de diseño será el gasto calculado multiplicado por un factor de seguridad*
- *Un acercamiento mal calculado multiplicado por un factor de seguridad propicia un sobrediseño en el tamaño de la torre que repercute directamente en el aumento del costo total*
- *Es importante considerar el volumen de pérdidas que puede tener la torre para así seleccionar el tipo de torre que minimice estas pérdidas o bien para evaluar alternativas de ahorro de agua*
- *Para cada tipo de proceso involucrado existe un diseño específico de torre de enfriamiento. Por lo tanto, no se deben utilizar diseños hechos para otro tipo de proceso; por ejemplo, no se debe colocar una torre de enfriamiento diseñada para una refinería en una planta generadora de vapor*

## 2. Estructural y mecánico

Una torre de enfriamiento está formada por una serie de componentes individuales con una función específica. Todos estos componentes deben integrarse en una sola estructura que proporcione larga vida, pocos o nulos problemas y un servicio eficiente. Es por ello que el diseño de una torre de enfriamiento requiere del conocimiento de muchos principios básicos de ingeniería tanto química como civil y mecánica. Requiere también de la aplicación práctica de estos principios utilizando las mejores técnicas y materiales para obtener los mejores resultados.

Estructuralmente las torres son de dos tipos: torres estructurales (Fig. 9), las cuales se caracterizan por la facilidad con la que se puede acceder a su interior y torres compactas (Fig. 10) las cuales son más pequeñas y completamente cerradas.





*Figura 9. Torre estructural a contracorriente*



*Figura 10. Torre compacta a contracorriente*

(a) Estructura (*Framework*)

El material estructural debe tener la capacidad de agrupar a todos los elementos de la torre en una unidad compacta que cumpla con sus funciones aún en condiciones adversas de operación.

El diseño adecuado de la estructura de una torre es una complicada tarea pues debe proporcionar estabilidad y ser compatible con los requerimientos térmicos, aerodinámicos, económicos y de montaje.

La torre de enfriamiento debe soportar la carga de los componentes tales como el equipo mecánico así como la carga del agua, del viento y la posible ocasionada por un temblor. Además, la estructura debe ser resistente a la corrosión, al ataque de diversas sustancias químicas variables según el tipo de agua y no debe propiciar el crecimiento de moho y demás colonias bacterianas. La tabla 2 presenta los diferentes materiales utilizados para estructuras.

Madera: La madera utilizada para construir es generalmente la de secoya (*redwood*); en ocasiones también se utiliza madera de abeto (*fir*). En nuestro país no existen árboles de secoya y los géneros existentes de abeto no sirven como madera estructural; sin embargo, existen algunos géneros y especies de pino propios para la construcción tal como el

conocido como “pinabeto” (*pinus chiapensis*). México es el país que tiene más pinos en el mundo; así que esta madera es una buena opción para construir en nuestro país. Es un material que se utiliza por su disponibilidad, porque es fácil trabajarla y por su durabilidad bajo condiciones de operación adversas. La madera es un material de construcción muy utilizado en las torres pues es de fácil ensamblaje y además las partes deterioradas pueden sustituirse sin la necesidad de cambiar todo el armazón. Con la finalidad de prevenir la putrefacción de la madera se pueden aplicar distintos tipos de tratamiento citados en la tabla 3.

Tabla 3. Tipos de material utilizados par estructuras de torres de enfriamiento

Tipo de material	Subtipos
Madera	Preservada con aditivos base agua
	Creosota (alquitrán de carbón)
	Preservada con aditivos base aceite
Acero	Inoxidable
	Galvanizado
	Al carbón
	Anodizado y galvanizado
Concreto	
Fibra de vidrio (pulverizada)	Convencional
	Plástico reforzado con fibra de vidrio
Asbesto – cemento	

- (a) *Preservación con aditivos base agua.* Estos aditivos son generalmente sales metálicas tales como dicromato de potasio, sulfato de cobre, dicromato de sodio y sulfato de zinc. Según se combinen estos compuestos serán los resultados. Existen cuatro combinaciones utilizadas en la actualidad:

## 1. Arseniato de cobre cromatado tipo A

Dicromato de potasio	56.0%
Sulfato de cobre	33.0%
Ácido arsénico	11.0%

Formación de precipitados insolubles sobre la madera

## 2. Cromato de cobre ácido

Sulfato de cobre	50.0%
Dicromato de sodio	48.3%
Ácido crómico	1.7%

Formación de precipitados insolubles sobre la madera

## 3. Arseniato de cobre – amoniaco

Hidróxido de cobre	57.7%
Trióxido de arsénico	40.7%
Ácido acético	1.6%

Los compuestos se disuelven en una solución de amoniaco débil (3%); el amoniaco se evapora después de la impregnación y da lugar a la formación de precipitados insolubles.

## 4. Arseniato cromático de zinc

Ácido arsénico	20.0%
Arseniato de sodio	21.0%
Dicromato de sodio	16.0%
Sulfato de zinc	43.0%

Formación de precipitados insolubles sobre la madera

(b) *Preservación con creosota (alquitrán de carbón)*. La solución preservante de creosota se puede hacer de 50 al 80% de concentración. La dilución se hace ya

sea con destilado de carbón o bien con aceite de petróleo. Un problema de la madera preservada con creosota es que no soporta los lixiviados.

- (c) *Preservación con aditivos base aceite*. Estos aditivos pueden ser pentaclorofenol en aceite al 5% o naftenato de cobre.

Acero: El acero se utiliza generalmente en torres de enfriamiento que no pueden ser armadas con un material combustible; además, muchas torres empacadas se arman con acero por ser más barato. El acero debe estar protegido de la corrosión; existen diversos revestimientos para lograr esto, el más común es el galvanizado. Otras capas utilizadas son pinturas plásticas y mastiques. Una opción más segura es el uso de acero inoxidable pero resulta ser una alternativa muy costosa. Recientemente se utiliza acero anodizado y galvanizado para asegurar una mínima o nula corrosión. El problema general que tienen las torres de acero, sin importar el tipo, es que propician la acumulación de sólidos suspendidos totales (SST) que repercuten directamente en la disminución de los ciclos de concentración y en la pérdida excesiva de agua a través de la purga.

Concreto: Las torres de enfriamiento de concreto resultan una buena opción en los países como el nuestro donde la mano de obra requerida para la construcción es barata. Son torres con un gran periodo de vida y que generan pocos problemas. Sin embargo, el concreto puede llegar a sufrir expansión debido a la diferencia de temperaturas y en el caso del agua que tiene sulfato de calcio en su composición es preferible no usar concreto o bien darle un pretratamiento al agua pues los depósitos de este compuesto provocan la desintegración.

Fibra de vidrio: Este material se utiliza principalmente en torres compactas, puede ser fibra de vidrio simple o bien plástico reforzado con fibra de vidrio (P.R.F.V.). El uso de este material da como resultado una estructura muy fuerte, de fácil montaje y desmontaje, resistente al ataque microbiológico, a la erosión y a la corrosión. El único inconveniente de este material es que sólo es propicio para torres de pequeña capacidad, de otra manera resultaría sumamente costoso.

Asbesto – Cemento: Este tipo de material se presenta en paneles de fácil colocación y de mantenimiento sencillo. Sin embargo, en muchos países hoy en día está prohibido, en México se recomienda no utilizarlo pues el asbesto es un agente cancerígeno.

### *Persianas de entrada (Inlet louvers)*

Las persianas de entrada sirven para evitar pérdidas de agua ocasionadas por el viento que entra a la torre y para que dicha entrada de aire sea eficiente. Las persianas deben permitir que el aire sea distribuido uniformemente con una mínima caída de presión y deberán tener una pendiente, un ancho, una separación y un grosor adecuados para prevenir la pérdida de agua. Si en la región se presentan heladas, las persianas deberán estar diseñadas para eliminar los problemas ocasionados por el hielo. Además, deberán resistir la atmósfera corrosiva en la que son instaladas.

Comúnmente las persianas se fabrican de madera, asbesto – cemento o con láminas de plástico. Un material relativamente nuevo para persianas es la fibra de vidrio y en el caso de las torres de acero, las persianas suelen ser de acero galvanizado.

La experiencia ha llevado a los fabricantes a establecer una serie de premisas respecto al diseño de las persianas:

1. Entre más área libre se proporcione, la entrada de aire es más efectiva
2. La capacidad de contención de agua es mayor cuando la pendiente de las persianas y el espacio entre ellas son mínimos
3. Entre más ancha es la persiana, más grande es la pendiente aceptable así como el espacio entre ellas

### *Revestimiento (Casing)*

La función primordial del revestimiento o cobertura es contener el agua dentro de la torre y prevenir la desviación del aire hacia el espacio diseñado para la entrada del mismo. Además, el revestimiento contribuye a mejorar el aspecto de la torre.

Los materiales más populares para fabricar el revestimiento de la torre son el panel de cemento – asbesto y el plástico reforzado con fibra de vidrio debido a su resistencia a la corrosión, a su costo y a su apariencia. El cemento – asbesto tiene además la ventaja de ser resistente al fuego. En torres de acero se utiliza muchas veces acero galvanizado resistente al fuego.

### *(b) Sistema hidráulico (Hydraulic system)*

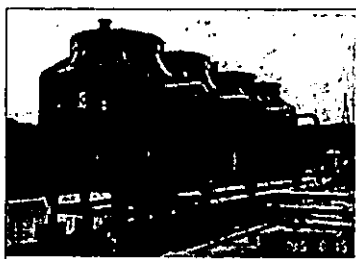
#### *Sistema de distribución y bombeo (Piping and distribution system)*

El sistema de distribución y bombeo de una torre de enfriamiento está formado por:

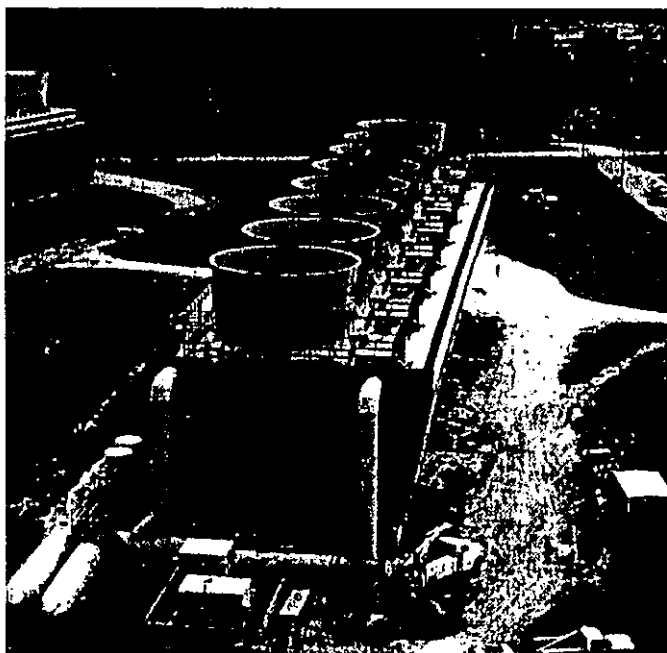
- Líneas de suministro y retorno
- Líneas de distribución
- Bombas

La instalación típica presenta la línea de suministro bajo tierra o bien a un costado y paralela al bacín con las tuberías de ascenso a los lados (Fig. 11) o bien con las tuberías de ascenso dirigidas a cabezales individuales (Fig. 12)

El material de las tuberías puede ser acero, fierro colado y concreto para la línea de suministro. Madera, fierro colado o acero para los cabezales. El sistema puede ser de flujo por gravedad o bien de flujo por presión. El primero se usa en raras ocasiones en torres a contracorriente pues la distribución del agua se vuelve poco uniforme.



*Fig. 11 Instalación típica con líneas de ascenso a los lados*



*Fig. 12 Instalación típica con líneas de ascenso dirigidas a cabezales individuales*

### ***Bacín (Bacin)***

La función principal del bacín es la de coleccionar el agua fría conforme cae por la torre. Es en el bacín donde se acumulan también los materiales que arrastra el aire y los que trae el agua consigo. El bacín puede ser fabricado con diversos materiales dependiendo de la ubicación de la torre.

Concreto armado: El bacín construido de este material cumple una doble función: la función ordinaria de un bacín y la de un cimientito. Pueden ser para una torre de cualquier material.

Madera: Estos bacines acompañan generalmente a una torre del mismo material. Son bacines generalmente planos provistos de sumideros. Para prevenir la ruptura debido a los movimientos provocados por la expansión térmica producto de la diferencia de temperatura, el bacín de madera se arma por piezas unidas con pernos (macho – hembra) los cuales sirven de amortiguador para evitar la ruptura. Todas las juntas deben estar adecuadamente selladas para que no existan goteras.

Acero: Los bacines de este material se utilizan en torres de acero ubicadas en lugares donde no es posible usar material combustible. La construcción puede hacerse de acero empernado o soldado. Si es empernado, las juntas deben sellarse para evitar goteras. Estos bacines requieren de protección contra la corrosión y un mantenimiento periódico en el mismo aspecto.

Tanto el bacín de acero como el de madera requieren de un soporte que normalmente es un emparrillado de acero o de concreto o bien de concreto armado. Este emparrillado debe estar adecuadamente nivelado y debe resistir cualquier deflexión mecánica. Se recomienda que el emparrillado se construya previniendo posibles ampliaciones de la torre y se deje ahí para luego montar sobre él la parte nueva. Cuando no se prevén las ampliaciones y se anexa el emparrillado nuevo comúnmente no se da la adherencia adecuada y la parte nueva queda separada.



Es importante, en el diseño del bacín, tener en cuenta que la función de éste no es la de almacenamiento y por ello no debe excederse la profundidad del mismo. Además, debe ser un bacín fácil de limpiar y provisto de sumideros que permitan la entrada del agua a velocidades de 0.30 a 0.45 m/s; los bacines muy profundos propician un decremento en la velocidad del agua.

### (c) Interior

El interior de una torre de enfriamiento está ocupado por el relleno, los eliminadores de rocío y otros accesorios menores. El funcionamiento eficiente de una torre depende de la existencia de un contacto íntimo y prolongado del agua y el aire. Esto se logra utilizando rellenos que ocupan gran parte del volumen de la torre

### **Relleno (Fill)**

La función del relleno en una torre de enfriamiento es acelerar la disipación del calor de la torre. Esto se logra, incrementando el tiempo de contacto entre el agua y el aire, aumentando la superficie húmeda y logrando una exposición continua entre la superficie del agua y el aire procurando la formación de pequeñas gotas que se depositen en forma de fina película.

El relleno de la torre debe ser barato y de fácil instalación. Debe procurar una máxima transferencia de calor y no debe presentar gran resistencia al flujo de aire. Además, debe mantener una distribución uniforme de aire y agua.

El relleno de una torre puede clasificarse como:

- 1) Tipo rocío o salpicadura (*Splash type*). Se usa principalmente en torres industriales o de gran tamaño. Existe una diversidad de arreglos para este tipo de relleno; la elección del arreglo depende del tipo de torre. Sin embargo, el objetivo sigue siendo el mismo: mezclar mecánicamente al agua y al aire. Esto se logra rociando o salpicando el agua

desde la parte más alta de la torre a través de cada nivel mientras el aire se mueve horizontal o verticalmente según el tipo de torre. Al colocar este tipo de relleno, es muy importante que quede bien soportado para evitar hundimientos o depresiones y que la torre esté adecuadamente nivelada para que el agua se reparta homogéneamente sobre toda la superficie del relleno.

El relleno puede fabricarse de madera, plástico, acero inoxidable, aluminio, fibra de vidrio, policloruro de vinilo (PVC), poliestireno de alto impacto (PAI) o cerámica. Pueden ser placas onduladas, corrugadas o apanaladas colocadas verticalmente, horizontalmente o con cierta inclinación como comúnmente sucede.

Este tipo de relleno es muy útil cuando el agua es de mala calidad pues retiene impurezas al servir de cierta forma como cernidor.

- 2) Tipo película (*Film type*). Se utiliza para torres empacadas o para torres comerciales de pequeño volumen. Se caracteriza por tener un mejor desempeño ocupando un área menor, sin embargo, es más costoso que el relleno tipo rocío. El buen desempeño de este relleno depende de su capacidad para esparcir el agua que cae en una fina capa o película que fluye sobre áreas extensas para exponer el agua al aire lo más que se pueda. Este tipo de relleno también tiene que estar adecuadamente soportado y espaciado uniformemente.

Comúnmente este relleno se hace en neopreno/asbesto con una configuración apanalada (similar a una panal de abejas). Este material es liviano, resistente al fuego y estructuralmente fuerte. En algunas ocasiones, también se utiliza asbesto cemento en hojas corrugadas el cual resulta ser barato pero es pesado y puede causar problemas de diseño estructural. Las hojas acanaladas fabricadas con plástico o neopreno/asbesto se han popularizado en los últimos años debido a su alta eficiencia. Otros materiales utilizados en casos particulares son acero inoxidable, acero galvanizado y aluminio.

### ***Eliminadores de rocío (Drift eliminators)***

La función principal de estos accesorios es eliminar el agua de arrastre de la descarga de aire. Básicamente, todos los eliminadores funcionan forzando a la descarga de aire a hacer cambios súbitos en su dirección. La fuerza centrífuga resultante de estos movimientos separa a las gotas de agua del aire depositándolas sobre la superficie del eliminador el cual las devuelve al interior de la torre. Otro beneficio otorgado por este accesorio es la igualación del flujo de aire a través del relleno de la torre.

Los eliminadores se clasifican normalmente en eliminadores de paso simple, de doble paso y de triple paso, dependiendo del número de cambios que experimente la corriente de aire. Normalmente entre más pasos, mayor será la caída de presión. El diseño de los eliminadores varía según el fabricante y según los requerimientos. Se fabrican de madera tratada, acero galvanizado, acero inoxidable, plástico, fibra de vidrio, PVC y asbesto.

### ***Accesorios menores (Hardware)***

Estos accesorios son todos los montajes, abrazaderas y juntas de la torre. En esta categoría se incluyen tornillos, arandelas o rondanas, clavos, tornillos, tuercas y demás piezas fundidas. Estos accesorios están sujetos a la influencia corrosiva del agua y del aire así que deben ser capaces de resistir este medio ambiente. El material de estos accesorios puede afectar el costo de la torre de una forma radical; por ejemplo, los tornillos de acero galvanizado son los más baratos y por ende los más utilizados mientras que los de silicón-bronce y los de acero inoxidable cuestan cinco veces más. Por ello es importante conocer la calidad del agua y su potencial corrosivo para no hacer gastos inútiles.

#### **(d) Ventiladores, motores y controles**

Un ventilador común para torre de enfriamiento tiene que alcanzar la velocidad de operación en aproximadamente 13 segundos; para lograr esto, el motor opera al 600% de

carga y si el tiempo excede el habitual entonces el interruptor de seguridad corta la corriente.

Los motores deben de operar en condiciones de extrema humedad y con la presencia de vapores químicos; además, puede existir lluvia, granizo o nieve: los motores pueden ser abiertos o completamente cerrados. Existen motores diseñados especialmente para torres de enfriamiento los cuales están fabricados previendo las condiciones climáticas adversas. Como se podrá inferir, una de las características más importantes a evaluar al seleccionar un motor para torre de enfriamiento es el tipo de material aislante que éste tenga; los materiales aislantes se clasifican como A,B, F y H según la máxima temperatura de operación que resistan siendo A el de peor clase y H el que resiste mayores temperaturas. Recientemente se utilizan motores encapsulados en plástico de tal forma que queden ajenos a la humedad, nieve, lluvia y demás.

