



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA INDUSTRIAL

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO, OPERACION Y
MANTENIMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO TIPO INDUSTRIAL

ROBERTO MOLINA THOMAE

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1985

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

**BIBLIOTECA CENTRAL-USAC
DEPOSITO LEGAL
PROHIBIDO EL PRESTAMO EXTERNO**

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO, OPERACION Y
MANTENIMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO TIPO INDUSTRIAL

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

POR

ROBERTO MOLINA THOMAE

AL CONFERIRSELE EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1985

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Roberto Mayorga Rouge
VOCAL PRIMERO	
VOCAL SEGUNDO:	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL TERCERO:	Ing. Pedro Aguilar Polanco
VOCAL CUARTO:	Br. Abel García
VOCAL QUINTO:	Br. Carlos Farfán
SECRETARIO:	Ing. René Andrino Guzmán

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. César Augusto Fernández
EXAMINADOR:	Ing. Miguel Angel Zetina
EXAMINADOR:	Ing. Ivo Lavarreda P.
EXAMINADOR:	Ing. Jorge Siguere
SECRETARIO:	Ing. Manuel de Jesús Castellanos

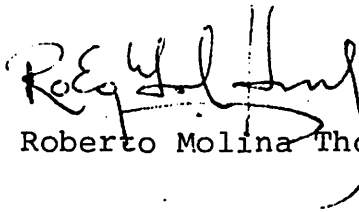
DL
08
T(75)M

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con lo establecido por las leyes y reglamentos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el Honor de someter a vuestra consideración mi trabajo de tesis titulado:

"Consideraciones para el Diseño, Operación y Mantenimiento de una Torre de Enfriamiento tipo Industrial"

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica - Industrial.


Roberto Molina Thomas.

Guatemala, Octubre de 1,985.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y
Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Coordinador del Area de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen favorable del Asesor, el contenido y la presentación del trabajo de tesis titulado "CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO TIPO INDUSTRIAL", presentado por el estudiante universitario Roberto Enrique Molina Thomae, recomienda su aprobación.

Ing. Julio César Rivera Peláez
COORDINADOR

Guatemala, septiembre de 1985.

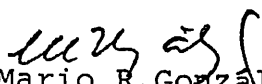
4 de septiembre de 1,985.

Ingeniero.
Jorge Peláez Castellanos.
Director de la Escuela de
Ingeniería Mecánica-Industrial.
Guatemala.

Señor Director:

Atentamente comunico a usted, como Asesor del Trabajo de Tesis titulado "Consideraciones para el Diseño, Operación y Mantenimiento de una Torre de Enfriamiento tipo Industrial", - del estudiante Roberto Enrique Molina Thomae, que después de - ser revisado en su totalidad y luego de realizar las correcciones necesarias, doy mi aprobación al mismo por cumplir los objetivos previamente trazados. Hago constar que los conceptos vertidos en este trabajo de tesis son responsabilidad del autor y del suscrito.

Muy agradecido por su atención. Atentamente,


Ing. Mario R. González C.
ASESOR



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y
Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area al trabajo de tesis titulado: "CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO? OPERACION Y MANTENIMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO TIPO INDUSTRIAL", presentado por el estudiante universitario Roberto Enrique Molina Thomae, procede a la autorización del mismo.

Ing. Jorge Peláez Castellanos
DIRECTOR



Guatemala, septiembre de 1985.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y
Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

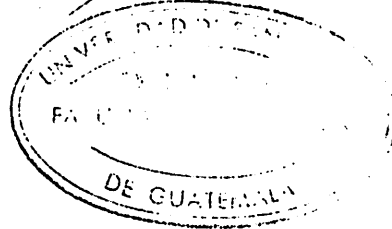
El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de co-
nocer la autorización por parte del Director de la
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al traba-
jo de tesis titulado "CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO,
OPERACION Y MANTENIMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIE-
TO TIPO INDUSTRIAL", presentado por el estudiante uni-
versitario Roberto Enrique Molina Thomae, procede a
la autorización del mismo.

IMPRIMASE:

R. Mayorga Rouge
Ing. Roberto Mayorga Rouge

DECANO

Guatemala, septiembre de 1985.



ACTO QUE DEDICO

A Dios, sobre todas las cosas.

A la memoria de:

Mi Madre: Olga Thomae de Molina

Mi Abuelo: Roberto Thomae.

Con especial cariño,
A las Familias:

Sánchez Schwendener

Sánchez Thomae

A mi padre:

Enrique Molina Gruet.

A mis hermanos:

Elsa Leticia, Allan Godofredo y
Pablo Humberto.

A mis familiares.

A mis amigos.

AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Mario R. González Camargo, por sus esfuerzos al asesorar la presente tesis y su incondicional ayuda.

A las personas que en una u otra forma facilitaron su realización, al personal de la Central Térmica INDE, en especial a la Sra. Aura Alonso, Ing. Jorge Peña, Sr. Amilcar Monroy y a la empresa Fórmulas Químicas, S. A.

INDICE GENERAL

Introducción.	1
Glosario.	3
1. Funciones de una Torre de Enfriamiento.	8
1.1 Agua y Enfriamiento de Agua.	
1.2 Intercambiadores de Calor.	
1.2.1 Diferencia media logarítmica de Temperaturas.	
2. Condiciones de Diseño.	15
2.1 Agua de Reposición.	
2.2 Temperatura de Bulbo seco y Bulbo húmedo.	
2.2.1 Análisis Psicométrico.	
2.3 Eficiencia.	
2.4 Rangos de Enfriamiento.	
2.5 Determinación de carga de calor.	
3. Métodos de Cálculo de eficiencia de transferencia de calor en Torres de Enfriamiento.	29
3.1 Diseño y especificaciones de una torre de enfriamiento tipo Contra-Flujo.	
4. Construcción de Torres de Enfriamiento.	49
4.1 Fundamentos.	

- 4.2 Clases de Torres.
- 4.3 Partes de la torre de enfriamiento.
 - 4.3.1 Barras convencionales de rociado.
 - 4.3.2 Celdas de Llenado.
 - 4.3.3 Reja de Llenado.
 - 4.3.4 Eliminadores de Gota.
 - 4.3.5 Estructura de la Torre.
- 4.4 Materiales usados en la Construcción de las cubiertas de una Torre de Enfriamiento.
- 4.5 Cilindros del Ventilador.
- 4.6 Tipos de Torres de Enfriamiento.
 - 4.6.1 Torres de tipo Natural.
 - 4.6.1.1 Tipo Atmosférico.
 - 4.6.1.2 Tipo Hiperbólico.
 - 4.6.2 Torres de Tiro Forzado.
 - 4.6.3 Torres de Tiro Inducido.

5. Agua de Enfriamiento.

76

- 5.1 Problemas del Agua de Enfriamiento.
- 5.2 Tipos y Efectos de las Impurezas.
 - 5.2.1 Incrustación.
 - 5.2.2 Ensuciamiento.
 - 5.2.3 Corrosión.
 - 5.2.4 Ataque Microbiológico.
- 5.3 Recuperación, Purga y Unidades de Medida.
- 5.4 Tratamiento del Agua de Enfriamiento.