Los controles del motor deben incluir mínimamente:

- Fusible de seguridad o interruptor de circuito
- Interruptor sin fusible
- Arrancadores manuales o magnéticos
- Cerca o valla para controles
- Diseño de la instalación eléctrica

*La clave de un buen diseño estructural para una torre de enfriamiento está en la selección adecuada de los materiales de construcción. El material elegido debe resistir las condiciones adversas existentes en una torre tal como humedad, viento, corrosión y presencia de ensuciamiento biológico. Para la construcción de torres estructurales en México, es recomendable utilizar concreto armado; la mayoría de los documentos relativos a construcción son de procedencia extranjera así como las compañías fabricantes y normalmente prefieren la madera. Esto se debe a que en Estados Unidos, Canadá y Europa la mano de obra es muy cara y construir utilizando concreto armado resulta muy costoso. En Latinoamérica, la mano de obra es barata mientras que la madera resulta cara pues muchas veces hay que importarla a menos que se evalúe el uso de madera de pino. Así que no hay que olvidar esto al diseñar una torre.*

*El PRFV es un material de uso relativamente reciente para torres de enfriamiento compactas que a pesar de ser costoso en comparación con otros proporciona estabilidad, durabilidad y eficiencia. Una torre compacta de PRFV siempre será una buena inversión.*

*En lo que respecta al diseño mecánico es importante tener como prioridad la seguridad; por lo tanto deberán elegirse motores, bombas, tuberías y motores que no pongan en riesgo la operación de la torre y a la gente que en ella labora. No hay que escatimar excesivamente en este sentido.*

## CAPÍTULO III

### SELECCIÓN DEL TIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO

El segundo paso en el diseño de una torre de enfriamiento es la selección del tipo de torre óptimo de acuerdo a las necesidades particulares. Los parámetros de decisión son los siguientes:

- **Tipo de proceso involucrado** (el que se lleva a cabo en el lugar donde se instalará la torre). El tipo de materiales a utilizar para la construcción de una torre, así como sus dimensiones y tipo están sujetos al tipo de proceso involucrado.
  
- **Situación geográfica.** En este punto habrá que considerar la altitud sobre el nivel del mar así como el tipo de suelo existente en la región; de tal forma que los valores dados para el diseño sean los más apegados a la realidad. Cuando una planta está ubicada a una gran altura s.n.m, los volúmenes de aire que se tienen que mover son mayores que los utilizados a una altitud menor para el mismo proceso de enfriamiento
  
- **Condiciones climatológicas de la región.** Es importante determinar las temperaturas de bulbo seco y húmedo prevalecientes en la región, así como el intervalo de temperaturas del agua pues serán datos necesarios para elaborar la curva de operación de la torre la cual servirá para obtener el diseño térmico. Además, es importante saber si hay tormentas de arena o ventarrones pues habrá que evitar que entre aire en exceso o arena eligiendo un tipo de torre que presente una menor exposición al viento. Además, la profundidad del bacín aumentará si la torre está expuesta a la entrada de arena o tierra, para permitir así un mejor asentamiento de partículas.  
Otro fenómeno natural que afecta la operación de una torre son las temperaturas por debajo de los cero grados Celsius pues tienen como consecuencia la formación de hielo en la torre.

- **Flujo de agua de enfriamiento requerido.** Este valor indicará el tamaño que deberá tener la torre y por lo tanto qué tipo de torre es la más adecuada para manejar dicho volumen.
- **Presupuesto.** El costo de la torre dependerá del diseño de la misma, del tamaño y del material que se elija para su construcción.

Con base en estos criterios, se podrá hacer la selección de entre los tipos de torres existentes. Las torres de enfriamiento se clasifican de diversas formas; la clasificación más utilizada es la que se presenta a continuación.

En primera instancia, una torre de enfriamiento puede ser húmeda o puede ser seca. Las torres húmedas son las más utilizadas y se puede decir que están totalmente probadas; las secas son menos populares; sin embargo, son una alternativa que siempre debe ser evaluada.

## TORRES HÚMEDAS

1. **Torres atmosféricas de esprea (*Atmospheric Spray Towers*).** Estas torres se utilizan principalmente para cargas de aire pequeñas y condiciones poco críticas. Tienen costos de instalación, operación y mantenimiento bajos. Son torres que no proporciona flexibilidad de operación. (Fig. 13)

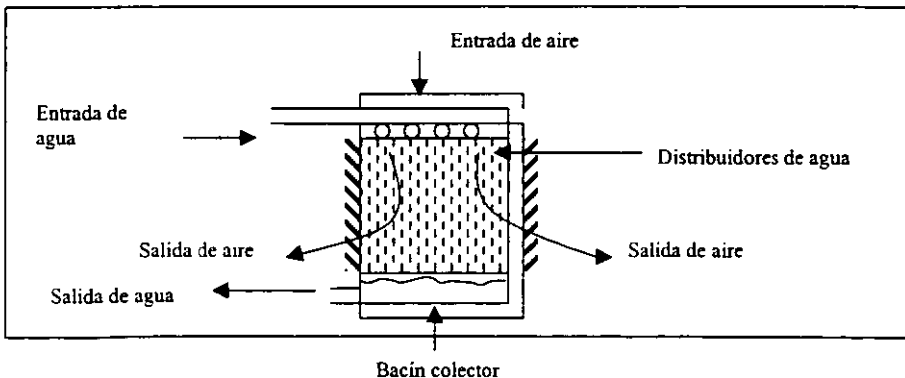


Fig. 13 Torre atmosférica de esprea

2. **Torres de tiro mecánico (*Mechanical Draft Towers*)**. Son las torres más utilizadas por su gran número de características deseables: su funcionamiento térmico es independiente de la velocidad del viento, ocupa espacios pequeños, pueden ser diseñadas para uso comercial o industrial en cualquier tamaño. Además, existe más de un tipo de torre de tiro mecánico:

(a) **Torre de tiro inducido a contracorriente (*Induced draft counterflow tower*)**. Esta torre empuja aire hacia arriba a contracorriente con las gotas de agua que bajan. El aire entra por la parte inferior en ambos costados de la torre. Está equipada con ventiladores en la parte superior. No es una torre recomendable para lugares donde caen heladas. Desde el punto de vista termodinámico, esta configuración es más eficaz ya que el agua más fría está en contacto con el aire más frío obteniendo así un máximo potencial de entalpía. (Fig.14)

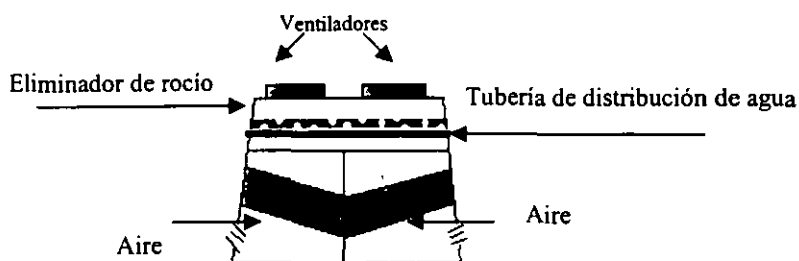


Fig. 14 Torre de tiro inducido a contracorriente

(b) **Torre de tiro inducido y flujo cruzado (*Induced draft crossflow tower*)**. El aire entra horizontalmente en forma perpendicular a la caída de agua. Esta torre posee menos resistencia al flujo de aire. Está equipada con ventiladores en la parte superior. Este tipo de torre es mucho más utilizado que el anterior pues posee claras ventajas: la cantidad de aire circulando es mayor que en la torre de tiro inducido a contracorriente, este tipo de torres puede ser mayor, la cabeza estática de bombeo es menor, existe menor recirculación, el bacín posee la particularidad de segregar al agua de acuerdo a su temperatura dejando la más fría a las orillas, puede operar sin mayor problema en regiones donde el invierno



va acompañado de heladas y/o nevadas y puede trabajar con agua grasosa o con un considerable contenido de partículas sedimentables. Existen tres tipos de torres de flujo cruzado: de doble flujo, de flujo sencillo y de subflujo. (Fig.15)

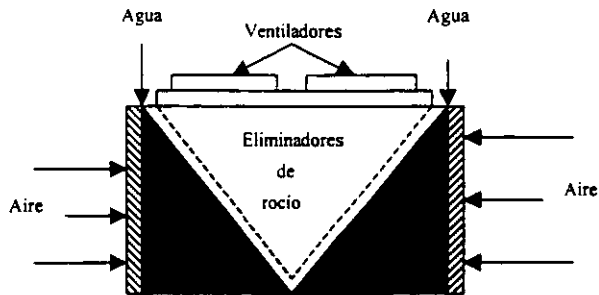


Fig. 15 Torre de tiro inducido y flujo cruzado

- (c) **Torre de tiro forzado (Forced draft tower).** Los ventiladores de esta torre se localizan a un costado de tal forma que se fuerce al aire a subir por la torre mientras que el agua baja; es decir, el agua y el aire operan a contracorriente. La figura 16 muestra el esquema de una torre de este tipo.

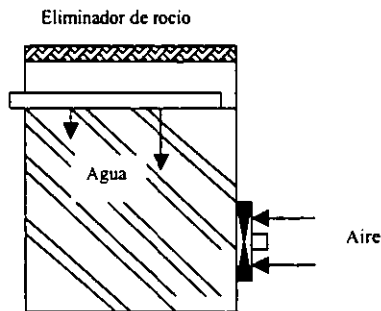


Fig. 16 Torre de enfriamiento de tiro forzado

3. **Torres Hiperbólicas** (*Hyperbolic Towers*). Son torres de tiro natural que están diseñadas para cumplir un propósito especial: aplicaciones industriales de gran capacidad. Son torres costosas pero ocupan un reducido espacio en planta, consumen poca energía, tienen un costo de bombeo bajo, larga vida útil, mínimo mantenimiento y eliminan cualquier clase de rocío, neblina y recirculación. Son muy utilizadas en la industria de generación de electricidad pues es una industria que requiere el enfriamiento de grandes volúmenes de agua a un bajo costo de operación. Existen dos tipos de torres hiperbólicas: de flujo cruzado (fig. 17) y a contracorriente (fig. 18). Estas torres operan igual que su análoga dentro de la clasificación de tiro inducido con la diferencia de que las hiperbólicas no emplean ventiladores pues el flujo de aire se crea por sí solo gracias a la altura de la chimenea.

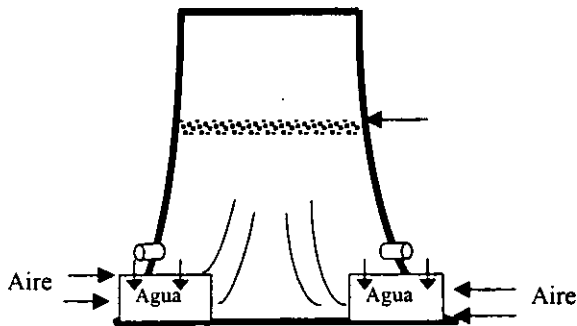


Fig. 17 Torre hiperbólica de flujo cruzado

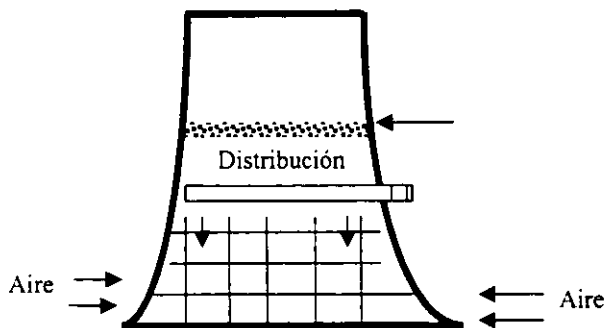


Fig. 18 Torre hiperbólica a contracorriente

4. **Torres de bobina** (*Coil Towers*). Frecuentemente se utilizan torres a contracorriente o de flujo cruzado en conjunción con un circuito cerrado de enfriamiento; la sección de intercambiadores de calor se coloca en una nave embobinada. Esto se hace cuando se requiere un control de temperaturas múltiple. Una torre de bobina no es más que el acoplamiento de una torre de tiro mecánico y un sistema de intercambiadores de calor los cuales reciben el agua enfriada por la torre y homogeneizan su temperatura.

## TORRES SECAS

1. **Torres secas de tipo indirecto** (*Indirect dry-type Cooling Tower*). Este tipo de torre también recibe el nombre de sistema Heller. En este sistema, el vapor se condensa inyectándolo en el condensador de agua que se enfría con la ayuda de un intercambiador de calor. Los principales componentes de este tipo de torre son: (1) un condensador de vapor de contacto directo, (2) bombas de circulación de agua, (3) turbina de recuperación de agua (opcional), (4) bobinas de enfriamiento, y (5) un medio para mover el aire a través de las turbinas; ya sea una torre de tiro natural o un ventilador de tiro mecánico. La figura 19 presenta un diagrama del funcionamiento de esta torre.
2. **Torres secas de tipo directo** (*Direct dry-type Cooling Tower*). Los componentes principales de este tipo de torre son: (1) tronco de agotamiento de vapor, (2) bobinas de enfriamiento, (3) ventiladores accionados por motor y (4) bombas de condensación. La figura 20 muestra a través de un diagrama la operación de este tipo de torres. Este tipo de torres es de menor capacidad en cuanto a volumen de vapor se refiere pues las turbinas no exceden los 300 kW mientras que en las de tipo indirecto se pueden generar más de 1,000 MW.

Las torres de tipo seco son útiles en lugares donde el agua de enfriamiento, por alguna razón es muy costosa; por ejemplo por carencia de agua en la región o bien porque las pérdidas por evaporación son excesivas. Uno de los parámetros más importantes en el

diseño de este tipo de torres es el diferencial inicial de temperatura (DIT) entre el vapor y el aire del ambiente que entra a la torre. Las ventajas de las torres secas sobre las húmedas se pueden resumir como:

- No se requiere agua de repuesto
- Se elimina la posibilidad de contaminación de condensados y por ende, la unidad de tratamiento de condensados
- Se elimina el tratamiento del agua de repuesto
- Se reducen los efluentes contaminados
- Se eliminan los residuos del tratamiento del agua de repuesto y por lo tanto se elimina también el problema de disposición de estos residuos
- El costo de operación es menor

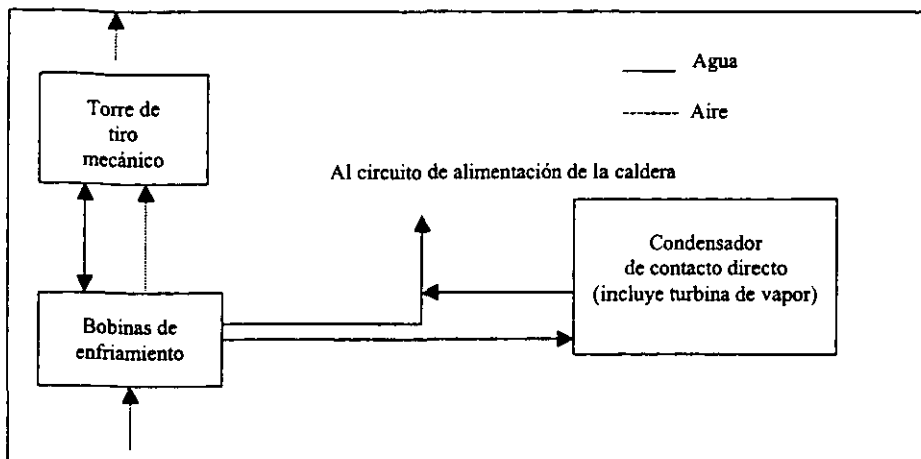


Fig. 19 Funcionamiento de una torres seca de tipo indirecto

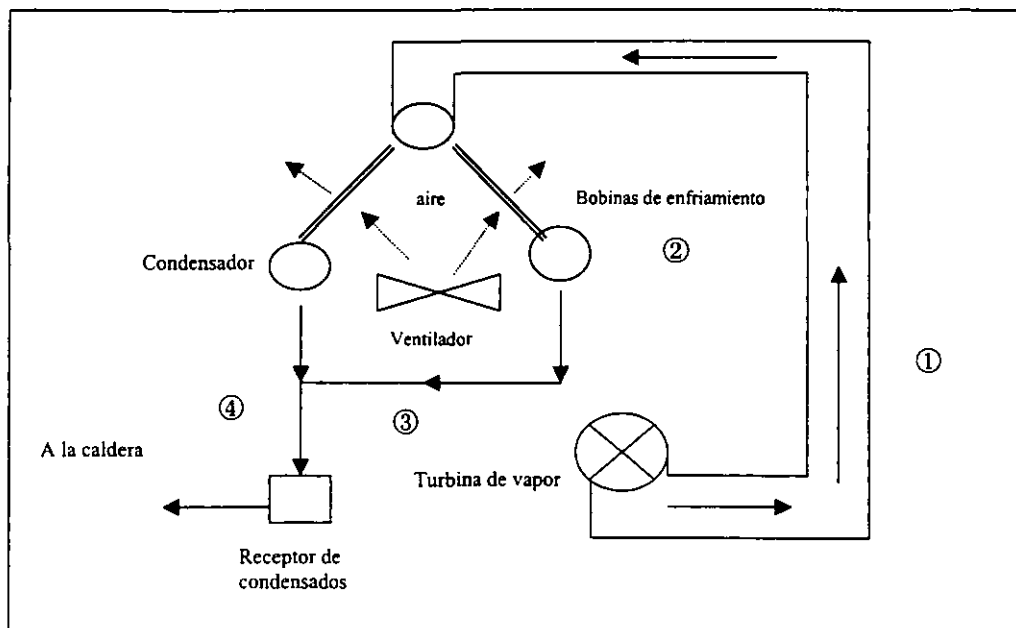


Fig. 20 Funcionamiento de una torre seca de tipo directo

***En la selección del tipo de torre de enfriamiento considero que los puntos más importantes a tomar en cuenta son:***

- 1. Conocimiento de todos los tipos de torres de enfriamiento existentes (funcionamiento, tamaño, ventajas, desventajas)***
- 2. Situación geográfica***
- 3. Condiciones climatológicas***
- 4. Tipo de proceso involucrado***

***Además, reitero que es de suma importancia tomar en cuenta los valores históricos para las condiciones climatológicas de la región y llevar a cabo un riguroso análisis estadístico para determinar la tendencia de la temperatura y humedad a lo largo del año así como la presencia de viento. De esta forma se podrá seleccionar la torre que mejor cumpla con las necesidades específicas.***

***Si varios tipos de torre se ajustan a nuestras necesidades, es recomendable hacer una relación de ventajas y desventajas de cada una de ellas así como un análisis económico rápido para saber cuál es la que más nos conviene.***

## CAPITULO IV

### PRUEBA

Sólo existe una forma de saber si la torre de enfriamiento que se diseñó y construyó funciona como se planeó: llevar a cabo una prueba. La exactitud de esta prueba depende de muchas variables, algunas controlables y otras fuera de nuestro alcance. Raras veces es posible llevar a cabo la prueba con las condiciones de diseño; sin embargo algunas asociaciones como la ASME<sup>1</sup> en Estados Unidos han elaborado manuales para llevar a cabo las pruebas en torres de enfriamiento indicando los límites para las condiciones de operación.

Los pasos a seguir para llevar a cabo adecuadamente la prueba son los siguientes:

#### 1. Preparación

Antes de iniciar la prueba, la torre de enfriamiento debe cumplir con lo siguiente:

- a) El sistema de distribución de agua debe de estar limpio y regulado para que el agua se distribuya homogéneamente
- b) El relleno debe estar nivelado y limpio
- c) Los eliminadores de rocío deben estar perfectamente limpios
- d) Deben colocarse los aparatos de medición necesarios para obtener lecturas de temperatura y flujo de agua
- e) El flujo debe ajustarse lo más posible al de diseño
- f) Los ventiladores deben ajustarse para que no requieran más caballos de fuerza que los existentes
- g) Todos los tornillos, tuercas y demás accesorios deben estar ajustados
- h) Los motores deben estar lubricados
- i) Las conexiones eléctricas deben ser adecuadas y seguras
- j) El bacín debe estar limpio y vacío
- k) Deben funcionar por lo menos el 75% de las celdas

---

<sup>1</sup> American Society of Mechanical Engineerings – Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos

## 2. Instrumentación

Los datos que se tienen que obtener de una prueba de torre de enfriamiento son: flujo en GPM, temperatura del agua fría y del agua caliente, temperatura de bulbo húmedo, caballos de fuerza utilizados por los ventiladores, cabeza de la bomba, presión de descarga del agua de recirculación y velocidad del viento.

Para llevar a cabo estas mediciones es necesario contar con los siguientes instrumentos:

- a) Para medir el flujo de agua se puede usar un tubo pitot de medición, platos de orificio o un medidor venturi o bien, puede usarse un manómetro para medir la caída de presión y de ahí obtener el flujo. En algunas ocasiones el flujo se obtiene de la curva de operación de las bombas pero esto no genera valores precisos.
- b) Termómetros de mercurio o termopares para medir temperaturas; se recomienda hacer varias mediciones por si existe variación, especialmente del agua fría. La descarga de la bomba es un buen punto para medir la temperatura del agua fría
- c) Un psicrómetro para medir la temperatura de bulbo húmedo. El bulbo debe humedecerse en agua destilada
- d) Un motor eléctrico para medir los caballos de fuerza. La eficiencia se obtiene de la información proporcionada por el fabricante
- e) La cabeza de la bomba se define como la presión requerida para llevar el agua del bacín al sistema de distribución que se localiza en la parte superior de la torre. Se obtiene sumando la presión de la velocidad del agua en la tubería, la presión estática y la distancia vertical (del bacín al sistema de distribución)

## 3. Condiciones de operación

El código ASME permite los siguiente porcentajes de desviación respecto al diseño para llevar a cabo la prueba:



Flujo de agua	$\pm 10\%$ del diseño
Capacidad térmica	$\pm 20\%$ del diseño
Rango	$\pm 20\%$ del diseño
Temperatura de bulbo húmedo	3° por arriba ó 7° por abajo del diseño
Velocidad del viento	Generalmente menos de 10 MPH (16 km/h)

#### 4. Ejecución

El éxito de la prueba, depende en gran medida de la estabilidad de las condiciones de operación; es mucho más importante que las condiciones prevalezcan lo más estables posible a que se acerquen a las condiciones de diseño. Durante la ejecución de la prueba, es entonces, de suma importancia controlar las variables de operación que sean controlables como el flujo de agua, por ejemplo. La temperatura de bulbo húmedo es una variable de operación muy importante pero que está fuera de nuestro control; si existen variaciones importantes entonces la prueba se deberá limitar a intervalos de tiempo donde la variación de esta variable sea mínima.

Para llevar a cabo la prueba, es importante establecer un plan de toma de datos y tener el personal suficiente para tomar los datos y/o llevar a cabo las mediciones necesarias. Los intervalos de tiempo recomendados para tomar los datos son los siguientes:

Flujo de agua	3 lecturas por hora
Temperatura del agua caliente	12 lecturas por hora
Temperatura del agua fría	12 lecturas por hora
Temperatura de bulbo húmedo	36 lecturas por hora
Velocidad del viento	12 lecturas por hora
Flujo de agua de recirculación	3 lecturas por hora

En el anexo II se presenta un ejemplo de un plan de toma de datos para ejecutar una prueba con una duración de 3 horas.

## 5. Análisis de resultados

El primer paso en el análisis de los resultados es hacer todos los cálculos estadísticos pertinentes; se recomienda que éstos incluyan por lo menos:

- Promedio aritmético para todas las temperaturas
- Moda de las temperaturas
- Desviación estándar de las temperaturas

Después se deberán obtener el rango el cual se utilizará para leer las gráficas presentadas en el anexo III y obtener el área requerida y el área disponible. El cociente de estos dos términos multiplicado por 100 indica qué porcentaje de eficiencia de enfriamiento tiene la torre. Además, el área disponible se utiliza para saber qué tan eficiente será la torre operando a condiciones diferentes a las de diseño.

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo llevar a cabo el análisis de resultados.

	<b>DISEÑO</b>	<b>PRUEBA</b>
GPM	10, 000	10,930
T agua caliente (°F)	105	99.5
T agua fría (°F)	85	81.4
T bulbo húmedo (°F)	78	72.2
Rango (°F)	20	18.1
Acercamiento (°F)	7	9.2

*Área requerida* – Utilizando las gráficas a, b y c del anexo III se obtiene el factor de área relativa para el punto intermedio; con una temperatura de bulbo húmedo de entre 60 y 80 °F (para interpolar 78 °F), un rango de 20 °F y un acercamiento de 7 °F se obtiene:

Gráfica a, Tbh de 60 °F = factor de área 3.82

Gráfica b, Tbh de 70 °F = factor de área 2.74

Gráfica c, Tbh de 80 °F = factor de área 1.87

Estos valores se localizan en la gráfica d y se tiene que para una temperatura de bulbo húmedo de 78 °F, el factor es 2.06 el cual se sustituye en la siguiente ecuación:

$$\text{Área relativa requerida} = (\text{Factor de área relativa}) \times (\text{GPM})$$

$$\text{ARR} = 2.06 (10,000) = 20,600$$

*Área disponible* – El área disponible se obtiene de la misma forma que el área requerida pero utilizando los datos de la prueba. En este caso se requiere interpolar la temperatura de bulbo húmedo y el acercamiento pues no son valores exactos que se puedan localizar en la gráfica directamente.

En este caso se utilizan las gráficas e y f y se obtiene un factor de 1.80 para un acercamiento de 9.2 °F, un rango de 18.1 °F y una temperatura de bulbo húmedo de 72.2 °F. Sustituyendo en la ecuación utilizada para el área requerida obtenemos:

$$\text{Área relativa disponible} = 1.80 (10,930)$$

$$\text{ARD} = 19,674$$

*Análisis de resultados* – La capacidad de la torre se define, como ya se dijo antes, con el radio de las áreas relativas multiplicado por cien.

$$(\text{ARD/ARR}) \times 100 = (19,674/20,600) \times 100 = 95.5\%$$

Esto quiere decir que la torre trabajará al 95.5% de su capacidad de diseño.

***Al llevar a cabo una prueba para torre de enfriamiento es importante:***

- ***Elegir las condiciones de operación más apegadas al diseño y al mismo tiempo que sean valores fáciles de establecer pues no hay que olvidar que la torre operará idealmente siempre con esos valores***
- ***Que la torre esté completamente terminada, que todo funcione y esté limpio***
- ***Tener los instrumentos de medición adecuados y que el plan de toma de datos incluya por lo menos el mínimo de mediciones requeridas***
- ***Mantener estables las condiciones de operación a lo largo de la ejecución de la prueba***
- ***Llevar a cabo la prueba en un día en el cual las condiciones climatológicas sean el prototipo de la región***
- ***Hacer un adecuado análisis de resultados***

## CAPÍTULO V

### OPERACION Y CONTROL

#### 1. Calidad del agua

La calidad del agua de una torre de enfriamiento determina, junto con la evaporación atmosférica, los ciclos de concentración y por lo tanto, el volumen de agua de purgas. Además, la calidad del agua propiciará o abatirá, según el caso, la corrosión, incrustación de sales y ensuciamiento tanto químico como biológico. Es por esto, que antes de arrancar la operación de una torre de enfriamiento exista un sistema de pretratamiento y/o un tratamiento lateral para el agua que entra a la torre.

##### a) Corrosión (*Corrosion*)

La corrosión puede definirse como la destrucción de un metal ya sea por la acción química directa o por la acción electrolítica del metal y el medio que lo rodea. La corrosión en medio acuoso, como la que se da en una torre de enfriamiento, es explicada por la electroquímica como una reacción de óxido – reducción o intercambio de electrones entre diferentes sistemas.

Existen dos tipos de corrosión según la clasificación de Champion:

- i) Corrosión general. Es aquella que se presenta uniformemente en la superficie metálica expuesta al medio
- ii) Corrosión localizada o por pitting. Es aquella que se presenta en pequeñas áreas localizadas, donde el ancho de ataque es igual o menor a la profundidad del ataque

El agua que contiene sales inorgánicas disueltas, ácidos o bases altamente ionizables, metales disímiles, turbiedad, materia suspendida, contaminantes de proceso y/o

contaminantes microbiológicos tiene un alto potencial corrosivo. Este potencial corrosivo se determina cuantificando a través de un análisis fisicoquímico:

- pH
- Oxígeno disuelto
- Dióxido de carbono
- Cloruros
- Sulfatos
- Conteo de bacterias totales (CBT) o bacterias sulfato reductoras
- Hongos y algas
- Turbiedad
- Sólidos disueltos totales (SDT)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Metales disímiles

Si hay posibilidad de que existan debido al proceso:

- Hidrocarburos
- Ácido sulfhídrico
- Mercaptanos
- Aminas

*b) Incrustación (Scaling)*

La incrustación se define como una cobertura densa de materiales predominantemente inorgánicos que resultan de la sobresaturación del agua con minerales solubles. Los depósitos reducen la transferencia de calor e incrementan la caída de presión a través de los cambiadores del sistema. Los factores que propician la incrustación son: velocidad del agua superior a 3 pies/s, el clima que propicia la descomposición bacteriana, agua con contenido de dióxido de azufre, calcio, magnesio, carbonatos; el aire que transporta tierra, fibras, gases, microorganismos; el calentamiento del agua al paso por un cambiador de calor; y la existencia de madera en proceso de deterioro en las torres.

Existen variables que es importante determinar para saber qué tanto potencial de corrosión e incrustación tiene el agua:

- *Índice de saturación o índice de Langelier*. Cuantifica la tendencia del agua a precipitar o disolver carbonato de calcio

$$\text{Índice de saturación} = \text{pH} - \text{pHs}$$

$$\text{pHs} = \text{pCa} + \text{pALK} + \text{C}$$

donde: pHs = pH de saturación

pCa = factor logarítmico de la dureza de calcio

pALK = factor logarítmico de la alcalinidad al naranja de metilo expresada en ppm de  $\text{CaCO}_3$

C = factor logarítmico de sólidos totales en ppm a la temperatura del agua

o bien

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

Los valores de A, B, C y D se obtienen de las tablas contenidas en el anexo IV.

Si es 0 el agua está en equilibrio con los carbonatos

Si es + el agua propiciará incrustación pues está sobresaturada con carbonatos

Si es - el agua es corrosiva pues disolverá carbonatos

- *Índice de estabilidad o índice de Ryznar*. Cuantifica la tendencia incrustante o corrosiva del agua

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

o bien

$$\text{Índice de estabilidad} = 2(9.3 + A + B) - (C + D) - \text{pH}$$

Un valor menor a 6 indica que se trata de un agua con poder de incrustación pero que no será corrosiva

Un valor entre 6 y 7 indica un agua estable

Un valor mayor a 8 indica un agua corrosiva pero que no provocará incrustaciones

### c) Ensuciamiento (*Fouling*)

El ensuciamiento se define como los depósitos de materiales que no son formadores de incrustación, pero que interfieren con la transferencia de calor y el flujo de agua. Existen dos tipos de ensuciamiento:

- Ensuciamiento natural*. Se debe a la suciedad natural presente en el medio ambiente y entra al sistema con el agua (lodos, sedimentos, materia orgánica, sólidos disueltos, micro y macroorganismos) y/o con el aire (gases, polvo, vegetación, micro y macroorganismos)
- Ensuciamiento artificial*. Es originado por el hombre y entran al sistema con el agua (coagulantes, floculantes, fosfatos, detergentes, aguas negras), con el aire (gases orgánicos, amoníaco, ácido sulfhídrico, dióxido de azufre) y/o se encuentran en el sistema (productos para el acondicionamiento del agua, contaminantes de proceso, conservadores de madera)



#### d) Opciones de tratamiento y acondicionamiento

Para evitar tener una transferencia de calor deficiente, un mantenimiento inadecuado de equipos, un deterioro prematuro de la torre de enfriamiento y la necesidad de purgas continuas; es importante someter al agua que entra a la torre a un tratamiento o acondicionamiento previo con la finalidad de reducir o incluso eliminar a los agentes problema causantes de la incrustación, corrosión y ensuciamiento.

Hoy en día existe una diversidad enorme de opciones para tratar y/o acondicionar el agua de la torre; la tabla 4 presenta un condensado de estas opciones.

Todas la torres de enfriamiento utilizan un sistema de acondicionamiento y en ocasiones utilizan adicionalmente un sistema de pretratamiento, un tratamiento lateral u otra opción. La elección del sistema o sistemas a utilizar dependerá de la calidad de agua que se cuenta la cual se determina a través de un análisis en laboratorio. Como los sistemas de acondicionamiento de agua son utilizados en todas las torres, vale la pena mencionar los productos químicos utilizados, la tabla 5 presenta estos compuesto así como su función principal.

Tabla 4. Opciones de tratamiento y acondicionamiento para el agua de una torre de enfriamiento

Clasificación	Denominación	Descripción	Princip.Prov.
Acondicionamiento	Integral	Uso de productos químicos para controlar los agentes causantes de corrosión, incrustación, ensuciamiento y alteración del pH	Beatz-Dearbon Calgon NALCO Guardian-IPCO
	Reforzador	Controlador de carbonato de calcio a través de la dotación de compuestos orgánicos que refuerzan la capacidad de control de los fosfonatos inhibidores de la incrustación	Beatz-Dearbon
	Control microbiológico	Adición de productos químicos al agua de recirculación para controlar el crecimiento de algas, hongos y bacterias	Mason
Pretratamiento	Ósmosis inversa	Remoción de los agentes que provocan incrustación al hacer pasar el agua por una fina membrana oponiéndose a la presión osmótica natural	Quimicagua Ind. Mass
	Intercambio iónico	Remoción de los agentes incrustantes con ayuda de resinas de intercambio	Ind. Mass
	Ablandamiento	Remoción de agentes incrustantes con cal - carbonato	Quimicagua Calgon NALCO
	Clarifloculación	Remoción de agentes promotores del ensuciamiento a través de la precipitación y formación de floculos que sedimentan	NALCO
Tratamiento lateral	Filtración	Remoción de sólidos en el agua de enfriamiento con ayuda de un filtro colocado a un lado de la torre	Marley
Otros	Unidad de limpieza autónoma	Aparato portátil de limpieza y desinfección por el que pasa toda el agua que entra a la torre	Tower Vac
	Ozonificador	Control del ensuciamiento por reducción de la biomasa con ayuda de ozono	Pyramid

*Tabla 5. Compuestos químicos utilizados para acondicionar el agua de las torres de enfriamiento*

<b>Función</b>	<b>Tipo de compuesto químicos</b>	<b>Ejemplos</b>
Control de la corrosión	Inhibidores orgánicos	Surfactantes
	Inhibidores inorgánicos	Fosfatos, silicatos, cromatos, sulfatos
Control de la incrustación	Dispersantes	Poliectrolitos
	Compuestos orgánicos	Alquil-epoxi-carboxilatos
	Solubilizantes	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , poliacrilatos
Control del ensuciamiento químico	Floculantes	Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , poliacrilamidas
	Dispersantes	Poliacrilatos, taninos y ligninas
	Quelatos	Acido cítrico Ácido etilendiamino - tetracético
	Secuestrantes	Polifosfatos
Control del ensuciamiento biológico	Biocidas oxidantes	Cloro, bromo
	Biocidas no oxidantes	
Control del pH	Acidos	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Las dosis a utilizar dependen de la concentración de contaminantes y del volumen de agua que se tengan; los proveedores de reactivos para tratamiento de agua llevan a cabo las pruebas necesarias e indican la dosis recomendada.

## 2. Ciclos de concentración

El agua de la torre se evapora debido a las condiciones ambientales y los sólidos presentes en ella se van concentrando; llega un momento en que la acumulación de sólidos en el bacín es muy grande y es necesario purgar. El número de ciclos que completa el agua de la torre antes de ser purgada recibe el nombre de ciclos de

concentración. Los ciclos de concentración se determinan a partir de la concentración de sílice, o bien a partir de la conductividad utilizando una simple relación:

$$c.c. = \frac{\text{Sílice salida}}{\text{Sílice entrada}}$$

o bien

$$c.c. = \frac{\text{Conductividad salida}}{\text{Conductividad entrada}}$$

También pueden calcularse a partir de las pérdidas utilizando la ecuación antes presentada en el capítulo referente al diseño:

$$c.c. = \frac{Ar}{Aa + Ap}$$

Es importante que la torre opere al máximo número de ciclos de concentración posible para así disminuir la frecuencia de las purgas y tener una pérdida menor de agua. Los ciclos de concentración se aumentan mejorando la calidad del agua de tal forma que contenga menos sólidos y así, aunque exista una gran evaporación la acumulación de sólidos no es tan grande. La mejora de la calidad del agua con miras a disminuir los ciclos de concentración se logra utilizando un tratamiento lateral o un pretratamiento que remueva sólidos disueltos, suspendidos, turbiedad, sílice y conductividad.

### 3. Balance

Es importante realizar el balance de la torre periódicamente para determinar cual es el volumen de agua de repuesto que la torre en realidad necesita para así no enviar agua en exceso o en carestía. Además, permite saber qué tanta desviación hay entre los datos medidos y los calculados y hacer obtener el resultado de la simulación de un aumento

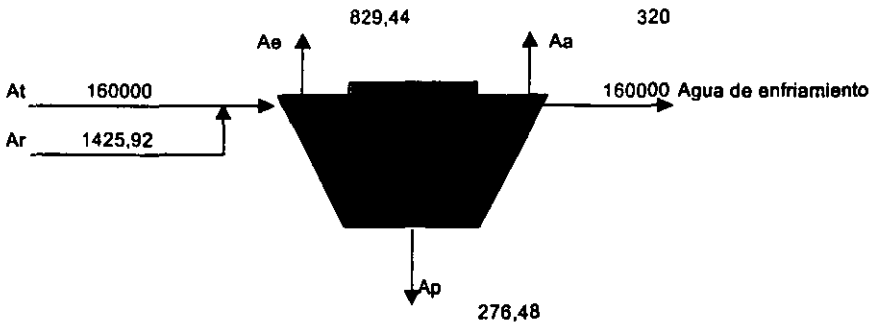
de ciclos de concentración. El balance puede efectuarse utilizando las ecuaciones presentadas en el capítulo referente al diseño de la torre. Es recomendable tener una hoja de cálculo electrónica para llevar a cabo este balance periódicamente con facilidad. La figura 21 muestra el ejemplo de un balance para una torre de enfriamiento elaborado en una hoja de cálculo.

#### **4. Opciones para el ahorro de agua**

Una torre de enfriamiento puede gastar enormes cantidades de agua la cual en algunos lugares resulta ser muy costosa. El costo del agua que entra a la torre se obtiene sumando el costo del agua cruda más el costo del tratamiento y/o acondicionamiento que se le dé al agua. Cuando el agua es muy costosa o la calidad del agua purgada no cumple con las normas de descarga del lugar y requiere de un tratamiento costoso previo a su descarga, es recomendable tomar medidas para ahorrar agua. Las medidas más viables y funcionales se presentan a continuación.

##### **a) Aumento de los ciclos de concentración**

Como ya se dijo antes, el aumento en los ciclos de concentración a través de la mejora en la calidad del agua disminuye el volumen de purgas, el volumen de agua de repuesto y por ende se tiene un ahorro de agua. El volumen de agua ahorrada dependerá de qué tanto se aumenten los ciclos de concentración. Como ya se dijo antes, a través de un balance puede efectuarse la simulación del aumento en los ciclos. La figura 21 presenta el balance de una torre, las figuras 22 y 23 corresponden al balance simulado con un aumento en los ciclos de concentración para la misma torre.