- 5.4.1 Control de Incrustación.
- 5.4.2 Control de Ensuciamiento.
- 5.4.3 Control de Corrosión.
- 5.4.4 Crecimiento Microbiológico.
- 5.4.5 Protección de la Madera de la Torre de Enfriamiento.
- 5.4.6 Tratamiento de Purga.

6. Operación y Mantenimiento.

100

- 6.1 Componentes mecánicos de una Torre de Enfriamiento.
 - 6.1.1 Los ventiladores de la Torre de Enfriamiento.
 - 6.1.2 Reductores de Velocidad.
 - 6.1.3 Ejes de Accionamiento.
 - 6.1.4 Accionamientos por medio de fajas en "V".
 - 6.1.5 Válvulas.
 - 6.1.6 Manipuleo del Equipo Mecánico.
- 6.2 Principios de Operación.
 - 6.2.1 Calor de entrada igual a calor de salida.
 - 6.2.2 Conceptos de Funcionamiento.
 - 6.2.3 Aproximación.
 - 6.2.4 Consideraciones acerca de la Potencia.
 - 6.2.5 Manejo del Agua.
- 6.3 Funciones del Operador.
 - 6.3.1 Puesta en Marcha.
 - 6.3.2 Paradas de la Torre.
 - 6.3.3 Recopilación de Datos.

6.4	Análisis del Agua de Enfriamiento.	
6.5	Condiciones anormales de Operación.	
6.6	Mantenimiento de Estructura y Equipo Mecánico.	
6.6.1	Mantenimiento de la estructura y cubierta.	
6.6.2	Mantenimiento del Relleno.	
6.6.3	Mantenimiento de los Eliminadores de Gota.	
6.6.4	Mantenimiento del Sistema de Distribución de Agua.	
6.6.5	Mantenimiento del Equipo Mecánico.	
6.6.6	Ejes de Transmisión.	
6.6.7	Reductores.	
6.6.8	Ventiladores.	
	Conclusiones.	138
	Recomendaciones.	139
	Anexo No.1.	140
	Anexo No.2.	141
	Anexo No.3.	142
	Anexo No.4.	143
	Anexo No.5.	144
	Anexo No.6.	145
	Referencias.	146
	Bibliografía.	147

INTRODUCCION:

Diariamente la industria utiliza grandes cantidades de agua para enfriar productos en proceso y equipo. A modo de conservar este recurso potencialmente escaso y minimizar los costos del enfriamiento industrial, la mayor parte de agua se recircula y se usa nuevamente. Esta operación de recirculación se lleva a cabo con la utilización de un sistema de recirculación de agua de enfriamiento. Este sistema está compuesto por dos partes principales: Un intercambiador de calor que transfiere calor de un líquido caliente al agua de enfriamiento y una torre de enfriamiento, la cual enfría el agua de manera que pueda ser reusada. Ya que el agua se recircula a través de todo el sistema de enfriamiento, debe de ser tratada para remover ó neutralizar las impurezas que de alguna manera arruinarán el equipo del sistema.

En el presente trabajo de tesis, "Consideraciones para el diseño, operación y mantenimiento de una torre de enfriamiento tipo industrial", trata, sobre las consideraciones que deben de tomarse para realizar el diseño y construcción de una torre de enfriamiento tipo industrial, así como también trata sobre los principios básicos que se deben tener para una buena operación, como también qué consideraciones son necesarias para realizar los mantenimientos adecuados a una torre de enfriamiento tipo industrial.

Se inicia la presentación del trabajo, con un conjunto de conocimientos teóricos del funcionamiento de una torre de enfriamiento, describiendo luego los distintos tipos y construcción de éstos y finalmente indicando

los principios básicos de operación y mantenimiento de las torres de enfriamiento tipo industrial.

Los principios fundamentales con que se basa este trabajo, son de transferencia de calor, psicometría, termodinámica, conocimientos prácticos sobre mantenimiento y de tratamiento de agua.

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

G L O S A R I O

Aire Standard: Aire a una densidad de 0.075 lb/p^3 . que es aire a 68°F . temp. de bulbo seco y 29.92 pulgadas de Mercurio de presión.

Agua de Arrastre: Gotas de agua que se introducen en la corriente de aire que pasa a través de la torre y sale por la descarga del ventilador.

Aire de Salida: Mezcla de aire y vapor que sale de la torre.

Barras de Rociado: Componentes horizontales del relleno en una torre, la cual constituye la superficie principal de rociado.

Boquillas Rociadoras: Usadas en el sistema de distribución de agua para un rociado uniforme sobre el relleno de la torre.

Capacidad: Promedio del aumento del volumen de circulación del agua en el sistema de enfriamiento en cualquier tiempo es expresado en términos de galones por minuto. GPM.

Célula ó Celda: Una unidad completa de una torre de enfriamiento consistente en un sistema de distribución, normalmente un juego de equipo mecánico y paredes divididas. Cada célula puede ser diseñada para operar independientemente.

Caja de Distribución: Usada conjuntamente con la tubería y válvulas en torres de contraflujo y flujo cruzado, sirve para dispersar uniformemente el agua caliente en todas las direcciones.

Columna: Es parte de la armazón de la torre, un soporte principal vertical de la torre.

Convección: Transferencia de calor por la circulación de un líquido o gas caliente.

Contra Flujo: Torres donde el aire en movimiento y agua caliente se mezclan a 180° contrario uno con otro verticalmente en el paquete de llenado.

Carga de Calor: El aumento del calor disipado en una torre de enfriamiento es medido en BTU, que es igual al peso del agua de circulación - por unidad de tiempo multiplicado por el rango de enfriamiento. BTU/Hora = GPM (500) (HWT-CWT).

Calor Latente: Calor requerido para el cambio de líquido a vapor de un líquido sin cambio de temperatura o presión.

Características de Funcionamiento: El factor de eficiencia relativa da una relación L/G, volumen y una sección transversal de una torre de enfriamiento, relación de capacidad de diseño de transferencia de calor del relleno, expresada por la fórmula KAV/L , donde "K" es igual al coeficiente de transferencia de masa en libras por hora por pies cuadrados que es una unidad de humedad potencial. "A" es igual al área total por unidad de volumen del paquete de la torre en pies cuadrados por pies cúbicos. "V" es igual al volumen del paquete de la torre en pies cúbicos por pies cuadrados. "L" es igual a la velocidad de la masa del líquido en libras por hora por pies cuadrados de la sección transversal de la torre. La relación de líquido-gas (L/G), es la relación de volumen de líquido y del aire. Esta es una herramienta importante usada en el rango de funcionamiento de una torre, para las características de transferencia de calor de un tipo específico de relleno.

Cámara de Expansión: El espacio encerrado entre los eliminadores de gota y el tubo del ventilador en torres de tiro inducido, o el espacio en-

-cerrado entre el ventilador y el relleno en las torres de tiro forzado.

Calor Sensible: El calor requerido para cambiar la temperatura del agua ó del aire. El calor sensible puede sentirse o medirse.

Capacidad Térmica: El número de galones por minuto GPM, que una torre de enfriamiento puede manejar a un rango específico, a una temperatura de bulbo húmedo, es más conocido como capacidad.

Carga de Agua: El agua que circula en la torre, indiferentemente de su temperatura, expresado en G.P.M.

Estructura Envolvente: La que está encerrada por las paredes laterales y finales en una torre de contra flujo y encerrada por las paredes laterales sin las lumbreras en una torre de flujo cruzado.