**NOMENCLATURA**

At = Agua de recirculación  
 Ar = Agua de repuesto  
 Ap = Agua perdida por purgas  
 Ae = Agua perdida por evaporación  
 Aa = Agua perdida por arrastre

**FÓRMULAS**

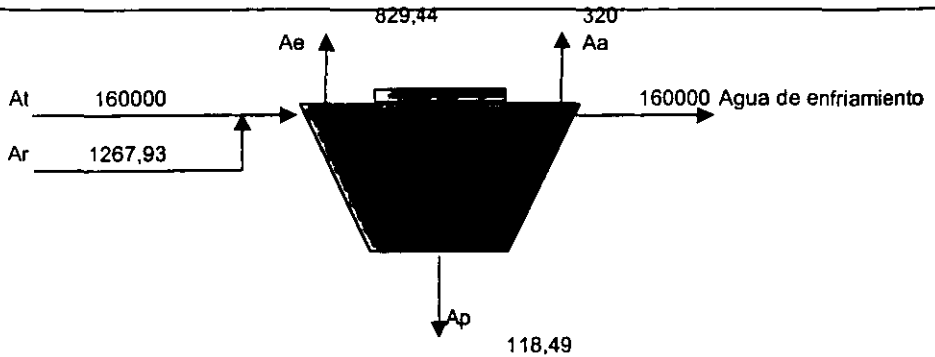
$Ae = 0.00048 At (T_e - T_s)$   
 $Aa = 0.002 At$   
 $Ap = Ae / (\text{ciclos de conc.} - 1)$   
 $Ar = Ae + Aa + Ap$

**DATOS**

Tentrada °F	102,2
Tsalida °F	91,4
Ciclos conc.	4
At	160000

Valores en metros cúbicos al día

Figura 21. Balance para una torre de enfriamiento a 4 ciclos de concentración

**NOMENCLATURA**

At = Agua de recirculación

Ar = Agua de repuesto

Ap = Agua perdida por purgas

Ae = Agua perdida por evaporación

Aa = Agua perdida por arrastre

**FÓRMULAS**

$$Ae = 0.00048 At (T_e - T_s)$$

$$Aa = 0.002 At$$

$$Ap = Ae / (\text{ciclos de conc.} - 1)$$

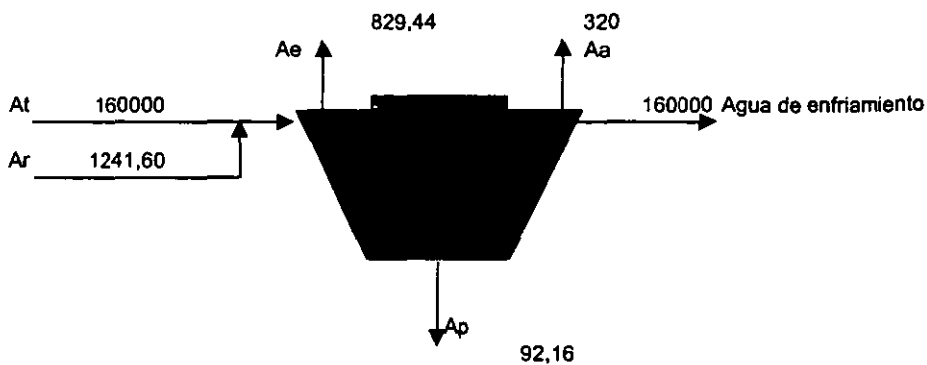
$$Ar = Ae + Aa + Ap$$

**DATOS**

Tentrada °F	102,2
Tsalida °F	91,4
Ciclos conc.	8
At	160000

Valores en metros cúbicos al día

Figura 22. Balance simulado de la torre a 8 ciclos de concentración

**NOMENCLATURA**

At = Agua de recirculación

Ar = Agua de repuesto

Ap = Agua perdida por purgas

Ae = Agua perdida por evaporación

Aa = Agua perdida por arrastre

**FÓRMULAS** $Ae = 0.00048 At (T_e - T_s)$  $Aa = 0.002 At$  $Ap = Ae / (\text{ciclos de conc.} - 1)$  $Ar = Ae + Aa + Ap$ **DATOS**

Tentrada °F

102,2

Tsalida °F

91,4

Ciclos conc.

10

At

160000

**Valores en metros cúbicos al día***Figura 23. Balance simulado para la torre a 10 ciclos de concentración*



#### b) Recuperación de purgas

La recuperación de purgas es conveniente cuando resulta muy costoso descargar o bien cuando la recuperación para reutilizar el agua en la misma torre resulta ser rentable.

La recuperación de purgas se efectúa mediante un sistema de tratamiento de agua que se adecue a los contaminantes presentes en el agua purgada. Usualmente se utiliza calrifloculación, ósmosis inversa, ultrafiltración, ablandamiento con cal – carbonato o un tren de tratamiento que incluya a dos o más de estas operaciones.

#### c) Recuperación de agua de otros puntos del proceso

Esta opción de ahorro de agua consiste en recuperar purgas provenientes de otros equipos de proceso para integrarlas, darles el tratamiento adecuado y mandarlas a la torre de enfriamiento como agua de repuesto.

### 5. Estadística

Las estadísticas de una torre de enfriamiento permiten saber qué tan eficiente es, qué tan buena es la calidad del agua, qué tan útil es el tratamiento y/o acondicionamiento de agua que se hace y qué ajustes se necesitan hacer. Es recomendable hacer un análisis estadístico por lo menos una vez al mes que contenga:

- Media y desviación estándar de temperaturas
- Moda de la temperatura de bulbo húmedo
- Media, moda y desviación estándar de la concentración de contaminantes clave
- Media y desviación estándar del flujo de agua de repuesto
- Prueba de comparación de medias (*t de student*) o análisis de varianza (ANOVA) para los contaminantes y temperaturas si se considera necesario

## 6. Monitoreo de las emisiones (pluma)

La pluma de la torre de enfriamiento es una mezcla de agua y vapor de agua que en conjunto forman una columna de niebla o bruma que al bajar resta visibilidad en caminos, carreteras y demás arterias viales cercanas a las zonas industriales.

Muchas industrias han tenido que enfrentar un problema de este tipo y a partir de la experiencia se han generado diversas opciones:

1. Ubicar la torre de enfriamiento lejos de carreteras y/o caminos. Cuando la torre ya está construida, se puede reubicar pero esto resulta ser muy costoso.
2. Incrementar el número de celdas y ventiladores para crear una pluma más corta.
3. Usar enfriamiento húmedo y seco (con bobinas) en combinación.

Si se elige la segunda opción, primero se ha de obtener la correlación que tiene el largo de la pluma con las condiciones de operación ya que los factores que influyen en la formación de niebla y en la disipación de ésta son muy complejos. Para obtener esta correlación se utiliza la ecuación de Pasquill:

$$C = \frac{F1 F2 1.68 Q (100000000)}{u d h \theta}$$

donde:

C = concentración del gas que se está diluyendo

F1 y F2 = factores de corrección para la elevación y vientos cruzados respectivamente

d = distancia en pies

h = extensión o propagación vertical

$\theta$  = extensión o propagación horizontal

u = velocidad del viento en pies/s

Q = volumen del gas que sale de la chimenea

## 7. Mantenimiento periódico

Con la finalidad de cumplir con todas las recomendaciones para operar la torre y tener control de la misma, es recomendable, elaborar una lista de las cosas que tienen que revisarse y de las que requieren mantenimiento periódico en la torre. Esta lista se denomina "lista de control", "rol de verificación" o "check-list". La tabla 5 presenta un ejemplo de este tipo de lista.

*Tabla 5. Lista de control o check list para torre de enfriamiento*

Lista de control para mantenimiento periódico				
	Semanal	Mensual	Semestral	Anual
Válvula de agua de repuesto	Inspeccionar			
Bacín de agua fría	Inspeccionar			
Eliminadores de rocío		Inspeccionar		
Eje motor/ flecha motriz	Inspeccionar	Revisar que esté alineado		Limpiar
Ventiladores	Inspeccionar		Limpiar	
Soporte del eje	Inspeccionar	Lubricar		
Relleno			Inspeccionar	
Reductor de velocidad	Revisar el nivel de aceite	Revisar que el aceite esté limpio	Cambiar el aceite	Revisar que exista buen nivel de bombeo de aceite en la línea de alimentación
Accesorios menores			Inspeccionar	Limpiar y ajustar tuercas
Cabezal		Inspeccionar		
Ramal		Inspeccionar		
Motores	Inspeccionar la temperatura de operación			Lubricar
Sistema de distribución				Limpiar
Revestimiento			Inspeccionar	Limpiar
Estructura				Inspeccionar
Mampara colectora	Limpiar			
Bacín de distribución				Limpiar

## **8. Problemas ocasionados por la orientación de la torre**

Algunas torres de enfriamiento son construidas en una posición que de cierta forma resulta “incómoda” para su operación pues existen árboles, paredes, tuberías elevadas o simplemente corrientes de aire que pueden ocasionar dos problemas:

- i. **Recirculación.** La recirculación es un fenómeno que consiste en que la humedad del aire descargado de alguna forma se reintroduce en la torre. Esto incrementa la humedad del aire e inhibe la evaporación; por lo tanto la capacidad de enfriamiento disminuye.
- ii. **Reducción del volumen de aire de entrada.** Esto ocasiona un decremento en la capacidad térmica de la torre.

Para prevenir la recirculación y la reducción en el volumen de aire, las torres de enfriamiento deben construirse en áreas libres de obstrucciones y factores influyentes. Sin embargo, en ocasiones las obstrucciones surgen una vez construida la torre, o bien, no existe otra alternativa de lugar para colocar la torre; entonces, se deberá buscar una solución para estos problemas

Las soluciones son diversas y la elección de una de ellas dependerá del presupuesto para llevarla a cabo y de las condiciones particulares de la torre. Una de las opciones más recurridas es la construcción de un muro que aisle a la torre en la forma deseada o bien, la construcción de una serie de persianas que orienten la pluma y el aire en forma adecuada.

## **9. Ventiladores**

En la operación, el flujo de aire puede ser modificado dándole cierta inclinación a los ventiladores de tal forma que éste aumente o disminuya según sea necesario. Sin embargo, esta práctica ha entrado en desuso pues el forzar la corriente de aire provoca vibraciones y ruido en los ventiladores. Se recomienda, mejor, utilizar ventiladores con motor de velocidad variable.

## 10. Otros factores a considerar

Estudios realizados recientemente en torres de enfriamiento han demostrado que estos equipos proporcionan el ambiente propicio para el desarrollo de la "*Legionella pneumophila*", bacteria causante de un extraño tipo de neumonía. Esta bacteria se multiplica con facilidad en agua con una temperatura entre los 28 y 50 °C, siendo el punto óptimo los 38°C.

La infección provocada por la "*Legionella*" se adquiere por inhalar espesa o rocío de agua contaminada; sin embargo, no se adquiere por beber el agua y no es contagiosa. Fumadores, personas mayores de 50, consumidores asiduos de bebidas alcohólicas, diabéticos y gente con problemas pulmonares son los individuos con mayores posibilidades de adquirir esta infección. No existe vacuna alguna y no hay forma de erradicar la bacteria una vez propagada.

La inspección periódica y el control de la calidad del agua de la torre de enfriamiento, ante esta situación, se vuelve una práctica indispensable así como el contar con eliminadores de rocío eficientes. Se recomienda también, como medida de prevención adicional, dotar al personal de equipo de protección para ojos, piel y boca.

Las acciones que deberán tomarse estarán de acuerdo a los resultados de laboratorio obtenidos en la inspección del agua de la torre. Estas acciones y/o indicaciones se resumen en el cuadro que se presenta a continuación:

<b>Población de <i>Legionella</i> encontrada (CUF/mL)*</b>	<b>Acción y/o indicación</b>
Menos de 10	Continuar con las prácticas de control e inspección
Hasta 100	El control puede estar fallando. Mejorar las prácticas operativas y realizar pruebas de laboratorio hasta que la población presente disminuya
100 - 1,000	Situación potencialmente peligrosa. Rectificar el proceso de control poniendo énfasis en la desinfección del agua. Notificar al personal que está en riesgo de estar infectado para que se practique análisis y sea atendido en caso de tener resultados positivos. Realizar pruebas de laboratorio hasta que la población presente disminuya
Más de 1,000	Situación seria. Es necesario suspender la operación de la torre y desinfectar inmediatamente. Notificar al personal que está en riesgo de estar infectado para que se practique análisis y sea atendido en caso de tener resultados positivos. Una vez que la torres esté limpia se podrá operar de nuevo. Realizar pruebas de laboratorio hasta que la población presente esté en el intervalo seguro.

\* CUF/mL - Colonias de Unidades Formadas por mL de agua

***Si una torre no es operada adecuadamente no funciona sin importar la precisión en su diseño y selección. Es por ello, que se deben tomar en cuenta los siguientes puntos al operar una torre:***

- 1. La calidad del agua no debe propiciar ensuciamiento, escalamiento o corrosión***
- 2. El agua de buena calidad permite una reducción en los ciclos de concentración lo que se traduce en un ahorro de agua***
- 3. El agua de repuesto que se suministre debe ser la requerida por la torre según el balance***
- 4. Si en la región el agua de suministro resulta ser costosa, conviene considerar la recuperación de las purgas de la torre***
- 5. Debe llevarse a cabo un control estadístico periódico***
- 6. Es recomendable utilizar una "check-list" de mantenimiento correctivo y preventivo para la torre***
- 7. La operación de la torre deberá garantizar la seguridad de los operadores y de la población aledaña si es que la hay***

## **CAPÍTULO VI**

### **CONSIDERACIONES ECONÓMICAS**

En la construcción y operación de una torre de enfriamiento se ven involucrados tanto costos como gastos que deben ser evaluados detenidamente antes de emprender el proyecto.

A continuación se mencionan los comúnmente incurridos:

#### **GASTOS**

- Gastos financieros: Se realizan al solicitar alguna clase de financiamiento para llevar a cabo el proyecto y/o al adquirir y/o utilizar el predio donde se construirá la torre de enfriamiento. Estos pueden ser pagos de créditos e intereses bancarios, pago de predial, amortiguación de capital pasivo.
- Gastos administrativos: Estos gastos son los más frecuentes pues se refieren a gastos de servicio público como el consumo de electricidad, agua, gas; gastos de suministro como la papelería utilizada y el servicio de mensajería y gastos de personal dentro de los cuales se incluyen sueldos, prestaciones, honorarios, incentivos, aportaciones al Seguro Social y comisiones.

#### **COSTOS**

- Costo de instalación
- Costo de operación o de especificación

Además, deberá considerarse la depreciación del equipo y más tarde deberán aplicarse los valores obtenidos al análisis del punto de equilibrio para encontrar el punto mínimo de producción al que deberá operar la planta para no incurrir en pérdidas.

Quizá el punto más importante dentro de las consideraciones económicas para un proyecto de construcción y operación de una torre de enfriamiento es la estimación adecuada de costos.



## ESTIMACIÓN DE COSTOS

Antes de iniciar un proyecto destinado a construir un equipo enfriador de agua, es importante hacer una estimación rápida denominada "Estimación del costo de planta" para cada una de las opciones existentes; esto se hace con el objetivo de elegir la económicamente adecuada antes de hacer cualquier tipo de inversión .

### Métodos para estimas costo de planta

- a) Factores Lang: Se basan en fórmulas estadísticas desarrolladas a partir del análisis de muchos proyectos. El costo de planta se obtiene multiplicando el precio de compra del equipo mayor por una relación estadística. En este caso:

$$\text{Para proceso de fluido(s): } C_i = 4.74 * E$$

- b) Capacidad de ajuste por método exponencial: Se utiliza cuando se conoce el costo de un equipo similar; produce resultados bastante correctos.

$$\begin{pmatrix} CA \\ CB \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} PA \\ PB \end{pmatrix}^x$$

Donde:

CA = costo de la torre A

CB = costo de la torre B

PA = capacidad anual de la torre A

PB = capacidad anual de la torre B

El valor del exponente  $x$  deberá seleccionarse; usualmente varía en el intervalo de 0.38 a 0.9. Un exponente clásico de procesos es 0.6. El uso de un valor incorrecto para este exponente puede introducir un error de cálculo extremo de 25%.

Una vez seleccionado el proceso adecuado para enfriar agua se deberá llevar a cabo el diseño del mismo para después hacer las estimaciones preliminares.

La primera etapa en la preparación de un costo estimado tanto para el nuevo capital como para el costo de producción, es trazar un diagrama de flujo que incluya líneas de flujo e instrumentación y realizar los balances de materia y energía.

La segunda etapa es calcular el tamaño y tipo de torre así como de cada uno de sus accesorios especificando los materiales de construcción.

La tercera etapa en la confección de la estimación consiste en dos partes:

- (1) Estimación del costo de compra y construcción de todo el equipo e instalaciones y del costo de instalación.
- (2) Estimación del costo de operación

#### Estimación del costo del equipo e instalaciones

Los costos de los equipos e instalaciones de la industria química no permanecen constantes sino que cambian con el tiempo. Existen correlaciones de costos de equipo con diversos índices económicos que reflejan dichas variaciones. El índice más conocido es el *Engineering News – Record* que es un índice medio ponderado de los costos del acero, madera, cemento y mano de obra. La desventaja de utilizar este índice es que en la actualidad los costos de construcción han crecido más rápidamente que los de los equipos de proceso. Otro índices son:

- a) *Marshall and Stevens Index*: índice promedio ponderado del costo de los equipos en ocho diferentes industrias de proceso
- b) *Plant Cost Index*: publicado periódicamente en la revista *Chemical Engineering*
- c) Índice de precios al por mayor del Dpto. de Comercio de EE.UU: se contempla como una pérdida del poder de adquisición del dólar estadounidense. Se considera el índice más seguro para estimar costos de equipos e instalaciones de proceso.

Los costos de los equipos e instalaciones de proceso cambian con el tamaño, potencia o peso del equipo. Normalmente se aplica una función tamaño – costo que tiene la siguiente forma:

$$\text{Costo} = K (A)^n$$

O bien

$$\frac{(\text{Costo})_L}{(\text{Costo})_S} = \left[ \frac{A_L}{A_S} \right]^n$$

Donde:

A = Volumen, área o potencia (característica que defina el tamaño)

K = Constante; valor del costo cuando A es la unidad

L y S = subíndices que indican tamaño mayor y menor respectivamente

Una función de este tipo, cuando se presenta en coordenadas doble logarítmicas es una línea recta donde n representa el valor del exponente.

Las estimaciones de costos de tipo preliminar no son precisas; un intervalo posible de precisión podría ser de -35% a +25% tendiendo más a acercarse al límite por defecto.

#### Estimación del costo de operación

En el caso de una torre de enfriamiento es más recomendable estimar los costos de operación que los costos de proceso pues la línea de operación de la torre está estandarizada y además su producto es un gran volumen. El primer paso en la estimación de los costos de operación será dividir el proceso de enfriamiento de agua en operaciones:

- Pre - tratamiento
- Acondicionamiento
- Enfriamiento
- Tratamiento de purgas (en caso de existir)

Una vez hecha esta división se deberán calcular los costos totales de cada operación: materiales directos y costos de conversión.

### Métodos de asignación del costo (Depreciación)

- a) Método basado en la actividad o método de cargo variable: Presupone que la depreciación está en función del uso o la productividad y no del paso del tiempo. La vida del activo se considera en términos de su rendimiento o el número de horas que opera.

$$\text{Depreciación} = \frac{(\text{Costo} - \text{valor de desecho}) * (\text{horas de uso al año})}{\text{total de horas estimadas}}$$

- b) Método de línea recta: La depreciación se considera en función del tiempo y no del uso. Es un método muy utilizado debido a su simplicidad; sin embargo, se apoya en suposiciones muy sutiles que en ocasiones no son realistas y se producen distorsiones en el análisis de la tasa de rendimiento (Beneficio/activo).

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Costo} - \text{valor de desecho}}{\text{vida útil}}$$

- c) Método de cargo decreciente o depreciación acelerada: Permite hacer cargos por depreciación más altos en los primeros años y más bajos en los últimos periodos. Con este método se siguen dos enfoques: el de la suma de números dígitos o el de la doble cuota sobre el valor en libros. El más utilizado es el primero.

- Suma de números dígitos – Produce el valor de la depreciación basado en una fracción decreciente del costo depreciable (costo original menos valor de desecho). Con cada fracción se usa de suma de los años como denominador (p.ej: 5+4+3+2+1=15), mientras que el número de años de vida estimada que resta al principiar el año viene a ser el numerador. El numerador disminuye año con año mientras que el denominador permanece constante. Al terminar la vida útil del activo, el saldo debe ser igual al valor de desecho.

Una herramienta útil en la estimación de costos y gastos es la elaboración de diagramas de Gantt donde se muestran los tiempos de ejecución del proyecto. De esta forma puede estimarse la duración del mismo y por lo tanto se podrán calcular, distribuir y asignar los recursos.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

## CAPÍTULO VII

### CÁLCULO DE UN CASO

#### **Torre de enfriamiento de uso industrial**

En este capítulo, se presenta un ejemplo de diseño de una torre de enfriamiento de uso industrial con una capacidad de 25,000 GPM. Este diseño, está basado en los principios y técnicas presentadas en los capítulos anteriores.

La presentación del diseño incluye las hojas de datos para el diseño térmico, estructural y mecánico. Los algoritmos de cálculo empleados y los cálculos realizados. Los planos estructurales, los diagramas de tubería e instrumentación y las especificaciones de equipo seleccionado.

#### *Características de la torre de enfriamiento a diseñar*

Localidad: Ensenada B.C.

Capacidad: 25,000 GPM

La torre a diseñarse estará dentro de las instalaciones de una industria productora de alcohol etílico a partir de grano. Esta planta produce 50 millones de galones de alcohol etílico 199 de prueba (99.5% en volumen) por año. La naturaleza de la planta exige que opere por lo menos 330 días al año.

Temperatura de salida del agua de la torre: 85 °F

Contenido de los intercambiadores de calor a los cuales alimenta la torre: Mezcla de masa de grano de maíz convertida y líquido ligero. Esta mezcla proviene de reactores de sacarificación.

## ALGORITMO DE CÁLCULO

1. Determinar la temperatura de entrada del agua a la torre (temperatura del agua caliente).
2. Determinar la carga térmica de la torre con base en la temperatura de agua a la entrada, a la salida y el flujo de la misma.
3. Elegir la temperatura de bulbo húmedo del aire más representativa del lugar. Esto se logra haciendo un análisis de los datos históricos de varios años y eligiendo la moda si es que ésta se encuentra dentro de las máximas o bien elegir la máxima promedio.
4. Elaboración del diagrama de saturación aire – agua
  - a) Establecer la línea de equilibrio. La línea de equilibrio se establece de la siguiente forma:
    - i) El extremo inferior se encuentra en la intersección de la  $T_{bh}$  y la entalpía del aire saturado a la entrada. El extremo superior corresponde a la temperatura del agua a la entrada y la entalpía del aire a esa temperatura.
    - b) Establecer la línea de operación con inicio en el punto definido por la temperatura del agua a la salida de la torre (temperatura del agua fría) y la entalpía del aire a la  $T_{bh}$ . La pendiente de esta línea  $L'/Ga$  será un valor entre 0.9 y 2.7
5. Integración gráfica para cada valor de pendiente propuesto través de la gráfica de  $1/h-h'$  vs.  $T$ . El valor de  $h$  se obtiene de la línea de operación y el de  $h'$  de la línea de equilibrio.
6. El valor de la integral es igual al NUT
7. Seleccionar el tipo de empaque adecuado y leer el valor de las constantes correspondientes (Anexo V)
8. Resolver la ecuación de diseño basada en las relaciones de Merkel:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{i1}^{i2} \frac{dt_L}{h' - h} = 0.07 + A' N' \left( \frac{L'}{Ga} \right)^{-n}$$

9. Calcular la altura del empaque como:

$$\text{Altura [ft]} = N - 1 \frac{9}{12}$$

10. Calcular  $G_a$  sabiendo que:

$$\frac{40 \text{ ft} - 12 \text{ ft}}{40 \text{ ft} - \text{Altura}} = \frac{2000 - 1400}{x}$$

$$\text{y } G_a = 1400 + x$$

11. Con  $G_a$  y sabiendo el valor de  $L'/G_a$ , calcular  $L'$

12. Calcular la superficie de la torre en  $\text{ft}^2$  como:

$$\text{Superficie [ft}^2\text{]} = \frac{\text{Flujo [lb/h]}}{L'}$$

13. Determinar la dimensión de cada celda a utilizar de acuerdo a los datos proporcionados por fabricantes de ventiladores (Anexo VI)

14. Calcular el número de celdas con el cociente de la superficie y  $L'/G_a$

15. Calcular el área que ocupará la totalidad de celdas

16. El agua dentro de la torre va perdiendo presión. El diseño de la torre debe evitar que la caída de presión sea excesiva. Esta caída se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta P = \Sigma (\Delta P \text{ empaque, } \Delta P \text{ persianas, } \Delta P \text{ eliminadores})$$



a) Pérdida de presión a través del empaque

$$\Delta P = N B G_a^2 \frac{0.0675}{\rho_G} + N C \sqrt{S_F} L G_E^2 \frac{0.067}{\rho_G}$$

b) Pérdida de presión a través de las persianas

- Determinar un largo de persiana (largo std. = 24 ft)
- Determinar el área total que ocuparan las persianas

$$A_p = 24 (\text{número de celdas}) (2 \text{ lados}) (\text{altura})$$

- Determinar el flujo de aire

$$cfm = \frac{\text{flujo aire [lb / h]}}{60(\rho_G)}$$

- Determinar cfm a la entrada como:
- Determinar la velocidad a través de la persianas (medida en la cara de las mismas):

$$fpm = \frac{cfm}{\text{área total de persianas}}$$

- La pérdida de presión se calcula sabiendo que:

$$\Delta P' = 0.32 - x$$

$$\frac{0.32 - 0.02}{x} = \frac{1600 - 400}{1600 - fpm}$$

c) Pérdida de presión a través de los eliminadores de rocío:

$$\frac{2000 - 800}{200 - G_a} = \frac{0.07 - 0.01}{x}$$

$$\Delta P' = 0.07 - x$$

$$\Delta P_{total} = \sum_{i=1}^3 \Delta P'_i$$

17. Calcular los BHP necesarios como:

$$BHP = \frac{\text{Flujo aire [lb / h]}}{\rho_G * 60} * \frac{\Delta P_{total}}{6356 (0.50)}$$

18. Calcular los BHP por celda

## APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE CÁLCULO A UN CASO ESPECÍFICO

1. *Determinación de la temperatura de entrada del agua a la torre (temperatura del agua caliente)*

La torre alimenta a 5 intercambiadores de calor que absorben del agua de enfriamiento 580 kcal/bhp h.

$$T_2 = (m \text{ Cp}/Q) + T_1 = 103 \text{ }^\circ\text{F}$$

2. *Determinación de la carga térmica de la torre con base en al temperatura de agua a la entrada, a la salida y el flujo de la misma.*

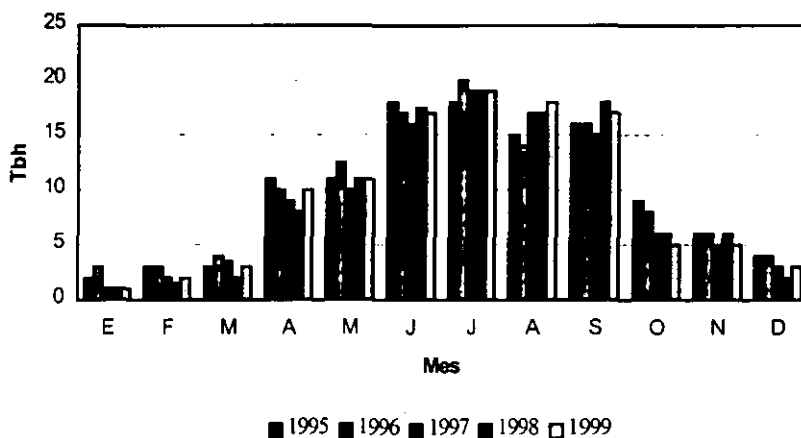
$$Q = m \text{ Cp } \Delta T$$

$$Q = (208,623.438 \text{ lb})(1 \text{ Btu} / \text{lb } ^\circ\text{F})(18 \text{ }^\circ\text{F}) = 3,755,221.884 \text{ Btu}$$

3. *Elección de la temperatura de bulbo húmedo del aire más representativa del lugar.*

A continuación se presenta una gráfica que muestra la tendencia de la temperatura de bulbo húmedo a lo largo de 5 años en la región de Ensenada, B.C. Norte:

Tbh en Ensenada



Como puede verse, en los cinco años, se registró la temperatura de bulbo húmedo más alta en el mes de JULIO. Por otro lado, el año con temperaturas más altas registradas fue 1996, por lo que al final de este capítulo se presenta un análisis de la Tbh en el mes de Julio de 1996; considerando que fue entonces cuando se registraron los valores máximos.

El análisis incluye distribución de frecuencias, y estadística descriptiva consistente en una prueba no paramétrica (Kolmogorov – Smirnov) para determinar qué tan representativo es el valor elegido.

#### 4. *Elaboración del diagrama de saturación aire – agua*

##### Línea de equilibrio

El extremo inferior de la línea de equilibrio será la temperatura de bulbo húmedo y la entalpía del aire saturado a esa temperatura (entalpía del aire a la entrada); el extremo superior corresponde a la temperatura de entrada del agua a la torre y la entalpía del aire saturado a dicha temperatura (entalpía a la temperatura del agua caliente). Por último, se establecerá un punto medio en la temperatura de salida del agua de la torre y la entalpía del aire saturado leída a esa temperatura. La parte de esta línea que va del punto donde se localiza la temperatura del agua fría al punto donde está la temperatura del agua caliente se conoce como línea de operación del agua.

En este caso los puntos quedarían establecidos de la siguiente manera:

<b>Línea de equilibrio</b>	
Temperatura	Entalpía
59.54	26.04
85	49.48

### Línea de Operación

El inicio de esta línea será la temperatura de salida del agua de la torre (85°F) y la entalpía del aire a la  $T_{bh}$  (26.04 BTU/lb).

Esta línea tendrá una pendiente entre 0.9 y 2.7. En este caso, se han elegido 4 valores de pendiente sobre los cuales se harán los cálculos: 0.9, 1.2, 1.4 y 2.7.

$$y = mx + b$$

Donde:

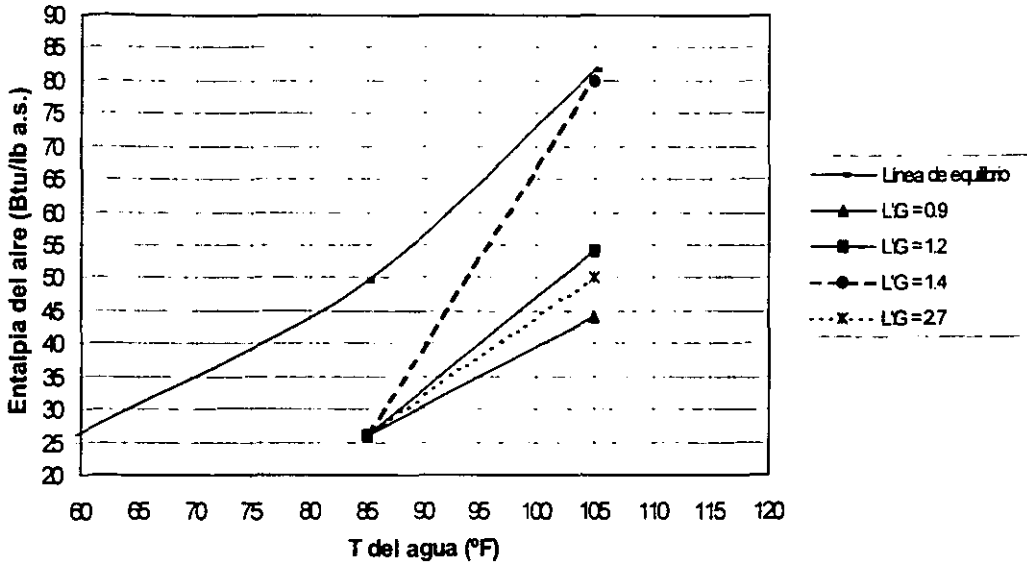
$m$  = pendiente =  $L'/G$

$x$  = Temperatura del agua (°F)

$b$  = Ordenada al origen (entalpía del aire)

	T	h	m = L'/G
1	85	26.04	0.9
2	103	42.24	
	T	h	
1	85	26.04	1.2
2	103	47.64	
	T	h	
1	85	26.04	1.4
2	103	51.24	
	T	h	
1	85	26.04	2.7
2	103	74.64	

La gráfica de línea de equilibrio y las distintas líneas de operación propuestas queda como se muestra a continuación:



5. Integración gráfica para cada valor de pendiente propuesto través de al gráfica de  $1/h-h'$  vs.  $T$ . El valor de  $h$  se obtiene de la línea de operación y el de  $h'$  de la línea de equilibrio.

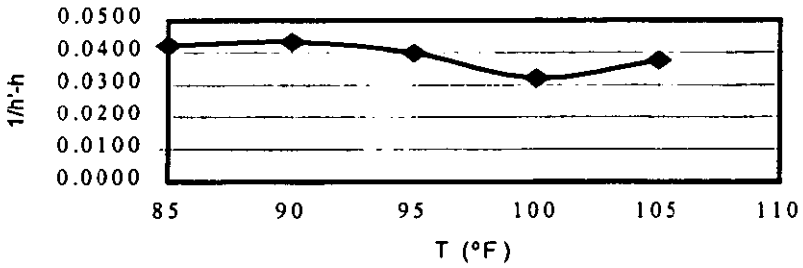
Utilizando la pendiente 0.9:

- A 85 °F,  $h$  en la línea de operación es 26.04
- A 85 °F  $h'$  en la línea de equilibrio es 49.7
- $h' - h = 49.7 - 26.04 = 23.66$

$$\frac{1}{h'-h} = \frac{1}{23.66} = 0.0423$$

Este es el primer punto de la gráfica. El procedimiento se repitió a cada 5°F de temperatura.

Integración Gráfica para NUT  $m = 0.9$

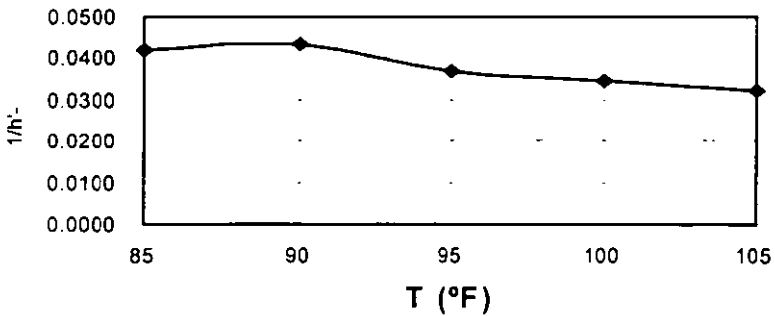


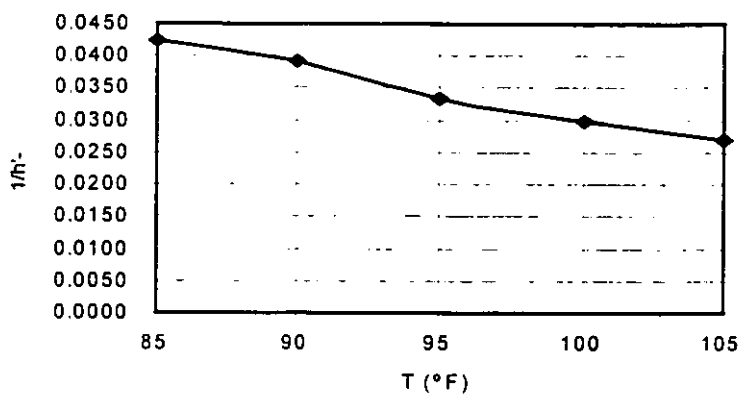
Después se hizo la integración gráfica midiendo el área bajo la curva trazada. En este caso  $A = 31$  unidades

El procedimiento se repitió para cada pendiente obteniendo las siguientes gráficas y los siguientes valores de  $A$

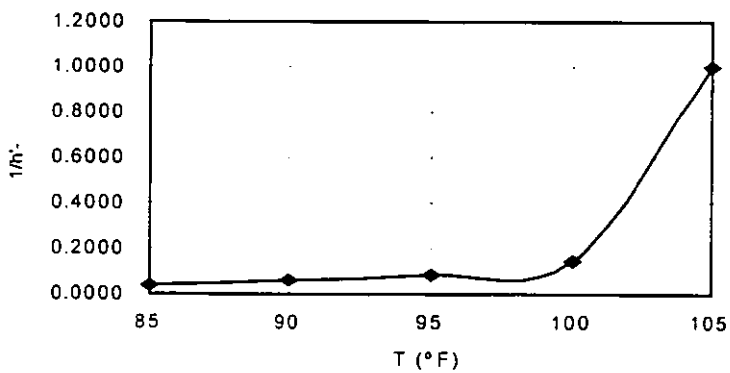
$A = 29.3$  unidades

Integración gráfica de NUT  $m = 1.2$



Integración Gráfica de NUT  $m = 1.4$ 

A = 27.4 unidades

Integración gráfica  $m = 2.7$ 

A = 16 unidades



6. El valor de la integral es igual al NUT

$m = L/G$	NUT
0.9	31
1.2	29.3
1.4	27.4
2.7	16

7. Selección del tipo de empaque

El empaque adecuado para este tipo de torre es un empaque de tipo rocío debido a las dimensiones esperadas de la torre (diseñada para 25,000 GPM). Se seleccionó el empaque tipo "I".

8. Resolución de la ecuación de diseño:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt_L}{h' - h} = 0.07 + A' N' \left( \frac{L'}{Ga} \right)^{-n}$$

Para NUT =  $N' = 31$  ( $m = 0.9$ )

$$\frac{KaV}{L} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt_L}{h' - h} = 0.07 + 0.135 (31) (0.9)^{-0.57} = 3.88$$

Para todos los valores de NUT:

N	L/G	$KaV/L'$
30	0.9	3.88
29	1.2	4.41
27	1.4	4.41
16	2.7	3.87

9. *Calculo de la altura del empaque como:*

$$\text{Altura [ft]} = N - 1 \frac{9}{12}$$

N	Alt emp ft	Alt emp (m)
30	58	17.68
29	56	17.07
27	52	15.85
16	30	9.15

10. *Calcular Ga sabiendo que:*

$$\frac{40 \text{ ft} - 12 \text{ ft}}{40 \text{ ft} - \text{Altura}} = \frac{2000 - 1400}{x}$$

$$\text{y } Ga = 1400 + x$$

x	Ga (ft2)
-385.7143	1,014.2857
-342.8571	1,057.1429
-257.1429	1,142.8571
214.2857	1,614.2857

11. Con  $G_a$  y sabiendo el valor de  $L'/G_a$ , calcular  $L'$

$x$	$G_a$ (ft <sup>2</sup> )	$L'$
-385.7143	1,014.285 7	912.86
-342.8571	1,057.142 9	1,268.5 7
-257.1429	1,142.857 1	1,371.4 3
214.2857	1,614.285 7	4,358.5 7

12. Calcular la superficie de la torre en ft<sup>2</sup> como:

$$\text{Superficie [ft}^2\text{]} = \frac{\text{Flujo [lb/h]}}{L'}$$

$L'$	Superficie (ft <sup>2</sup> )	Sup (m <sup>2</sup> )
912.86	15,056.57	1,398.76
1,268.57	10,834.63	1,006.54
1,371.43	10,022.03	931.05
4,358.57	3,153.44	292.95

13. Determinar la dimensión de cada celda a utilizar de acuerdo a los datos proporcionados por fabricantes de ventiladores (Anexo VI)

Celdas en módulos de 6 ft x 6 ft = 1.8 m x 1.8 m

Celdas de 30 x 60 ft

Área de celda (ft<sup>2</sup>) = 1,800

Largo de persiana = 24 ft

14. Calcular el número de celdas con el cociente de la superficie y  $L'/G_a$

Núm de celdas
8
6
6
2

Ejemplo: En el primer caso

$$\text{Núm Celdas} = \frac{\text{Superficie total}}{\text{Superficie celda}} = \frac{15,056.57 \text{ ft}}{1,800 \text{ ft}} = 8.36 \cong 8$$

15. Calcular el área que ocupará la totalidad de celdas

Área de celdas
15,056.57
10,834.63
10,022.03
3,153.44

16. El agua dentro de la torre va perdiendo presión. El diseño de la torre debe evitar que la caída de presión sea excesiva. Esta caída se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta P = \Sigma (\Delta P \text{ empaque, } \Delta P \text{ persianas, } \Delta P \text{ eliminadores})$$

b) *Pérdida de presión a través del empaque*

$$\Delta P = N' B G_a^2 \frac{0.0675}{\rho_G} + N' C \sqrt{S_F} L G_E^2 \frac{0.067}{\rho_G}$$

Pérdida
0.01811
-0.02027
-0.01678
-0.22872

Estos resultados nos permiten ver que las tres últimas opciones no nos conducen a resultados lógicos de pérdida de presión. Por este motivo el cálculo continúa únicamente con el primer valor.

b) *Pérdida de presión a través de las persianas*

- *Determinar un largo de persiana (largo std. = 24 ft)*

- *Determinar el área total que ocuparan las persianas*

$$A_p = 24 (\text{número de celdas}) (2 \text{ lados}) (\text{altura})$$

- *Determinar el flujo de aire*

- *Determinar los pies cúbicos por minuto de aire (cfm) a la entrada como:*

$$cfm = \frac{\text{flujo aire} [lb/h]}{60(\rho_G)}$$

A tot per	Flujo aire	cfm
2,409.05	15,271,666.67	3,393,703.70

- Determinar la velocidad a través de las persianas (medida en la cara de las mismas):

$$fpm = \frac{cfm}{\text{área total de persianas}}$$

<b>fpm</b>
1,408.73

- La pérdida de presión total en las persianas se calcula sabiendo que:

$$\frac{0.32 - 0.02}{x} = \frac{1600 - 400}{1600 - fpm}$$

$$\Delta P' = 0.32 - x$$

<b>Pérdida</b>
0.27

- d) Pérdida de presión a través de los eliminadores de rocío:

$$\frac{2000 - 800}{200 - G_u} = \frac{0.07 - 0.01}{x}$$

$$\Delta P' = 0.07 - x$$

<b>Pérdida</b>
0.02

La pérdida de presión total se calcula como sigue:

$$\Delta P_{total} = \sum_{i=1}^3 \Delta P'_i$$

<b>Pérdida</b>
0.31

17. Calcular los BHP necesarios como:

$$BHP = \frac{\text{Flujo aire} [lb/h] * \Delta P_{total}}{\rho_G * 60} = \frac{6356 (0.50)}{60}$$

18. Calcular los BHP por celda

<b>BHP</b>	<b>BHP/celda</b>
332.11	39.70

Estos cálculos junto con los datos que se conocen permiten elaborar la **hoja de diseño** que se presenta a continuación.