Eliminadores de Gota: Obstrucciones que causan que la descarga de aire caliente y gotas de agua cambien de dirección, con lo que se consigue - que las gotas de agua caigan dentro de la torre.

Entalpía: El calor total contenido, que es la suma del calor sensible - del aire y del vapor de agua más el calor latente de la vaporización del agua.

Factor de Potencia: La relación de la potencia real (watts) con la potencia aparente, es indicada por el producto del amperaje por el voltaje - del motor (amp. x volts).

Factor de Enfriamiento: L/G, relación de las libras de agua que circulan por unidad de tiempo, a las libras de aire seco por unidad de tiempo a la cual es enfriada el agua.

Flujo Cruzado: Torres donde el aire en movimiento y el agua se mezclan a 90° una a través de la otra, con el aire moviéndose horizontalmente a través del relleno y el agua.

Humedad Absoluta: Aumento del vapor de agua contenido en el aire, la cual lleva a una condición usualmente expresada en libras de agua por - libras de aire seco.

Humedad Relativa: Relación de la presión del vapor de agua en el aire con la presión del vapor saturado a la misma temperatura, usualmente expresada en porcentaje (%).

Lumbreras: Obstrucciones usadas para el cambio de dirección del flujo de aire a un flujo uniforme y paralelo. Esto es utilizado para prevenir que las gotas de agua que vienen del rociado salgan de la torre en su descenso a través de la estructura.

Pérdida por Evaporación: Agua evaporada por la circulación del agua dentro de la atmósfera por el proceso de enfriado.

Presión de Gota: Presión estática o aumento de la resistencia del movimiento del aire a través de la torre causada por las obstrucciones.

Psicómetro: Un instrumento usado primordialmente para la medición de la temperatura de bulbo húmedo.

Purga: Remoción de las impurezas concentradas por la evaporación o descarga del agua del sistema, que previene la precipitación de sólidos.

PH del Agua: La medida de la pureza, acidéz ó alcalinidad del agua.

7.0 es arbitrariamente seleccionado como neutral donde tanto los iones de hidrógeno e hydroxyl, están presentes exactamente en las mismas proporciones por lo que el agua es neutral. Abajo de 7.0 es ácido, arriba de 7.0 es alcalino en una escala de 0 a 14.0.-

Presión estática de Gota SPD: Reducción del movimiento del aire a través de la torre por la resistencia de los componentes internos, lumbreras, relleno, sistema de distribución de agua, soportes internos, etc.

Rango: La diferencia numérica entre la temperatura del agua de entrada al sistema de distribución de la torre de enfriamiento y la temperatura del agua fría que sale de la torre.

Reductor de Velocidad: Un aparato mecánico que cambia la velocidad del eje del motor eléctrico a la velocidad deseada para el ventilador.

Relleno: Obstrucción instalada dentro de la estructura de la torre que provee una superficie grande para el agua, que ayuda a una mejor transferencia de calor.

Temperatura de Bulbo Húmedo: Es la temperatura de aire saturado, la temperatura de bulbo húmedo es igual a la temperatura leída en un Psicrómetro, y éste es menor que la temperatura de bulbo seco. En el caso del aire ambiente, la temperatura de bulbo húmedo es, para todos los propósitos prácticos, igual a la temperatura de saturación adiabática.

Temperatura de Bulbo Seco: Temperatura ambiente del aire medido de manera regular con un instrumento convencional.

- CWT: Temperatura del agua enfriada.
- WBT: Temperatura de bulbo húmedo del aire.
- HWT: Temperatura del agua caliente.
- CFM: Piés cúbicos por minuto.
- RPM: Revoluciones por minuto.
- HP: Horse Power, potencia.
- PPM: Partes por millón.
- REQD: Requerido.

1. FUNCIONES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

1.1 Agua y Enfriamiento de agua.

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

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

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

Existen dos formas de suministrar agua de enfriamiento adicional, el agua caliente puede ser descargada y reemplazada por agua fría y fresca, o bien el agua caliente puede enfriarse y reusarse para enfriamiento posterior, debido a que la primera de estas dos posibilidades de suministrar agua de enfriamiento resultaría demasiado costosa, y la cantidad de agua que se necesita cada día es tan grande que muchos abastecimientos no serán capaces de proveer la suficiente cantidad de agua, así podemos decir que la mejor forma de tratar con el agua caliente es enfriarla y reusarla. Existen dos tipos de sistemas de recircula-

-ción del agua de enfriamiento, sistema abierto y sistema cerrado.

En un Sistema de Recirculación Cerrado evita que las impurezas en el aire entren en el agua y previene las pérdidas de agua - por evaporación, en el Sistema de Recirculación de agua de enfriamiento Abierto, se expone el agua caliente al aire, evaporando parte del agua en el aire, las dos partes importantes de un Sistema de Recirculación Abierta, son el intercambiador de calor y la torre de enfriamiento.

Se muestra un diagrama de un sistema de enfriamiento de recirculación abierta simple.

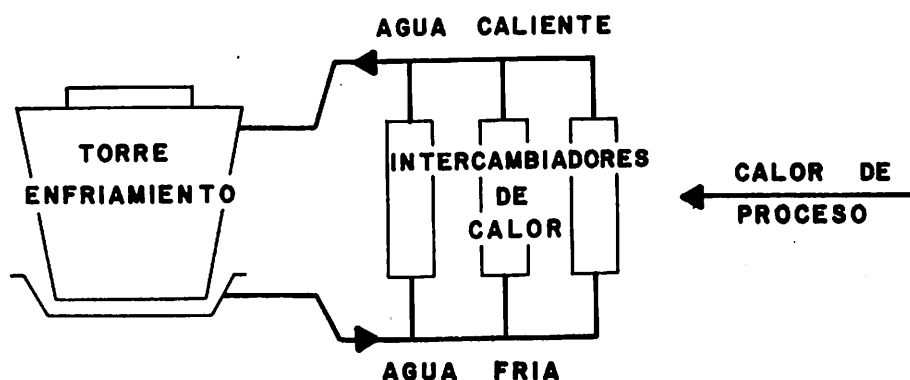


FIGURA 1.1

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

1.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Los intercambiadores de calor forman parte de una de las aplicaciones más comunes de la transferencia de calor, aún cuando los problemas que intervienen en el diseño completo de un intercambiador de calor son múltiples y de carácter muy diverso, la metodología para predecir el comportamiento térmico es relativamente sencilla.

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

Los intercambiadores de calor utilizados son del sistema cerrado o de superficie, esto se refiere a que los dos medios ya sea vapor y agua nunca están en contacto directo, en consecuencia estos pueden trabajar a presiones muy diversas. Las partes esenciales de un intercambiador de calor cerrado o de superficie consisten en una coraza envolvente en cuyo interior se encuentran los tubos o serpentines, a través de los cuales circula el agua o el vapor. Los tubos pueden ser rectos, helicoidales, en espiral ó en forma de U. Estos últimos se denominan generalmente tubos curvados. Los intercambiadores de calor en que el agua circula por el interior de los tubos o serpentines se conocen con el nombre de intercambiadores de tubos de agua, si lo que circula por el interior de los tubos es el vapor, se llama intercambiadores de tubos de vapor. Los más corrientes son los de tubos de agua; el vapor y el agua pueden circular en el mismo sentido o en sentido opuesto, es decir en contracorriente. En los intercambiadores de flujo único el

agua circula s olamente en un sentido, en los intercambiadores de calor de flujo múltiple el agua circula hacia atrás y hacia delante en varias series de tubos.

Dibujo de Intercambiador de calor.

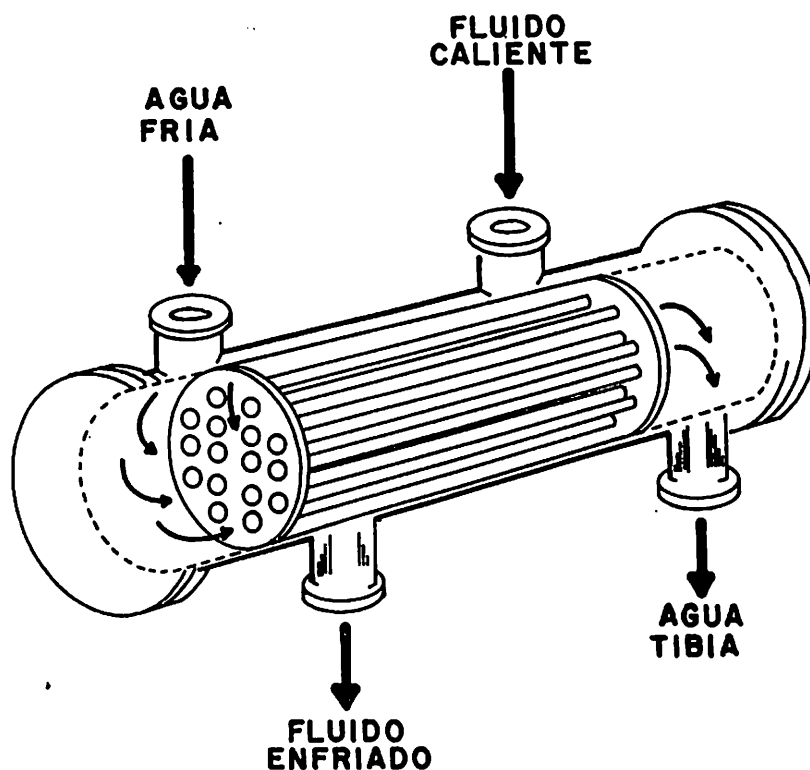


FIGURA 1.2

Transmisión de calor en los intercambiadores de calor del tipo de superficie o cerrados.

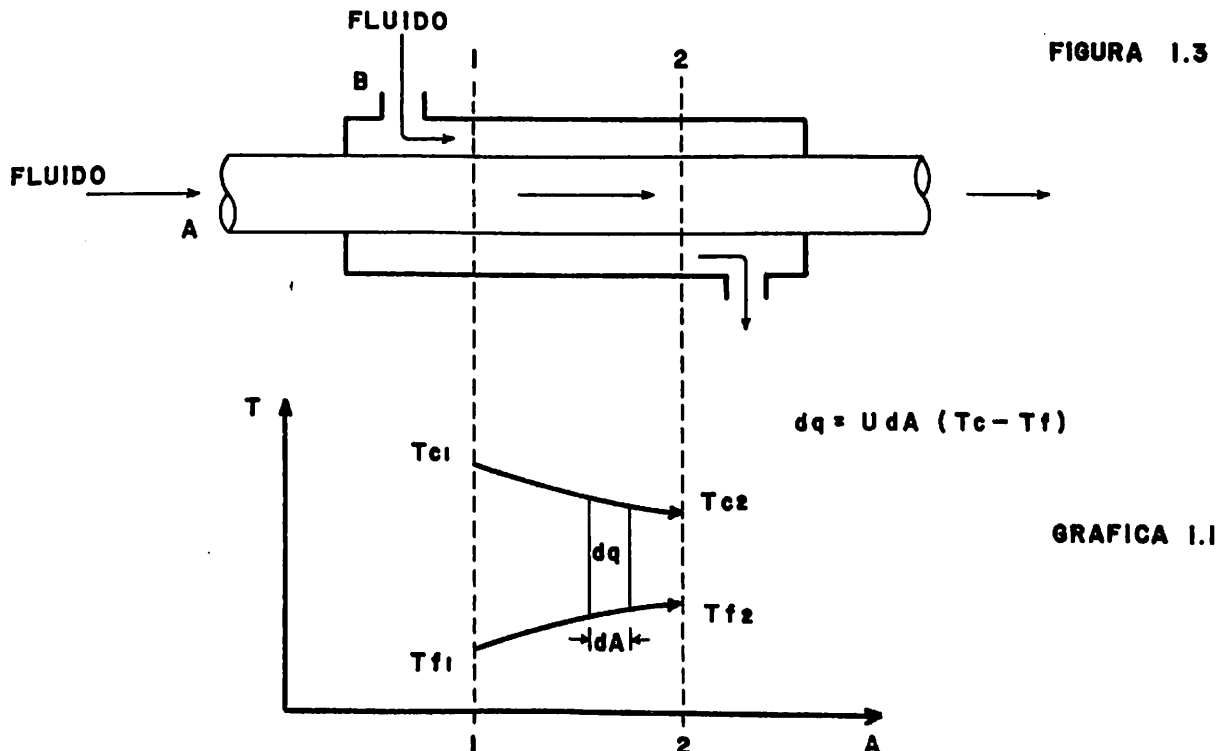
La cantidad de calor cedida en un intercambiador de calor por unidad de superficie de calefacción depende de la velocidad a la cual circula el agua a través del intercambiador, así como de la diferencia media de temperatura entre el vapor y el agua. Un aumento en uno o en ambos de dichos factores hace aumentar la cantidad de calor absorbido por el a-

-gua. Sin embargo, es preciso también establecer un tiempo suficiente para que el aumento de temperatura pueda alcanzar un máximo en las condiciones de funcionamiento. En general y en igualdad de condiciones, un calentador que tenga un gran número de pasos de pequeña sección recta transmitirá más calor que otro que posea pocos pasos y de gran sección.

1.2.1. DIFERENCIA MEDIA LOGARITMICA DE TEMPERATURAS.

Un intercambiador de calor del tipo de doble tubo y con flujos en paralelo, se considerarán para el análisis, - para efectuar el análisis térmico del intercambiador de calor es conveniente usar una expresión similar a la Ley de Newton de enfriamiento en la forma:

$$q = UA \Delta T \quad \text{Ecuacion 1.1}$$



En este tipo de intercambiador de calor, se realiza transferencia de calor por conducción y convección.

En donde:

q = Flujo total de calor transferido por el fluido caliente al frío.

U = Es el coeficiente total de transferencia de calor, siendo igual ya sea que se considere el área exterior del tubo que transfiere el calor o si se emplea el área interior del tubo que transfiere calor.

A = Es el área de transferencia de calor consistente con la definición de U .