## HOJA DE DATOS PARA DISEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

**Proceso Involucrado:** Producción de alcohol etílico a partir de la fermentación de grano

**Capacidad:** 50 millones gal/año

**Días de operación/año:** 330

**Producto Principal:** Etanol 199 de prueba (99.5% en vol)

**Objetivo de la torre:** Proporcionar agua a 85°F para enfriar mezcla de masa convertida y líquido ligero a 100°F en intercambiadores de calor

**Flujo requerido:** 25,000 GPM

**Alimentación secundaria**

**a los int. calor:** Azúcares fermentables, agua y levadura

**Localidad:** Ensenada, B.C.N.

**Tipo de clima:** BWk – Muy seco templado

**Tipo de suelo:**

**Tipo de zona sísmica:** D – Grandes sismos históricos. La aceleración del suelo puede sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad

	CANTIDAD	UNIDADES
Flujo	25,000.00	GPM
Carga térmica	7E6	BTU/min
Temperatura agua fría	85.00	°F
Temperatura agua caliente	103.00	°F
Temperatura de bulbo seco promedio	70.00	°F
Temperatura de bulbo húmedo *	59.54	°F
Precipitación media anual	9.88	IN
Velocidad máxima del viento	18.00	MPH
Factor de seguridad	0.1	
Aplicación del factor	27,500.00	GPM
Rango	16.40	°F
Tipo de rango	Mediano	
Aproximación	25.46	°F



DIMENSIONES REQUERIDAS		
Superficie	15,056.57	ft <sup>2</sup>
	1,398.76	m <sup>2</sup>
Altura de empaque	58.00	Ft
	17.68	M
Número de celdas	8.00	
Área por celda	1,800.00	ft <sup>2</sup>
	167.22	m <sup>2</sup>
Dimensiones de la celda	30.00 x 60.00	Ft
	9.00 x 18.00	M
Pérdida de presión total	0.31	In H <sub>2</sub> O
BHP por celda	39.70	BHP

**Tipo de torre:**

Torre de tiro inducido y flujo a contracorriente

**Justificación:**

Deberá ser de tiro inducido debido a su tamaño y a la necesidad de no depender de la velocidad del viento. De flujo a contracorriente pues la curva de equilibrio obtenida es la correspondiente a este tipo de torre. Los factores climatológicos indican que debiese ser una torre de flujo cruzado sin embargo, la influencia de estos no es tan importante como ajustar el tipo de torre a los datos de diseño.

<b>DETALLES ESTRUCTURALES</b>		
Dimensiones de la torre	32.80 x 472.32	Ft
	10 x 144	M
Altura total de la torre	68.18	Ft
	20.78	M
<i>Altura Bacín</i>	<i>1.64</i>	<i>Ft</i>
	<i>0.50</i>	<i>M</i>
<i>Altura Empaque</i>	<i>57.99</i>	<i>Ft</i>
	<i>17.68</i>	<i>M</i>
<i>Altura Chimenea a ventilador</i>	<i>7.87</i>	<i>Ft</i>
	<i>2.40</i>	<i>M</i>
<i>Altura Plataformas de seguridad</i>	<i>0.66</i>	<i>Ft</i>
	<i>0.20</i>	<i>M</i>
Superficie de la torre	15,056.13	Ft <sup>2</sup>
	1,398.76	M <sup>2</sup>
Tipo de anclaje	Empotramiento	
Peso de embarque de la torre	2.80E6	Lb
	1600.00	Ton
Peso en operación	3.40E6	Lb
	1704.00	Ton

<b>MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN</b>	
Miembros estructurales	Concreto armado
Bacín	Concreto armado
Revestimiento	Mortero con aditivos especiales
Chimeneas de los ventiladores	Concreto armado
Piso del ventilador	Concreto armado
Eliminadores de rocío	Fibra de vidrio
Relleno	Poliestireno de alto impacto (PAI)
Sistema de distribución de agua	Acero al carbón
Accesorios menores	Acero adonizado
Soportería de equipo mecánico	A base de neoprenos intercambiables
Conexiones estructurales	Cordón filete 7018-1/4
Conexiones de las anclas	Según detalle anexo
Pernos de anclaje	Acero A-42
Escaleras y barandales	Acero estructural A-42 con recubrimiento epóxico
<b>VENTILADORES</b>	
Cantidad	8
Tipo	
Fabricante	
Potencia	40.00 HP
Diámetro	
No. de aspas	
Velocidad de giro	
Velocidad periférica	
Potencia al freno	
Material de las aspas	
Material del cubo	
Presión estática	
Presión de velocidad	
Gasto de aire/ventilador	
Eficiencia estática	

<b>BOMBAS</b>		
TDH	29.51	
Potencia	591.59	HP
Cantidad		
Tipo		
Fabricante		
Capacidad		
<b>MOTORES</b>		
Número	8 +	
Aplicación	Tipo	
Ventiladores	Encapsulados en plástico	
Bombas		
<b>SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN</b>		
Tipo	Flujo por presión con líneas de ascenso a los lados	
Material	Acero	
Longitud tubería	1033	ft
	315	M

- *Justificación del valor elegido de Tbh: Referirse al ANEXO V*

Una vez diseñada la torre de enfriamiento y seleccionados sus accesorios es necesario tomar una muestras de agua para determinar si será necesario un pre - tratamiento y/o un post - tratamiento. A continuación se muestran los resultados de laboratorio para el agua de repuesto que se utilizará en la torre de enfriamiento a diseñar.

Parámetro	Unidades	Valor a 10 c.c.	Valor recomendado (máx)
Alcalinidad F	mg/L CaCO <sub>3</sub>	45.00	170.00
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	49.77	500.00
Algas	Algas/mL	420.00	300.00 - 350.00
Carbonatos	Mg/L	30.01	170.00
Cloruros	Mg/L	344.59	-
Conductividad	μs	1448.00	-
CTB	Col/mL	10,000.00	10,000.00
Dureza de Ca	Mg/L	70.50	-
Dureza de Mg	Mg/L	81.50	-
Dureza total	Mg/L	152.00	-
Hierro	Mg/L	1.50	3.00
PH	-	6.55 @ 25°C	6.00 - 9.00
ST	mg/L	971.00	-
Sílice	mg/L	159.23	140.00
SST	mg/L	2.00	75.00
Sulfatos	mg/L	543.76	1200.00
Turbidez	UTN	8.80	-
Zinc	mg/L	1.26	10.00

A partir de estos valores podemos calcular los índices de corrosividad e incrustación. En este caso se calcularán el índice de Ryznar y el de Langelier:

$$\begin{aligned} \text{RSI} &= 2\text{pHs} - \text{pHact} \\ \text{pHs} &= \text{pCa} + \text{pALK} + \text{C} \\ \text{pHs} &= 1.8482 + 1.6532 + 2.9872 = 6.4886 \\ \text{RSI} &= 2(6.4886) - 6.55 \end{aligned}$$

$$\text{RSI} = 6.4272$$

$$\begin{aligned} \text{LSI} &= \text{pHact} - \text{pHs} \\ \text{LSI} &= 6.55 - 6.4886 \end{aligned}$$

$$\text{LSI} = 0.0614$$

Según LSI se tiene un agua sobresaturada con tendencia a la incrustación; el RSI indica que es un agua estable ligeramente incrustante y no es corrosiva.

Por lo tanto, el pretratamiento que se le de al agua se deberá enfocar a reducir los carbonatos así como los valores que están por arriba del máximo recomendado que son las algas y el sílice. Esto indica que se deberá dar un tratamiento para INCRUSTACIÓN y ENSUCIAMIENTO BIOLÓGICO. Además, deberá estimarse el incremento de estos valores de acuerdo al número de ciclos de concentración a los cuales operará la torre.

Con el objetivo de no utilizar ninguna clase de tratamiento adicional al ya mencionado es importante establecer hasta cuántos ciclos de concentración se puede operar la torre de enfriamiento. La alcalinidad total permite 10 ciclos sin sobrepasar el valor máximo recomendado, la alcalinidad F permite solamente 4. los carbonatos permiten entre 5 y 6 y los sólidos no representan problema. La torre podría operar cuando mucho a 4 ciclos de concentración

En el caso en el que se desea un ahorro de agua a través de un mínimo de volumen de purga se puede llevara la operación a 10 ciclos de concentración. Los contaminantes clave en este caso tendrían los siguientes valores:

Parámetro	Unidades	Valor	Valor recomendado (máx)
Alcalinidad F	mg/L CaCO <sub>3</sub>	450.00	170.00
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	490.77	500.00
Carbonatos	Mg/L	300.01	170.00
Sílice	mg/L	1,590.23	140.00
SST	mg/L	20.00	75.00

Los balances de agua para cada uno de estos casos quedarían de la siguiente manera:

#### **Datos**

$$T_e = 103^\circ\text{F}$$

$$T_s = 85^\circ\text{F}$$

$$\text{Agua de recirculación} = 25,000 \text{ GPM} = 136,274.82 \text{ m}^3/\text{día}$$

De acuerdo a las fórmulas presentadas en el capítulo V, tenemos que:

a) Ciclos de concentración = 4

$$\text{Agua perdida por evaporación } A_e = 1,177.41 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Agua perdida por arrastre } A_a = 272.55$$

$$\text{Agua perdida por purgas } A_p = 392.47$$

$$\text{Agua de repuesto } A_r = 1,842.43$$

b) Ciclos de concentración = 10

$$\text{Agua perdida por evaporación } A_e = 1,177.41 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Agua perdida por arrastre } A_a = 272.55$$

$$\text{Agua perdida por purgas } A_p = 130.82$$

$$\text{Agua de repuesto } A_r = 1,580.78$$

Esto quiere decir que al llevar la torre a 10 ciclos de concentración el ahorro de agua será de 261.64 m<sup>3</sup>/día pero habrá que hacer una inversión en tratamiento extra. La decisión de cuál es el número óptimo de ciclos de concentración para operar, se determinará con ayuda de un análisis económico en el que se determine el precio unitario por metro cúbico de agua y el precio unitario por metro cúbico de agua tratada.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para diseñar una torre de enfriamiento que lleve a cabo un proceso de humidificación eficiente es necesario:

- a) Conocer las condiciones climatológicas de la región en donde se instalará la torre
- b) Conocer el proceso efectuado por la planta en donde se instalará la torre
- c) Hacer cuidadosamente los cálculos para el diseño térmico con la finalidad de evitar incurrir en gastos innecesarios por un sobrediseño o tener problemas posteriores de operación por tener una torre diseñada para otro tipo de condiciones o para otras necesidades
- d) Hacer un diseño particular y no construir con base en una torre existente en otro lugar
- e) Seleccionar cuidadosamente los materiales de construcción que se utilizarán procurando que estos resistan las condiciones adversas que pudiesen existir en la torre a diseñarse
- f) Adaptar a la región los manuales de diseño y operación
- g) Procurar disminuir costos a través de buenas prácticas operativas y nunca en materiales de construcción o equipo mecánico
- h) Tener conocimiento de todos los tipos de torres existentes para así seleccionar la que más se apegue a las necesidades particulares

Nunca se habrá de incorporar al proceso de producción una torre de enfriamiento sin antes haber realizado una prueba. Esta prueba deberá realizarse cuando la torres esté completamente terminada; deberá contarse con la instrumentación adecuada y deberá planearse para que se lleve a cabo en un día en el cual las condiciones climatológicas sean el prototipo de la región. El agua suministrada a la torre deberá tener la temperatura y las propiedades fisicoquímicas que tendrá en la operación diaria.

El diseño de la torre tiene tanta importancia como la tiene la operación de la misma. Una torre bien diseñada pero mal operada no será eficiente. Un punto muy importante en la torre es la calidad del agua que entra a la misma; es recomendable hacer análisis de laboratorio periódicos para detectar cualquier valor fuera del intervalo permitido de tal

forma que se hagan los ajustes pertinentes en el pretratamiento, acondicionamiento o tratamiento lateral del agua. La operación segura y eficiente depende también, en gran medida, del mantenimiento que se le de al equipo mecánico; cada semana se deberá la menos inspeccionar el equipo y habrán de programarse sesiones de mantenimiento periódicas.

Un punto importante en la operación de una torre y que no cobró importancia hasta hace pocos años es el impacto ambiental que ésta pueda ocasionar. Deberá tratarse de una torre la cual no descargue agua contaminada en ríos, lagos o el mar. Además, es importante procurar que el consumo de agua de esta torre sea el más bajo posible. Esto puede lograrse a través de la recuperación de purgas de la misma torre, de la elevación en el número de ciclos de concentración o bien en la recuperación de purgas de otros equipos de la planta de proceso como lo son las calderas para utilizarlas como agua de repuesto para la torre.

Una torre de enfriamiento es un servicio auxiliar por lo cual el costo de la misma debe estar acorde con el presupuesto que se tenga para este tipo de instalaciones. El diseño y construcción de una torre es un proyecto en el cual deberán hacerse las consideraciones económicas que se hacen en cualquier otro; deberán además seguirse las prácticas habituales para tener un control del mismo.

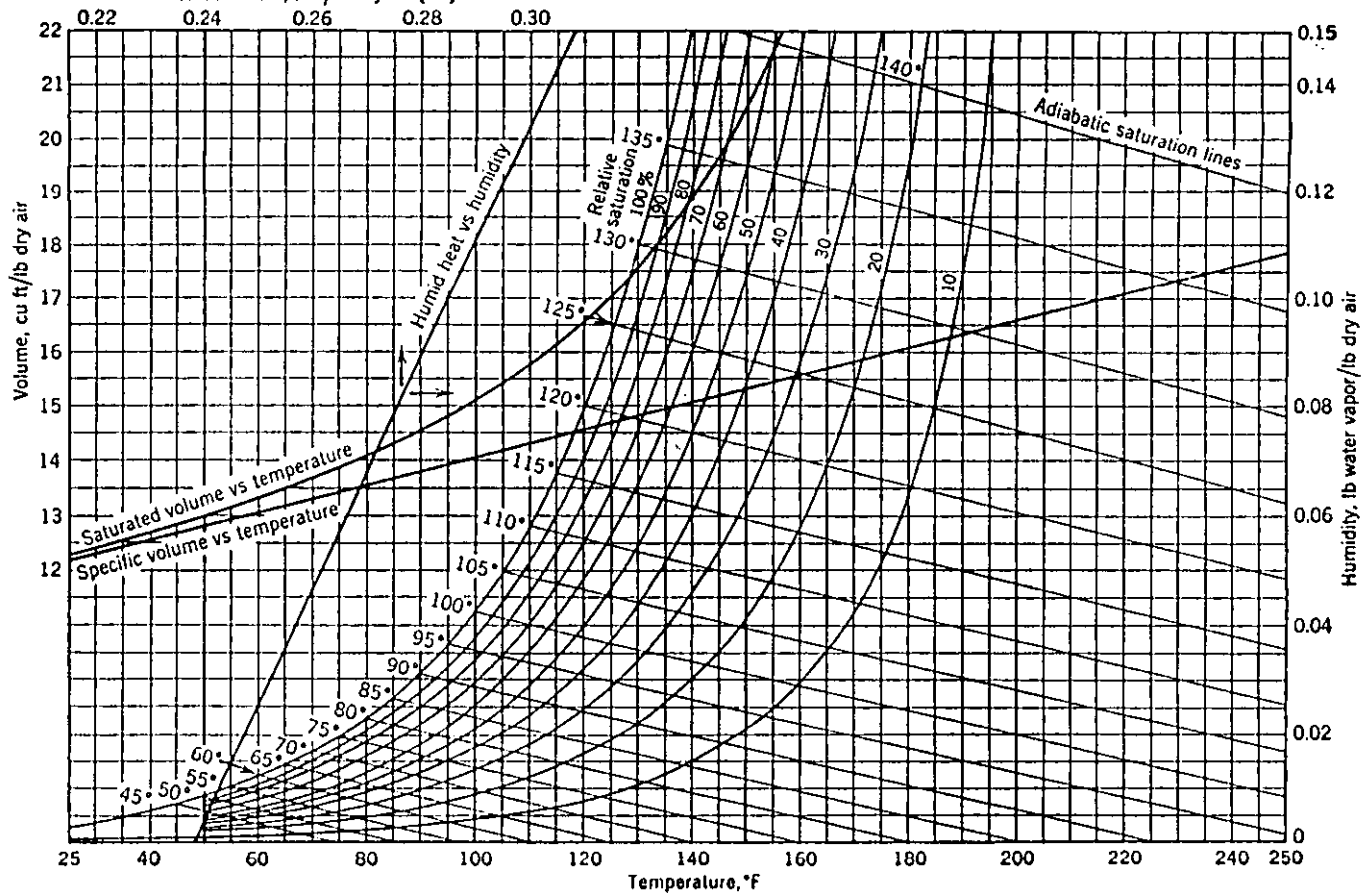
Una vez construida la torre, probada y lista para operar; es conveniente revisarla una vez más; para esto se sugiere aplicar un cuestionario como el que se presenta a continuación el cual equivale a un compendio de los temas tratados en este trabajo.

***Revisión final de Torre de Enfriamiento antes de iniciar su operación***

- ¿La temperatura de bulbo húmedo seleccionada es la adecuada? (Cap.II)
- ¿El gasto para el cual se diseñó la torre es el que se necesita en el proceso? (Cap. II)
- ¿Los materiales seleccionados son los adecuados para soportar el peso en operación, las condiciones del agua, las inclemencias del tiempo y otros factores adversos? (Cap.II)
- ¿Se especificaron los accesorios adecuados? (Cap.II)
- ¿Las válvulas, tubería y bombas tienen la capacidad necesaria? (Cap.II)
- ¿Se seleccionó el tipo de flujo adecuado? (Cap.III)
- ¿Los resultados de la prueba fueron aceptables? (Cap. IV)
- ¿La calidad del agua permitirá una operación adecuada? (Cap. V)
- ¿Se hicieron pruebas de tratabilidad al agua antes de seleccionar el pretratamiento o tratamiento a usar? (Cap. V)
- ¿La torre es segura para los operadores? (*accesorios de seguridad como barandilla, presencia de "Legionella"*) (Cap. II y V)
- ¿La torre puede convertirse en una molestia para la población cercana (si la hay) a causa de las vibraciones, el ruido, problemas de visibilidad causados por la pluma? (Cap. V)
- ¿Es rentable la operación de la torre? (Cap.V y VI)
- ¿Se cuenta con el personal necesario para operar la torre, monitorearla y darle mantenimiento? ¿Está capacitado este personal?
- ¿Hubo algún cambio en el proceso asociado a la torre después de haber hecho el diseño?
- ¿Hay obstrucciones que provoquen desviación de la pluma, alteración en el volumen de aire, recirculación? (Cap. V)

Una vez contestado esto y no habiendo detectado inconvenientes, la torre puede empezar su operación.