ΔT = Es una diferencia promedio de temperatura a través del intercambiador.

$$\overline{T} = \overline{T}_{\log.} = \frac{(T_{c2} - T_{f2}) - (T_{c1} - T_{f1})}{\ln \frac{(T_{c2} - T_{f2})}{(T_{c1} - T_{f1})}} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Esta diferencia de temperaturas consistente con el funcionamiento real del intercambiador de calor se conoce como la diferencia media logarítmica de temperaturas, esta ecuación establece que la diferencia promedio de temperaturas a lo largo de todo el intercambiador de calor con flujos en paralelo puede calcularse como la diferencia de temperaturas en uno de los extremos (1) menos la diferencia en el otro extremo (2), dividiendo el resultado entre el logaritmo natural del cociente de estas diferencias, esta ecuación puede aplicarse cuando uno de los fluidos mantiene su misma temperatura como en el caso de un condensador.

Se sabe que el calor es igual a la variación de entalpía, esto es:

$$\text{Si } 1Q_2 = \int_1^2 m \text{ cp } dt = m \text{ cp } (T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

m = masa.

cp = calor específico a presión constante.

$$H_2 - H_1 = m \text{ cp } (T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Por lo tanto:

$$1Q_2 = H_2 - H_1 \quad \text{Ecuación 1.5}$$

En función de la masa:

$$1Q_2 = (h_2 - h_1) m. \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Por lo tanto para todo intercambiador de calor del tipo de superficie, el valor de la superficie de transmisión de calor viene dado por la siguiente expresión:

$$A = \frac{m (h_2 - h_1)}{U \overline{T}_{\log.}} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

En donde:

h_2 = Entalpía del fluido saliente.

h_1 = Entalpía del fluido entrante.

m = Peso del fluido calentado por hora.

U = Coeficiente de transmisión de calor.

$\overline{AT}_{\log.}$ = Diferencia media logarítmica de temperatura.

2. CONDICIONES DE DISEÑO.

2.1 Agua de Reposición.

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

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

Una torre de enfriamiento está diseñada para enfriar agua poniéndola en contacto con el aire causando con esto que se evapore. Si se agrega energía a una sustancia líquida su temperatura aumenta hasta que se tiene una temperatura en la cual el líquido empieza a transformarse en vapor o estado gaseoso, aquí la temperatura permanecerá constante durante la vaporización y la energía agregada a fin de efectuar el cambio de estado es llamada calor de vaporización ó calor latente.

El término calor, se usa para describir el flujo de energía - que se obtiene al haber un gradiente de temperatura.

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

Un esquema general de una torre de enfriamiento es el siguiente:

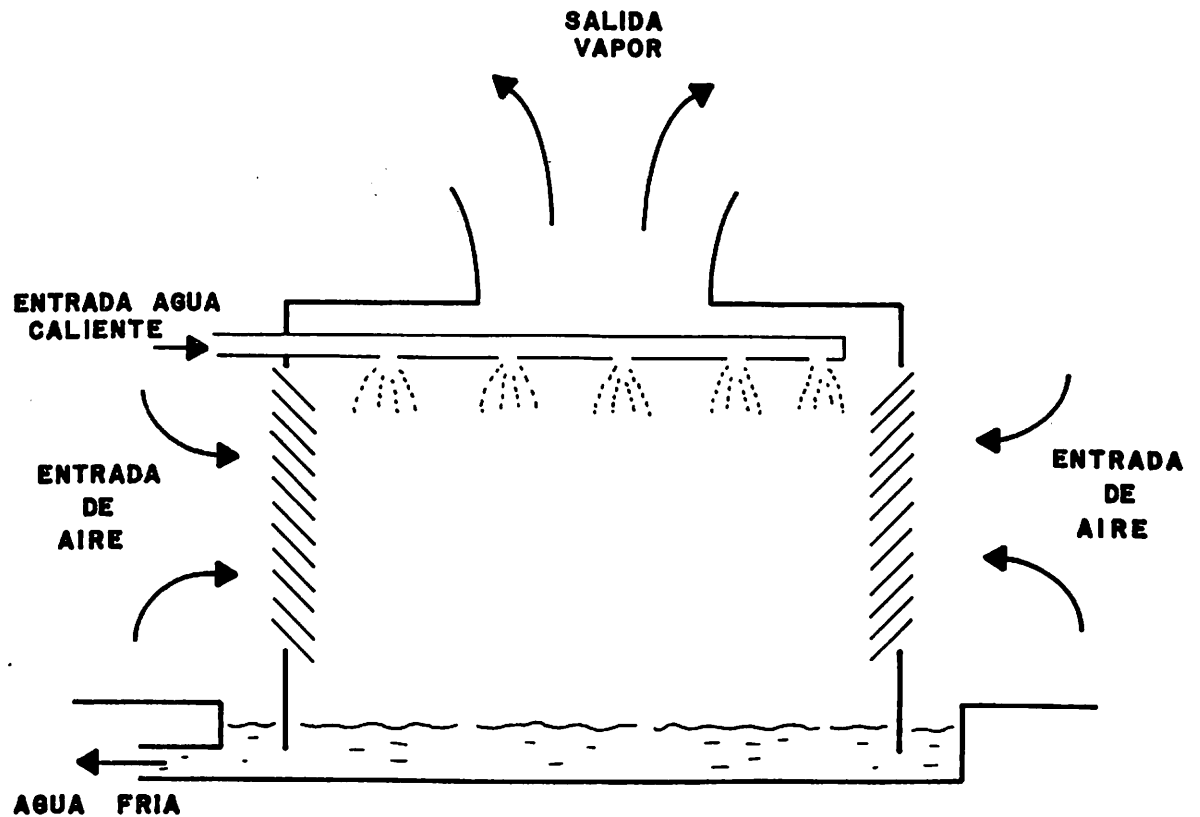


FIGURA 2.1

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

En una torre de enfriamiento, el área de mayor temperatura es el agua caliente y el área de temperatura más baja es el aire

frío, a medida que el agua caliente escurre hacia abajo de la torre, el calor sensible se transfiere del agua al aire frío que está subiendo, por lo tanto la temperatura del agua disminuye y la del aire aumenta.

A medida que el cuerpo principal del agua se enfría, el calor liberado se usa para evaporar una porción del agua remanente.

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

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

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

Para que una torre de enfriamiento funcione eficientemente, un volumen constante de agua debe fluir a través de la torre, el agua de recuperación se debe agregar para reemplazar la pérdida

de agua debida a evaporación y fugas.

En un ejemplo para saber qué cantidad de agua de recuperación: supongamos que una torre enfría 10,000 galones de agua con una diferencia de 10°F. entonces:

Galones de pérdida de agua debido a evaporación.

$$10000 \times 0.01 = 100 \text{ galones de agua.}$$

Galones de pérdida de agua debido a purga no intencional ó Brisa:

$$100 \times 0.01 = 1 \text{ galón de agua.}$$

Total de galones a reponer. = 100 galones.

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

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

2.2 Temperatura de Bulbo seco y Bulbo húmedo.

La cantidad de humedad que posee el aire de enfriamiento tiene el mayor efecto sobre el volumen y la razón de evaporación. La humedad relativa del aire es la variable única, más importante que afecta el funcionamiento de una torre de enfriamiento, conforme aumenta la humedad relativa, la razón y el volumen de evaporación decrecen, y conforme decrece la evaporación así también lo hace la efectividad de la torre de enfriamiento.

La humedad relativa se define como la relación de la presión parcial del vapor de agua contenido en el aire a la presión que ejerce el vapor de agua saturado a la temperatura del aire, esta definición es válida puesto que el aire y el vapor de agua siguen exactamente la ley de los gases perfectos.

En forma de ecuaciones la humedad relativa aparece como:

$$\phi = \frac{P_s}{P_d} \text{ (td.)}$$

Donde: ϕ = Humedad relativa expresada en forma decimal.

P_s = Presión parcial del vapor de agua contenido en el aire.

P_d = Presión del vapor saturado a la temperatura del aire. (Temperatura de bulbo seco).

Como el aire y el vapor de agua siguen exactamente la ley de los gases perfectos:

$$\phi = \frac{P_s}{P_d} \quad \text{Si } P = \frac{RT}{V}$$

$$\phi = \frac{RT/V_s}{RT/V_d} \quad \text{Como es vapor de agua se eliminan } \underline{R} \text{ y } \underline{T} .$$

$$\phi = \frac{V_d}{V_s} \quad \text{Y } V_d = 1/\rho_d.$$

$$\phi = \frac{1/\rho_d}{1/\rho_s} \quad V_s = 1/\rho_s.$$

$$\phi = \frac{\rho_s}{\rho_d}$$

Tenemos que humedad relativa es:

$$\phi = \frac{P_s}{P_d} = \frac{V_d}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_d} \quad \text{a Td.}$$

Donde: R = Constante particular del gas (Vapor de agua).

V = Volumen específico.

P = Presión absoluta.

ρ = Densidad específica.

La humedad relativa tiene relación con la humedad absoluta ó específica, la cual se define como el cociente de la masa de agua en el aire, ambiente, entre la masa de aire seco, en forma de ecuación es:

$$W = \frac{M_s}{M_a}$$

Donde: W = Humedad absoluta.

M_s = Masa del vapor de agua en la mezcla aire vapor.

M_a = Masa de aire seco.

De acuerdo a la Ley de presiones parciales de Dalton, el volumen y temperatura son los mismos para el aire seco y vapor de agua en la mezcla.

Como la humedad relativa es una indicación de que tanta agua ha absorbido el aire a una temperatura dada, como vemos la humedad relativa está relacionada con la temperatura, por lo tanto la temperatura es otra condición que afecta a la evaporación y al buen funcionamiento de la torre de enfriamiento.

La temperatura de bulbo seco, se le llama a la temperatura que se lee en un termómetro ordinario, cuando la temperatura se obtiene sin ninguna limitación, se considera siempre que es la temperatura de bulbo seco.

La temperatura de bulbo húmedo resulta cuando al bulbo se un termómetro es cubierto con un pabito mojado con agua y éste es movido a través de un aire no saturado, el agua se evapora en proporción a la capacidad del aire para absorber la humedad. Esto ha-

-rá que la temperatura indicada sea menor que la temperatura del bulbo seco ó temperatura del aire. Finalmente la temperatura de equilibrio obtenida en el termómetro es conocida como temperatura de bulbo húmedo. El instrumento para medir las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco se llaman Psicrómetro.

La temperatura de bulbo húmedo es un factor importante en el diseño, tamaño y en la selección del equipo para el enfriamiento evaporativo. Este es un factor de control para el aspecto de mínima temperatura de agua caliente obtenible, éste es la temperatura más baja a la cual el agua puede enfriarse por el método evaporativo. Así, la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre de enfriamiento determina la temperatura de operación por todos los niveles de la planta, proceso ó sistema. La temperatura de bulbo húmedo es vital en la determinación de un óptimo funcionamiento de la torre de enfriamiento para el servicio existente en el sistema. Una temperatura de bulbo húmedo de diseño que sea alta dá como resultado una torre de enfriamiento demasiado grande y una temperatura de bulbo húmedo baja dá como resultado una torre de enfriamiento con una capacidad inadecuada.

La selección de la temperatura de operación para el enfriamiento de agua es gobernada hasta algún grado de la temperatura de bulbo húmedo que prevalece.

2.2.1 Análisis Psicométrico.

La eficiencia térmica de una torre de enfriamiento es afectada por la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada.

Aire del ambiente que entra, condición del punto "A" absorbe calor y humedad de el agua y sale en el estado del punto "B" en una condición saturada. El aumento de la transferencia de calor del agua al aire es proporcional a la diferencia de entalpía entre el aire que entra y que sale, esto sería $h_B - h_A$.

Como las líneas de entalpía constante corresponden casi exactamente a las líneas de temperatura de bulbo húmedo, el cambio de entalpía del aire puede ser considerada por la práctica sólomente con el cambio de la temperatura de bulbo húmedo del aire.

El vector $\overrightarrow{AB}$ puede ser separado en los componentes $\overrightarrow{AC}$, el cual representa el intercambio de calor sensible y la componente $\overrightarrow{CB}$, el cual representa el intercambio de calor latente.

Si la condición del aire de entrada es cambiada al punto "D" a la misma temperatura de bulbo húmedo, pero con temperatura de bulbo seco diferente, el calor total transferido permanece igual, pero los componentes del calor sensible y latente deben cambiar.

Hay que notar que el caso $\overrightarrow{AB}$ representa el enfriamiento evaporativo del agua y el calentamiento sensible y latente del aire.

Y, en el caso $\overrightarrow{BD}$ representa el enfriamiento sensible del agua por evaporación, y el enfriamiento del calor sensible del aire y el aumento de calor latente del aire.

Así se puede ver fácilmente que para la misma carga de enfriamiento de agua, el aumento de la evaporación depende del aumento del calor sensible o del enfriamiento del aire.

La relación del calor sensible y latente es importante en el análisis del agua usada en la torre de enfriamiento. La transferencia de masa ocurre solamente en una porción de calor latente en el proceso de transferencia de calor, y ésta es proporcional al cambio de humedad específica.

Como el aire que entra con una temperatura de bulbo seco o con una humedad relativa la cual afecta la relación de transferencia de calor sensible y latente, y esto también afecta en el rango de la evaporación. El rango de evaporación es menor en el caso AB, esto es $W_B - W_A$, que en el caso DB, esto es $W_B - W_D$, porque el calor latente transferido representa una pequeña porción del total.

El rango de evaporación en un diseño típico de una torre de enfriamiento es aproximadamente de 1% del agua de circulación por cada 10°F. de temperatura del agua.

2.3 Eficiencia.

El enfriamiento funciona también en definitiva por la temperatura de bulbo húmedo.

La diferencia entre la temperatura del agua enfriada y la temperatura del bulbo húmedo del aire se le llama aproximación o eficiencia de la torre de enfriamiento.

$$\text{Eficiencia} = T_2 - T_{WB}.$$

Donde: T_2 = Temperatura del agua que sale.

T_{WB} = Temperatura de bulbo húmedo del aire que entra.