# ANEXOS



Humidity chart for the air-water system<sup>18</sup>

### ANEXO I

Carta psicrométrica o carta de humedad para el sistema aire-agua. P = 1 atm

T en °F, H en lb vap agua/lb aire seco  
 V en pies cúbicos/lb aire seco

## ANEXO II

### PRUEBA A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CT-003

Fecha: 15-08-99

HORA DE INICIO: 9hs

HORA DE FINALIZACIÓN: 12 hs

#### PLAN DE TOMA DE DATOS

HORA	VARIABLE	ENCARGADO	HORA	VARIABLE	ENCARGADO
9	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv		10:35	Tf, Tc, Tbh, Vv	
09:05	Tf, Tc, Tbh, Vv		10:40	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv	
09:10	Tf, Tc, Tbh, Vv		10:45	Tf, Tc, Tbh, Vv	
09:15	Tf, Tc, Tbh, Vv		10:50	Tf, Tc, Tbh, Vv	
09:20	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv	En esta columna se deben incluir los nombres o iniciales de las personas responsables de hacer cada una de las mediciones	10:55	Tf, Tc, Tbh, Vv	En esta columna se deben incluir los nombres o iniciales de las personas responsables de hacer cada una de las mediciones
09:25	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:00	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv	
09:30	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:05	Tf, Tc, Tbh, Vv	
09:35	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:10	Tf, Tc, Tbh, Vv	
09:40	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv		11:15	Tf, Tc, Tbh, Vv	
09:45	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:20	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv	
09:50	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:25	Tf, Tc, Tbh, Vv	
09:55	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:30	Tf, Tc, Tbh, Vv	
10:00	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv		11:35	Tf, Tc, Tbh, Vv	
10:05	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:40	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv	
10:10	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:45	Tf, Tc, Tbh, Vv	
10:15	Tf, Tc, Tbh, Vv		11:50	Tf, Tc, Tbh, Vv	
10:20	GPM,Tf,Tc,Tbh,Vv		11:55	Tf, Tc, Tbh, Vv	
10:25	Tf, Tc, Tbh, Vv	12:00	GPM, Tf, Tc, Tbh		
10:30	Tf, Tc, Tbh, Vv				

ELABORÓ COZ  
AUTORIZÓ MPM

Fig. a

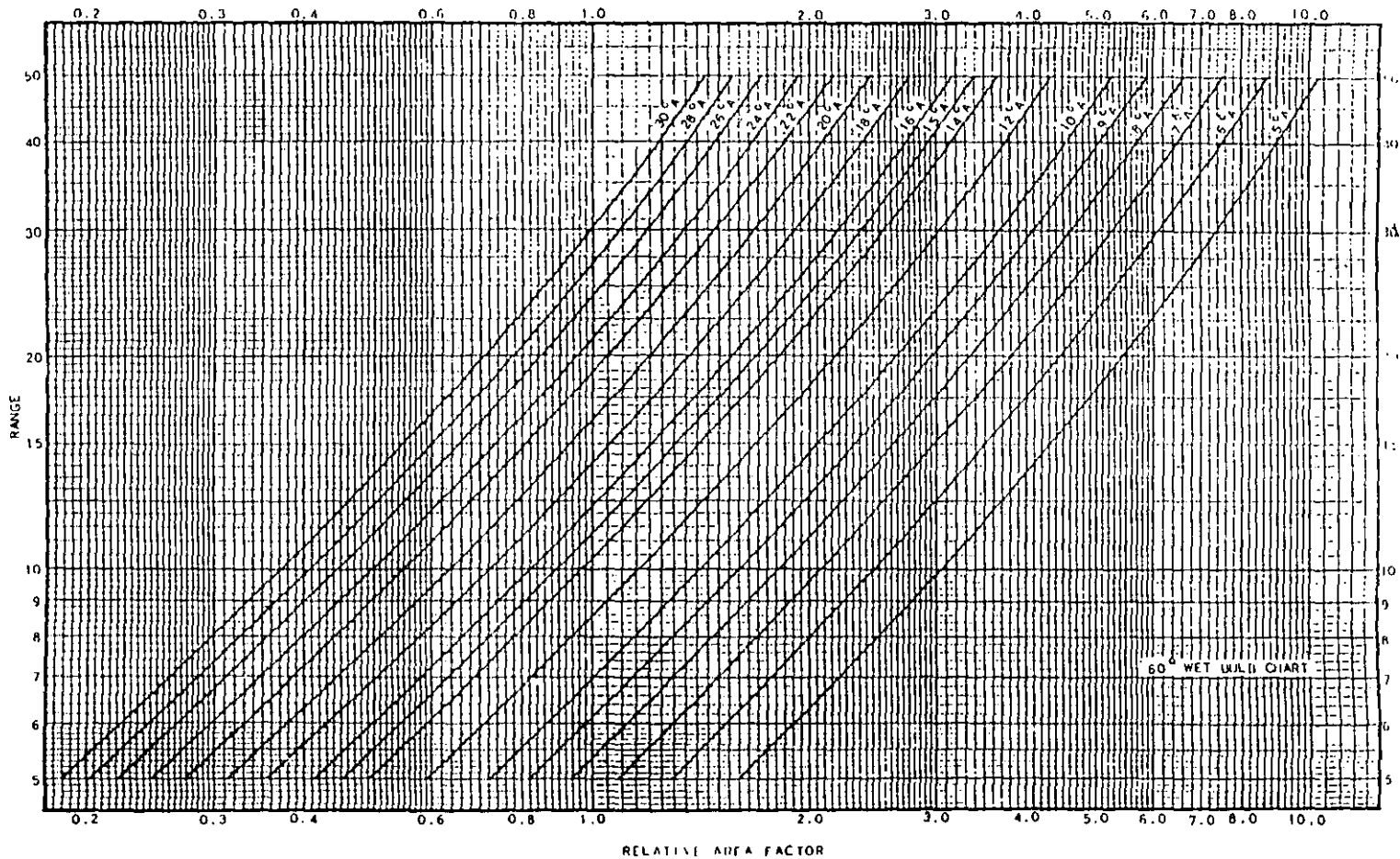
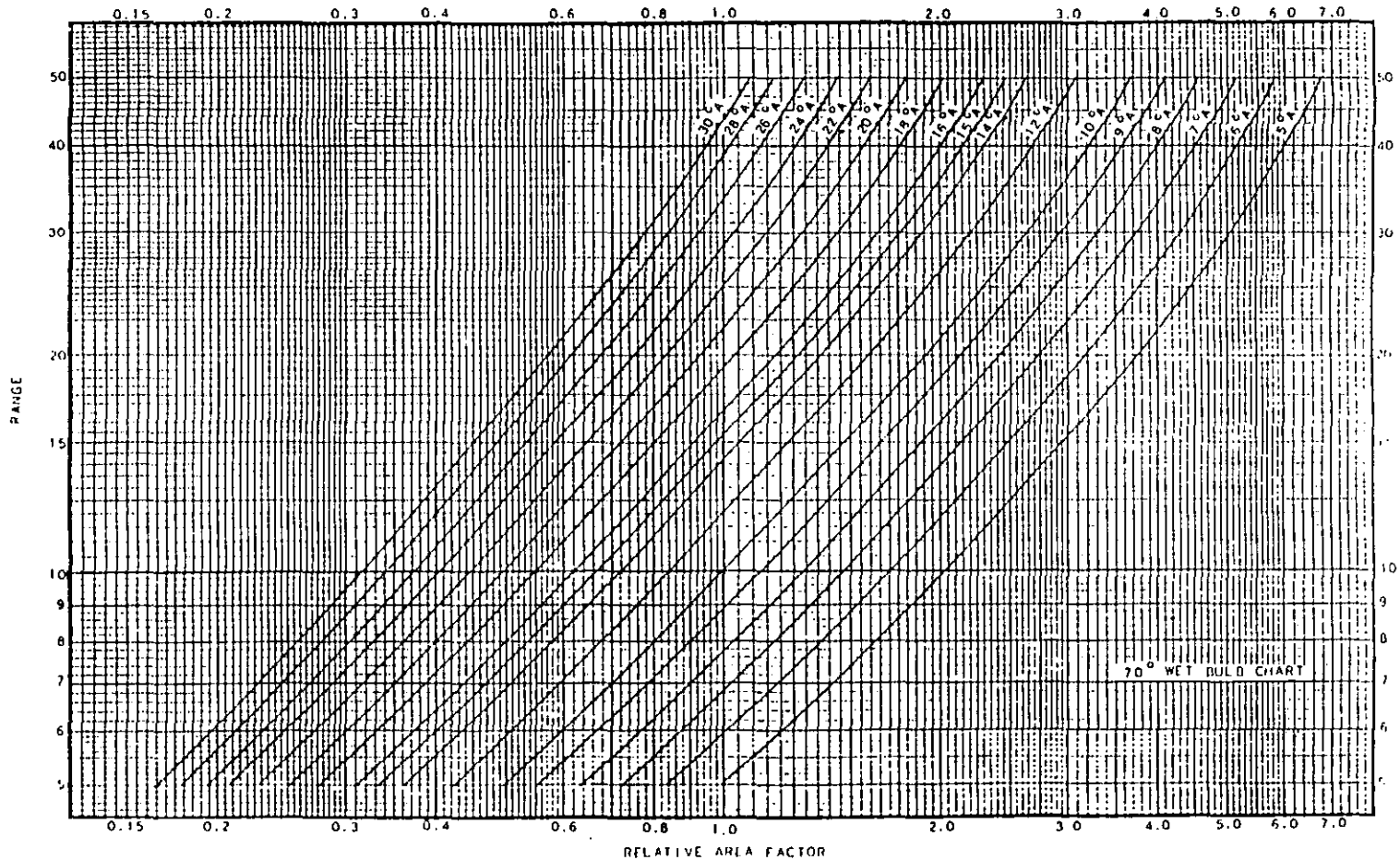


Fig. b





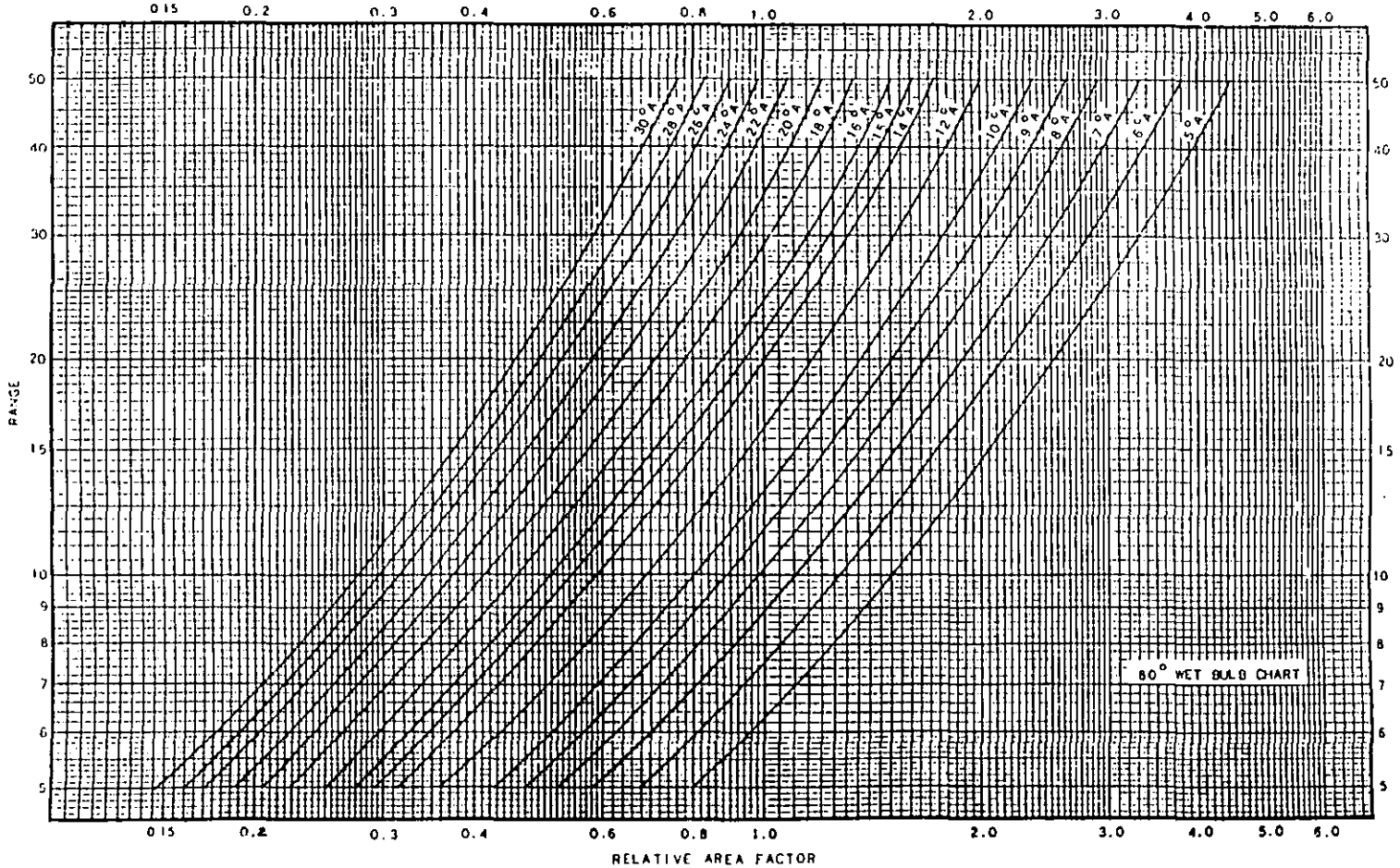


Fig. c

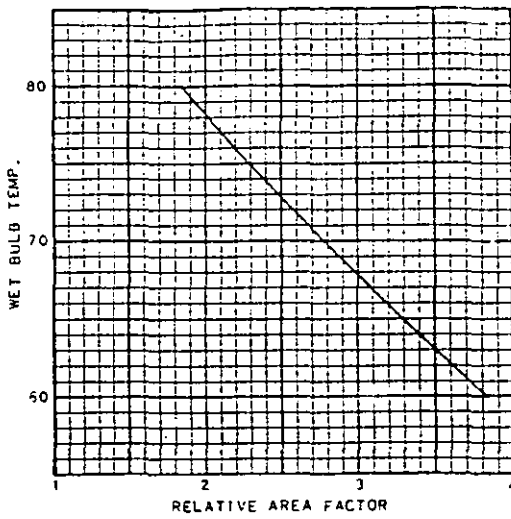


Fig. d

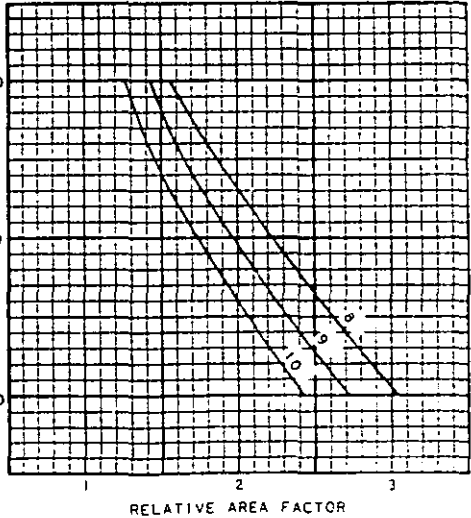


Fig. e

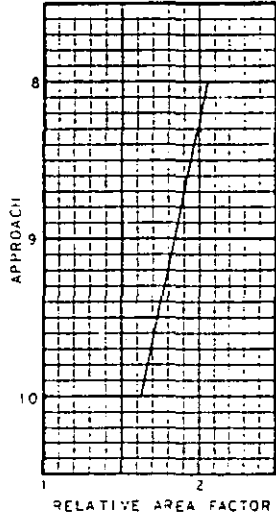


Fig. f

## ANEXO IV

*Tabla para obtener el valor de A*

Sólidos totales (ppm)	A
50 - 300	0.1
400 -1000	0.2

*Tabla para obtener el valor de B*

Temperatura (°F)	B
32 -34	2.6
36 - 42	2.5
44 - 48	2.4
50 - 56	2.3
58 - 62	2.2
64 - 70	2.1
72 - 80	2.0
82 - 88	1.9
90 - 98	1.8
100 - 110	1.7
112 -122	1.6
124 - 132	1.5
134 - 146	1.4
148 -160	1.3
162 - 178	1.2

*Tabla para obtener C*

Dureza de calcio (ppm)	C
10 - 11	0.6
12 - 13	0.7
14 - 17	0.8
18 - 22	0.9
23 - 27	1.0
28 - 34	1.1
35 - 43	1.2
44 - 55	1.3
56 - 69	1.4
70 - 87	1.5
88 - 110	1.6
111 - 138	1.7
139 - 174	1.8
175 - 220	1.9
230 - 270	2.0
280 - 340	2.1
350 - 430	2.2
440 - 550	2.3
560 - 690	2.4
700 - 870	2.5
880 - 1000	2.6

*Tabla para obtener D*

Dureza de calcio (ppm)	C
10 - 11	1.0
12 - 13	1.1
14 - 17	1.2
18 - 22	1.3
23 - 27	1.4
28 - 34	1.5
35 - 43	1.6
44 - 55	1.7
56 - 69	1.8
70 - 87	1.9
88 - 110	2.0
111 - 138	2.1
139 - 174	2.2
175 - 220	2.3
230 - 270	2.4
280 - 340	2.5
350 - 430	2.6
440 - 550	2.7
560 - 690	2.8
700 - 870	2.9
880 - 1000	3.0

**ANEXO V: ESTUDIO ESTADÍSTICO PARA OBTENER Tbh DE DISEÑO****ANALISIS DE CONFIABILIDAD  
ESCALA ALPHA**

Datos de Temperatrua de bulbo húmedo para un lustro 1995-1999

	TBH99	TBH98	TBH97	TBH96	TBH95
ENE	2.4	1	1	2	2
FEB	2.7	1.5	2	3	3
MAR	3.4	2	3.5	3	3
ABR	10	8	9	11	11
MAY	10.9	11	10	11	11
JUN	16.6	17.5	16	18	18
JUL	19.1	19	19	18	18
AGO	18.4	17	17	15	15
SEP	17.1	18	15	16	16
OCT	5.2	6	6	9	9
NOV	5	6	5	6	6
DIC	3.3	2	3	4	4

Variable	Media	Desv Std	Casos
TBH99	9.5092	6.6945	12
TBH98	9.0833	7.125	12
TBH97	8.875	6.4248	12
TBH96	9.6667	6.0653	12
TBH95	9.6667	6.0653	12

	Media	Mínimo	Máximo	Rango	Máx/Mín	Varianza
Medias	9.3602	8.875	9.6667	0.7917	1.0892	0.1305
Varianzas	42.0872	36.7879	50.7652	13.9773	1.3799	34.8939
Correlaciones	0.9821	0.9679	1	0.0321	1.0331	0.0001

Coeficientes de confirabilidad 5 VARIABLES

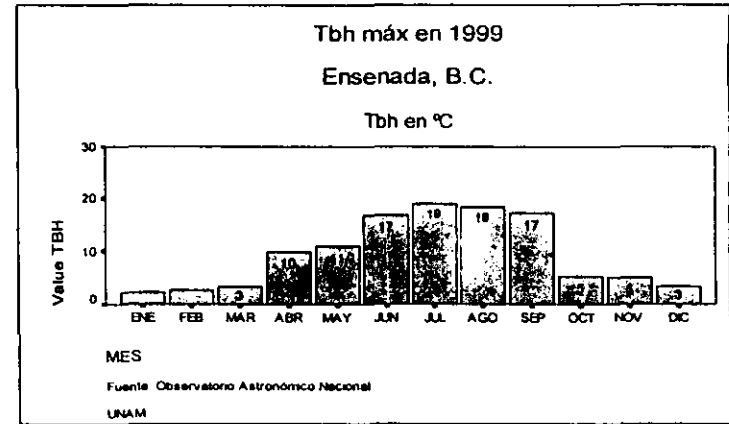
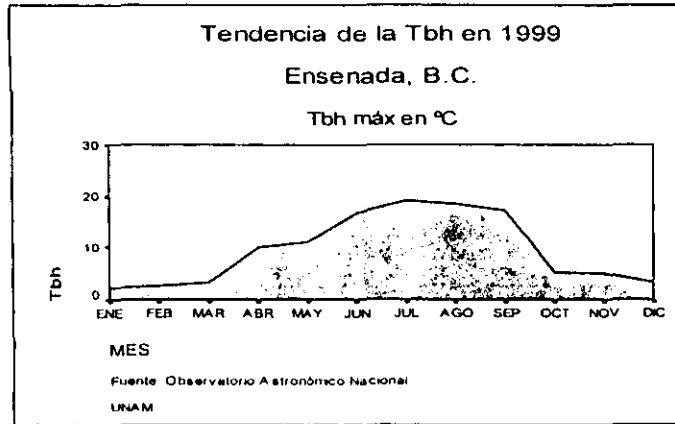
Alpha = .9954