Para ilustrar la eficiencia veamos lo siguiente:

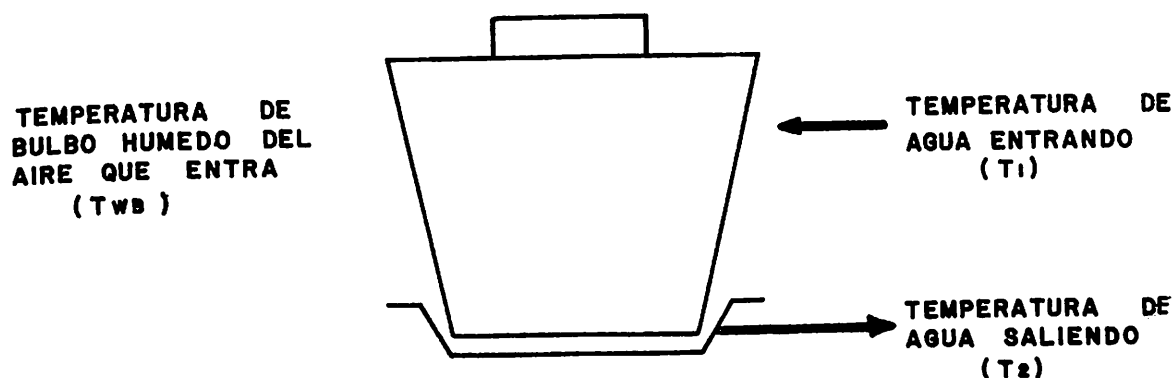


FIGURA 2.2

FIGURA 2.2

Tomemos como ejemplo:

$$T_1 = 110^{\circ}\text{F.}$$

$$T_2 = 82^{\circ}\text{F.}$$

$$T_{WB} = 76^{\circ}\text{F.}$$

La eficiencia será: $82 - 76 (^{\circ}\text{F}).$

$$\text{Eficiencia} = 6^{\circ}\text{F.}$$

2.4 Rangos de Enfriamiento.

Otra de las formas de verificar el funcionamiento adecuado de una torre de enfriamiento es el llamado rango de enfriamiento, lo cual es la diferencia de temperatura entre el agua caliente que entra a la torre y el agua fría que sale de ésta, una torre operando a su eficiencia máxima puede reducir los costos de energía.

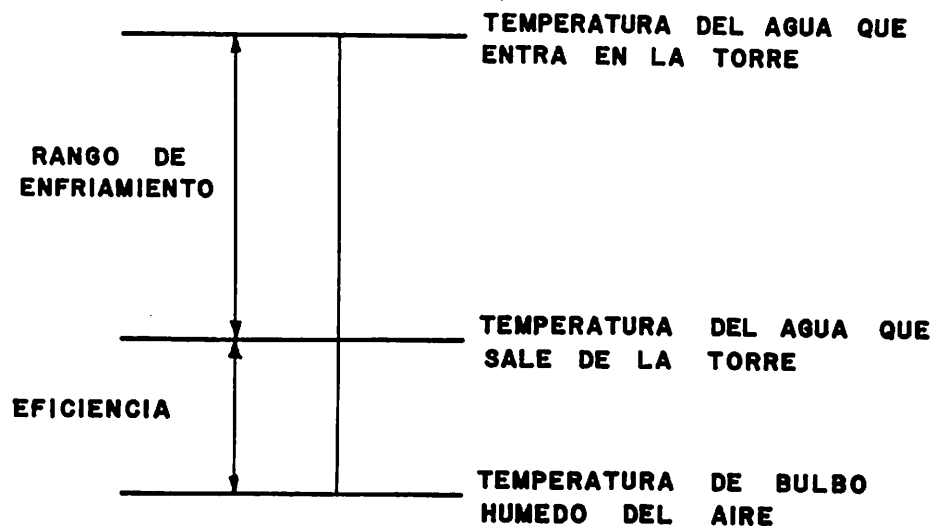
$$\text{Rango de Enfriamiento} = \Delta T$$

$$\text{Rango} = T_1 - T_2.$$

La selección del rango óptimo de enfriamiento depende de las características del equipo existente en servicio, también el tipo de torre de enfriamiento es considerado, esto puede tener una considerable relación con el costo del equipo.

En general los rangos de enfriamiento pueden ser categorizados en largos, de 25°F. a 65°F; medianos de 10°F a 25°F, y cortos de 5°F. a 10°F. Los de rango grande son usados frecuentemente en refinerías de combustible (rangos aproximados entre 30°F. y 40°F) y fábricas de acero (rangos arriba de 65°F), los de rango mediano en plantas térmicas de vapor y muchos procesos, y los de rango corto en aire acondicionado, en refrigeración, y otros pequeños procesos.

Se muestra a continuación un esquema de temperaturas en el cual están definidas la eficiencia y el rango de enfriamiento



Definición de términos de Eficiencia
Rango de Enfriamiento.

GRAFICA 2.2

2.5 Determinación de Carga de Calor.

La determinación exacta del calor disipado en una torre de enfriamiento es importante. Esto no sólo afecta al tamaño de la torre, sino también al sistema. La determinación de una carga de calor inadecuada entre una carga grande o pequeña nos lleva a problemas de costo.

La imposición de una carga de calor sobre una torre de enfriamiento es determinada por el servicio que existe. El rango de enfriamiento requerido es controlado en la operación de acuerdo al nivel de temperatura deseado en el proceso. En muchos casos, una operación baja de temperatura es deseable para incrementar

la eficiencia en el proceso, mejorar la calidad o cantidad en el producto. Una baja temperatura del agua de enfriamiento por ejemplo, es necesario en una refinería de combustible para condensar los vapores volátiles que de otro modo se supone es perdido. En otras aplicaciones, altas temperatura de operación - son deseables en algunas categorías de motores de combustión - interna. En todos los casos la determinación de la carga de calor es de primordial importancia.

El tamaño de una torre de enfriamiento, el costo y la relación del equipo de enfriamiento es proporcional a la carga de calor. Si el cálculo de la carga de calor es baja, es obtenido un equipo muy pequeño. Si el cálculo de carga de calor es grande se obtiene equipo más grande con un aumento del costo.

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

MÉTODOS DE CALCULO DE EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN TORRES DE ENFRIAMIENTO.

Se han desarrollado muchas teorías que describen el fenómeno de transferencia de masa y calor que tiene lugar en las torres de enfriamiento de tipo atmosférico. La mayoría de estas teorías están basadas en sólidos principios de Ingeniería. La torre de enfriamiento puede considerarse como un intercambiador de calor en el cuál el agua y el aire es tán en contacto directo la una con el otro. Este no es un método aceptable para calcular con exactitud las superficies de contacto totales entre el aire y el agua adentro de la torre; por lo tanto, el factor K, llamado "Coeficiente de transferencia de Calor", no puede determinarse directamente por medio de las teorías de transferencia de calor con o cidas. Muchos de los diferentes tipos de equipos de transferencia de masa y calor desafían la solución por métodos teóricos ó por análisis Dimensional.