Alpha estandarizada = .9964

*Esto quiere decir que no existe una diferencia significativa de un año a otro por lo que se eligió 1999 para hacer el análisis.*

# ANÁLISIS DE Tbh ANUAL

AÑO: 1999



**Resumen del Análisis de Casos: Sólo se presentan los meses extremos (más frío y más caliente)**

*Todos los meses fueron analizados*

Descriptiva: con 95% de confiabilidad

MES	Estadística	Error Std.
ENE99	Media 2.4089	0.0418
FEB99	Media 2.7000	0.0457
JUL99	Media 19.1232	0.1846
AGO99	Media 18.3893	0.0598

Valores Extremos: con 95% de cni fiabilidad

MES	Valor
ENE99	Máximo 2.9
	Mínimo 2
FEB99	Máximo 3.2
	Mínimo 2.2
JUL99	Máximo 21
	Mínimo 17
AGO99	Máximo 19.25
	Mínimo 17.8

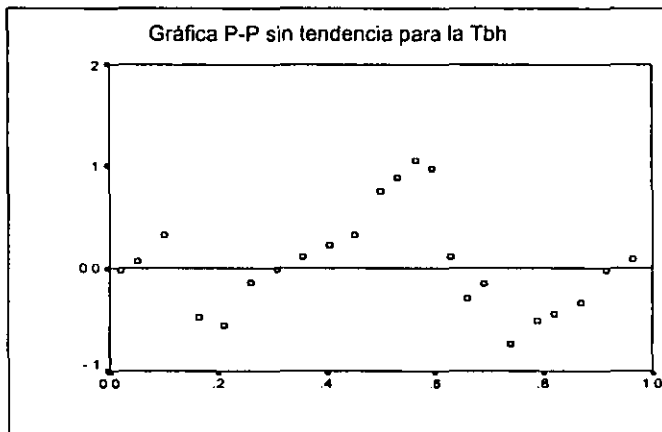
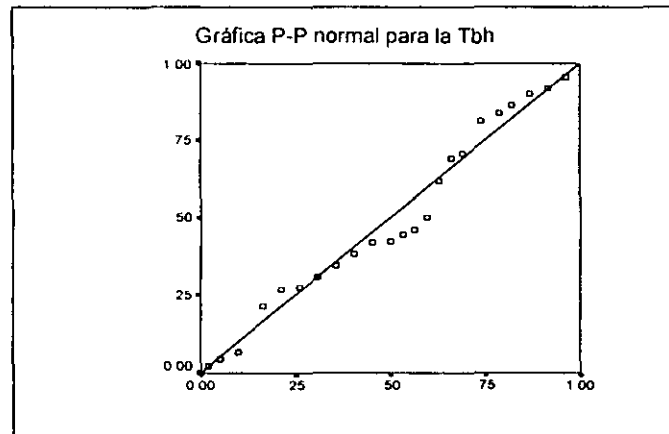
*Por la necesidad de diseñar con la Tbh media máxima de la región se eligió el mes de julio que es el que presenta los extremos más altos.*

## Estadística descriptiva

	N	Mínimo	Máximo	Media
Tbh	31	17	21	19.1232

## GRAFICA PP

Utilizando la fórmula de estimación proporcional de Blom

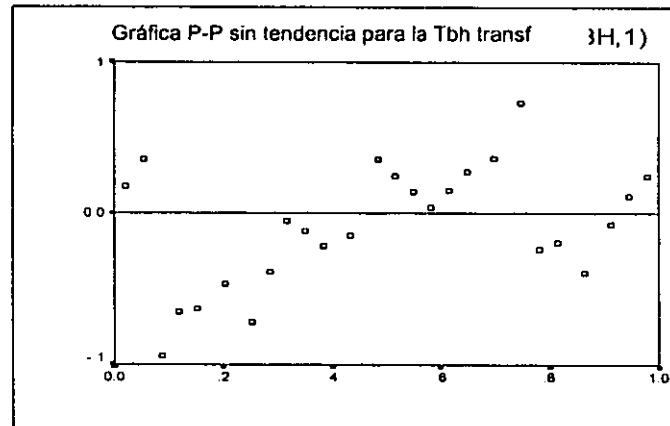
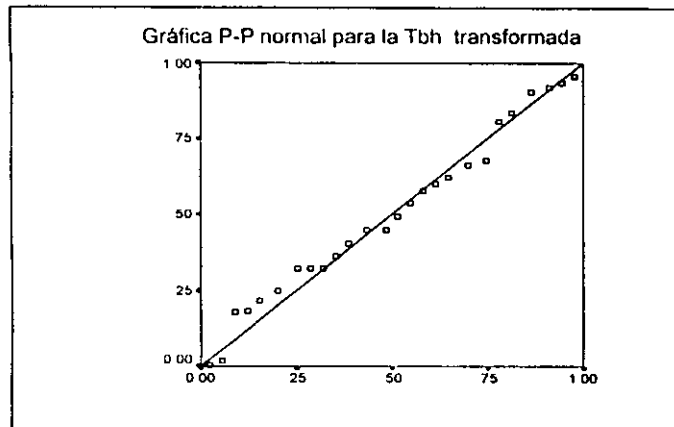


## Prueba de una muestra de Kolmogorov - Smirnov

Distribución Normal		TBH
Parámetros normales	Media	15.3029
	Desv.Std.	1.0049
Dif. más extremas	Absoluta	0.1214
	Positiva	0.1214
	Negativa	-0.1043
Kolmogorov-Smirnov Z		0.6760
Asint. (2 colas)		0.7507



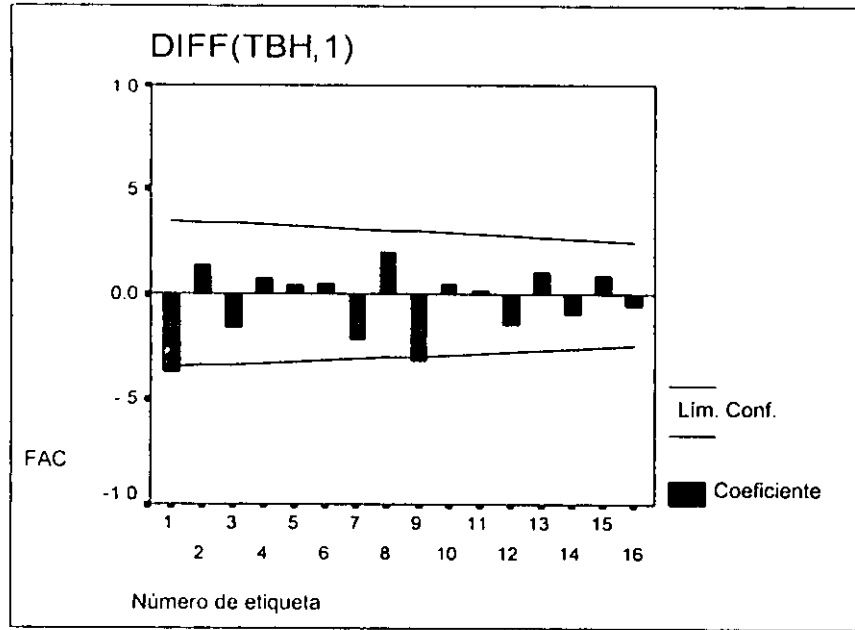
**Transformando las variables:**



**Prueba de una muestra de Kolmogorov - Smirnov**

<i>Distribución Normal</i>		DIFF(TBH,1)
Parámetros normales	Media	0.0184
	Desv.Std.	0.9109
Dif. más extremas	Absoluta	0.1144
	Positiva	0.0916
	Negativa	-0.1144
Kolmogorov-Smirnov Z		0.6267
Asint. (2 colas)		0.8270

## Sereis en el tiempo



*Todos los valores están dentro de los límites de confiabilidad como se puede ver en esta gráfica de factor de autocorrelación a través del tiempo*

*El valor de la media para el mes de Julio es un valor significativo, parte de una distribución normal y confiable.*

*Esto quiere decir que puede ser usado con fines de diseño*

## GLOSARIO

- **Alcalinidad.** Magnitud de la fuerza de un álcali o base, medible por determinación de la concentración de hidroxiliones.
- **Aproximación.** Diferencia entre la temperatura del agua a la salida de la torre de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo del aire.
- **Biomasa.** Masa total de los seres vivos, animales y vegetales o bien de un espacio geográfico en el que habitan seres vivos a condiciones constantes o cíclicas.
- **Calor latente.** Calor asociado al cambio de estado (de propiedades) de un material sin modificar su temperatura.
- **Calor sensible.** Calor que provoca un aumento de temperatura en la materia.
- **Capacidad térmica.** Es el calor transmitido en la torre de enfriamiento, calculado en base al gasto y las temperaturas de entrada y salida del agua en el equipo.
- **Carta psicrométrica.** Representación gráfica de las propiedades físicas del aire con diferentes contenidos de humedad. Diagrama de fases para el sistema aire – agua.
- **Ciclos de concentración.** Número de veces que el contenido de sólidos en el agua se incrementa; Si se duplica, son dos ciclos de concentración; si se triplica serán tres y así sucesivamente.
- **Clarifloculación.** Proceso compuesto por la clarificación y la floculación. Es un proceso utilizado para tratar aguas consistente en la remoción de agentes promotores del ensuciamiento a través de la precipitación y formación de flocos que sedimentan.
- **Contracorriente.** Configuración de una torre de enfriamiento en la que el agua y el aire fluyen en direcciones opuestas.
- **Desviación estándar.** Es una medida de dispersión alrededor de la media. En una distribución normal, el 95% de los casos caen dentro de dos desviaciones estándar (2 DS) de la media. Por ejemplo, si la media de temperaturas de bulbo húmedo es de 18°C con una DS de 1.5, entonces, el 95% de las temperaturas están entre 15 y 21°C en una distribución normal.

- **Diferencial de temperatura.** Es la diferencia entre el agua caliente que entra a la torre de enfriamiento y el agua fría que sale de la misma.
- **Flóculos.** Pequeños copos producto de la precipitación de los coloides de una solución.
- **Flujo cruzado.** Configuración de una torre en la que el aire y el agua fluyen en forma perpendicular.
- **Humedad relativa.** Es la relación entre la presión parcial del agua en una mezcla con aire y la presión de vapor de agua, a la misma temperatura.
- **Media.** Cantidad que representa el promedio de varias otras.
- **Miembros estructurales.** Columnas, amarres, refuerzos, juntas y traveses.
  - **Columnas:** Son los miembros de soporte vertical principales en la estructura de la torre
  - **Amarres horizontales:** Son las principales uniones horizontales de interconexión de las columnas.
  - **Refuerzos:** Son los miembros diagonales principales en la estructura.
  - **Juntas y traveses:** Son los soportes horizontales para cargas vivas y cargas muertas.
- **Operación normal.** Es el funcionamiento del equipo dentro de las variaciones de las condiciones de operación, capacidad y eficiencia, previstas en las hojas de datos y documentos posteriores, y garantizadas por el fabricante, sin requerir ningún mantenimiento mayor, reparación o reposición de partes, excepto el mantenimiento propio de dicho funcionamiento.
- **Ósmosis inversa.** Paso forzado de líquido a través de una membrana para lograr ir del lado con mayor concentración al de menor concentración.
- **Partes no estructurales.** Consiste de partes tales como: piso de la plataforma del ventilador, rellenos, eliminadores de rocío, depósitos colectores y redistribuidores de agua caliente y fría, conductos de agua, etc.
- **Pérdidas por arrastre.** Cantidad de agua perdida en una torre de enfriamiento, arrastrada en forma de finas gotas por el aire de la salida.

- **Pérdidas por evaporación.** Cantidad de agua que se elimina con el aire a la salida de la torre de enfriamiento por concepto del incremento de humedad de éste en el equipo.
- **Presión osmótica.** Presión natural que hace que un líquido se desplace de la zona de menor concentración a la de mayor.
- **Psicrómetro.** Dispositivo utilizado para cuantificar la cantidad de agua presente en una corriente de aire.
- **Purga.** Es la cantidad de agua, que en forma continua e intermitente, se elimina del sistema, con la finalidad de mantener el nivel de concentración de sales presentes abajo de un valor determinado.
- **Rango.** Relación de la capacidad térmica de la torre y la masa de agua enfriada.
- **Recirculación.** Es la parte del aire de salida de una torre que se recircula a la entrada de aire fresco de la misma.
- **Temperatura de bulbo húmedo ambiente.** Es la temperatura de equilibrio que adquiere el aire cuando se satura adiabáticamente.
- **Temperatura de bulbo húmedo de diseño.** Es la temperatura real del aire medida a las condiciones ambientales.
- **Temperatura de bulbo seco.** Temperatura del aire medida con un termómetro convencional manteniendo el bulbo seco.
- **Tiro forzado.** A través de ventiladores, el aire es forzado a subir por la torre operando a contracorriente con el agua.
- **Tiro inducido.** El aire entra por la parte inferior a ambos costados de la torre y es empujado hacia arriba. Para lograr esto, la torre se equipa con ventiladores en la parte superior.
- **Turbiedad.** Estado turbio u opaco de un líquido.

## MATERIAL CONSULTADO

### Libros

- Brown, George, *Unit Operations*, Vol I, John Wiley & Sons Inc. Publishers, EE.UU, 1950, 611 pp.
- Felder, Richard & Rousseau, Ronald, *Principios Elementales de los Procesos Químicos*, Trad. Ma. Eugenia costas, Addison-Wesley Iberoamericana, MEX, 1991, 729 pp
- Foust, A., Wenzel, L., Maus, L. & Andersen, L., *Principles of Unit Operations*, John Wiley & Sons Inc. Publishers, EE.UU., 1960, 578 pp
- Ludwig, Ernest, *Applied Process Design*, Gulf Publishing Co., EE.UU., 1997, 630 pp.
- Perry, *Manual del Ingeniero Químico*, Mc. Graw Hill, MEX, 1992
- Smith, J., Van Ness, H. & Abbott, M., *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamic*, Mc. Graw – Hill, EE.UU, 1996, pp. 763
- Valiente, Antonio y Noriega, Jaime, *Manual del Ingeniero Químico*, Ed. Limusa/Grupo Noriega Ed., MEX, 1993

### Normas

- *Especificaciones generales para proyecto de obras. Torres de Enfriamiento*. Norma No. 2.613.07, Petróleos Mexicanos. Primera Edición, México, D.F., 1970. 20 pp
- NOM-001-ECOL-1996

### Estudios/Tesis/Reportes

- Varios, *Somero estudio sobre la corrosión e incrustación que ocasiona el uso de agua en los sistemas de enfriamiento, causas y prevención*, Gerencia de Petroquímica, PEMEX, México, D.F., 1976, 43 pp

### Publicaciones Periódicas

- Varios, *Cooling Tower Fundamentals and Application Principles*, The Marley Co., Kansas City, MI, 1969, 116 pp
- The Pritchard Bulletin No.4.9.080A, *Counter Flow Cooling Towers for Industry*, Pritchard & Co., Los Angeles, CA, 1958

- The Pritchard Bulletin No.PPT 61-1, *Cross Flow Cooling Towers*, Pritchard & Co., Kansas City, MI, 1971
- Varios, *Offsite Facilities Manual*, Hydrocarbon Processing, Houston, TX, 120 pp
- The Fluor Company Manuals, Type 60. Counterflo Cooling Tower
- The Fluor Company Manuals, Type 53. Crossflo Cooling Tower
- The Fluor Company Manuals, Type 70. Cooling Towers
- The Fluor Company Manuals, Type 70. Crossflo Cooling Towers
- *Fluor-o-scope*, The Fluor Company Bulletin, Fal 1976, 23 pp.
- Magna Corporation Bulletin. No. 746, *Tower Controller – Optimizes Cooling Tower Corrosion and Scale Control*, US, 1968
- Kopper Company Inc. Manual, Aeromaster Fans
- Ecodyne Corporation. Fluor Cooling Products Co. Manuals, Type 70. Crossflow Cooling Towers – Cool Power at Work
- Lapsolite Plásticos Industriales, Boletín No. 150
- Rossie, J.P., *Dry – Type Cooling Systems*, Chemical Eng., No.7, Julio 1971, pp 58 – 63
- Rabb, A., *Are Dry Cooling Towers Economical?*, Hydrocarbon Processing, Vol. 77, No.2, Feb 1978, pp. 122-14
- Harris, Leroy S., *For Flexibility. The Air-Evaporative Cooler*, Chemical Engineering, Dic 24, 1962, pp. 77 – 82
- Park, J.E. & Vance, J.M., *Computer Model of Crossflow Towers*, Chemical Engineering Process, Vol. 67, No. 7, Julio 1971, pp. 55 – 57
- Roe, R.C. & Othmer, D.F., *Controlled Flash Evaporation*, Chemical Engineering Progress, Vol 67, No. 7, Julio 1971, pp. 77 – 79
- Wigham, Ian, *Designing Optimum Cooling Systems*, Chemical Engineering, Ago 9, 1971, pp. 95 – 102
- HWA, C.M., *Use of Phosphonates for Treating Cooling Water Systems*, Materials Protection and Performance, Dic 71, pp. 24 –25

- Liang – Tseng Fan, Jie – Tsai Tseng & Ching – Lai Hwang, *Optimization of Power Plant Cooling Water Discharge in Streams*, Journal of the Power Division, Dic 1971, pp 841 – 860
- Weisstuch, A. & Lange, K.R., *Micellization and Cooling Water Corrosion Inhibition*, Materials Protection and Performance, Dic 71, pp. 29 –3 2
- Donohue, J.M. & Sarno, C.V., *Pollution Abatement Pressures Influence Cooling Water Conditioning*, Materials Protection and Performance, Dic 71, pp. 19 –21
- Nester, D.W., *Salt Water Cooling Tower*, Chemical Engineering Progress, Vol. 67, No, 7, Julio 1971, pp. 49 – 51
- Schieber, John, *Control of Cooling Water Treatment: A Statistical Study*, Cooling Water Control Technical Paper No. 218, 1970
- *Dry Cooling Tower Shows*. Electrical Word, 1971, pp. 60 – 62
- Bass, Eugene & Green. *Checkup on Cooling Tower*, Chemical Engineering, Vol 10, No.12, Ene 71, pp. 26 –28
- Bischof, A. & Goldstein, P. *Chemical Treatment for Cooling Towers and Related Systems*, Materials Protection and Performance, Vol. 10, Num. 12, 1971, pp. 39 – 40
- Curtis & Silverstein, *Corrosion and Fouling Control*, Chemical Engineering Progress, Vol 67, Núm 7, Dic 71, pp. 39 – 44
- DeMonbrun, *Factors to Consider in Selecting a Cooling Tower*. Chemical Engineering, Sept 1968, pp. 106 –116
- Maze, Roy. *Practical Tips on Cooling Tower Sizing*, Hydrocarbon Processing, Feb 1967, Vol. 46, No. 2, pp. 123-126
- Kuehmsted, A.M., *Operation and Maintenance of Cooling Towers*. Chemical Engineering, May 3, 1971, pp. 112-115
- 

### **Páginas WWW**

- Arcti Chill [www.arctichill.com](http://www.arctichill.com)
- Beatz Dearbon Water MG [www.wateronline.com](http://www.wateronline.com)
- Cold Drop [www.coldrop.com](http://www.coldrop.com)



- Cooling Tower Doctor [www.ctdoc.com](http://www.ctdoc.com)
- Cooling Tower Institute [www.cti.org](http://www.cti.org)
- Delta Tower [www.deltacooling.com](http://www.deltacooling.com)
- Environmental Protecting Agency [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
- Evapco [www.evap.com](http://www.evap.com)
- Industrias Torres Marmex [www.marley.com.mx](http://www.marley.com.mx)
- Lakeside Cooling Towers [www.lakesidect.com](http://www.lakesidect.com)
- Marley Cooling Towers [www.marleyct.com](http://www.marleyct.com)
- Occupational Health, Safety & Environment (OSHA) [www.osha.org](http://www.osha.org)
- Polytech Services Inc. [www.polytechservices.com](http://www.polytechservices.com)
- Protector Safety Supply [www.protectorsupply.com.au/docs/ohs/](http://www.protectorsupply.com.au/docs/ohs/)
- SEMARNAP [www.semarnap.gob.mx](http://www.semarnap.gob.mx)
- Tower Performance Incorporation [www.tpict.com](http://www.tpict.com)
- Tower Vac [www.towervac.com](http://www.towervac.com)