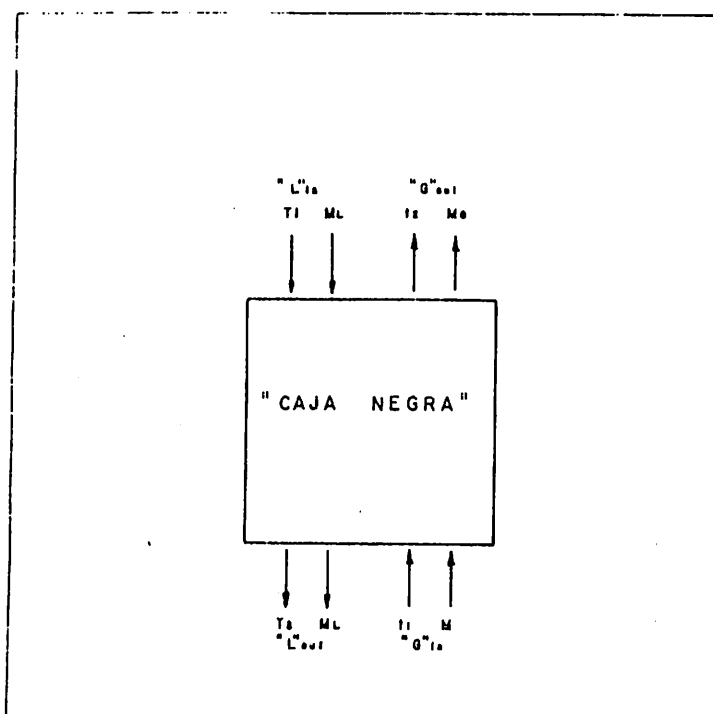
Los datos de diseño deben obtenerse por pruebas a plena escala bajo condiciones de operación reales. Se han realizado muchas pruebas para relacionar el rendimiento em pleando las teorías de "La gota de Agua", "Eficiencia de Enfriamiento", número de un idades de transferencia, todos sin resultados comprobables. Los datos correctos de Dis eño es preciso obtenerlos mejor de las pruebas reales sobre un rango amplio de con diciones de operación, bajo condiciones específicas de Diseño.

Una de las teorías de investigación y experimentación usadas en las torres de enfriamiento se puede describir como "La Teoría de la Caja Negra". Es decir que las con diciones límite están definidas y descritas por las ecuaciones fundamentales y los mo delos matemáticos. El proceso exacto por medio del cuál la transferencia de masa y de calor tiene lugar dentro de un intercambiador de calor de contacto directo no está de teterminado totalmente (Ver figura 3.1). Sin embargo, los resultados pueden formularse en forma de una ecuación que evalúa adecuadamente y predice el comportamiento del equipo bajo la mayoría de las con di

-ciones de operación.

FIGURA 3.1

TEORIA EXPERIMENTAL DE LA "CAJA NEGRA"



Donde: L = líquido (agua).

G = gas (aire).

T = temperatura.

M_L = masa del líquido (GPM)

M_G = masa del gas (PCM de aire)

El concepto generalmente aceptado de evaluar el comportamiento de la torre de enfriamiento fué desarrollado por Merkel en el año de 1925. Sus análisis y ecuaciones incluyen la transferencia del calor sensible y el calor latente dentro de un proceso

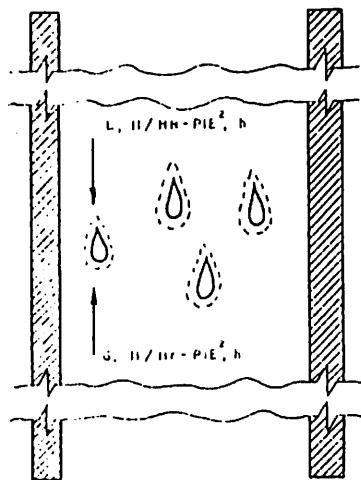
de transferencia total de masa y calor, basado en la diferencia de entalpía como una fuerza básica de empuje. El proceso de -- transferencia se puede describir simplemente, así:

La superficie de cada gota de agua está rodeada por una película de aire saturado, a la temperatura de la masa del agua.

El aire se está calentando y saturando conforme pasa a lo largo de la trayectoria de la torre de enfriamiento. La temperatura y las propiedades físicas asociadas del aire y del agua cambian de acuerdo a su posición relativa, (Ver figura 3.2).

FIGURA 3.2

TEORIA DE MERKEL
FUNCIONAMIENTO DE UNA TORRE EN CONTRAFLUJO



$$1. \quad \frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h''-h}$$

2. La fuerza de empuje está relacionada con $h'' - h$, ó sea, que está relacionada con la diferencia de entalpía que hay entre el aire saturado y la temperatura del agua (Película alrededor de la superficie de la gota de agua) y la entalpía de la corriente principal de aire.
3. La verdadera fuerza de empuje es la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire.

La transferencia de masa y de calor está relacionada con la diferencia de entalpía en cada punto o con cada incremento de temperatura. La teoría de Merkel establece que el enfriamiento del agua en la atmósfera está relacionado básicamente con, y está limitado por, la temperatura de bulbo húmedo, la cual es una medida aproximada de la entalpía.

Su teoría respecto del potencial para la transferencia de masa y de calor para el agua y el aire ha demostrado ser válida para casi todos los tipos de torres de enfriamiento y equipos aspersores de agua. Las variantes de la teoría de Merkel las han empleado los investigadores y los escritores para relacionar el potencial de enfriamiento a las diferencias en las presiones parciales, presiones de vapor, relaciones de humedad y otras propiedades físicas de los fluidos. Todas estas propiedades están relacionadas con la temperatura y el equilibrio termodinámico. Ninguno de todos estos métodos propuestos ha mostrado poder mejorar la teoría básica de Merkel.

La ecuación $\frac{K_a V}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h'' - h}$ fué creada por LICHTENSTEIN quién introdujo la ecuación de la torre de enfriamiento en 1943.

El empleo de la teoría de Merkel en conjunción con ecuaciones fundamentales y diferenciales. Los grupos adimensionales resultantes relacionan las variables de transferencia de masa y de calor en las torres de tipo de contra flujo. Sólomente hay que hacer unos pequeños ajustes en el método analítico de los resultados de las pruebas.

La ecuación $\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h''-h}$ es una determinación de la

demanda térmica de contraflujo y se conoce como "Característica de la torre" y es independiente del tipo y de la configuración del empaque de relleno. Los valores requeridos para obtener el $\frac{KaV}{L}$ se basan en las condiciones de diseño requeridas por la si-

tuación particular que se está investigando. Con la ventaja de la era de las computadoras, el Instituto Torres de Enfriamiento (CTI) publicó el libro azul titulado "COOLING TOWER PERFORMANCE CURVES" (CURVAS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO) en 1967.

La disponibilidad y el uso de la computadora permitió al Comité de Tecnología y Rendimiento investigar varios métodos de integración numérica para resolver la ecuación básica. El método TCHEBYCHEFF (CHEBY-CHEF) fué seleccionado por ser de consistencia adecuada y de mucha exactitud para los propósitos del libro. Las curvas CTI fueron calculadas y ploteadas por medio de computadora sobre un largo intervalo de temperatura y condiciones de operación. La figura 3.3 es una representación de las curvas

de demanda del CTI para una temperatura de bulbo húmedo, de entrada de 70°F y para un rango de enfriamiento de 20°F . Las curvas están ploteadas con la demanda térmica KaV/L (ordenada) como una función de la relación líquido a gas L/G (abscisa). Las líneas de aproximación o eficiencia (temperatura de agua fría menos temperatura de bulbo húmedo), se muestran como parámetros. Las curvas de demanda están determinadas independientemente del diseño de la torre.

Los fabricantes proveerán las curvas características de funcionamiento de sus materiales que transfieren el calor (Relleno) - para utilizarlos conjuntamente con las curvas CTI para una predicción exacta del comportamiento, dibujados como diagonales en la fig. 3.3.-

La demanda térmica KaV/L deberá ser igualada por la capacidad térmica del diseño de la torre. La intersección de la característica de la torre con la línea de aproximación determina la relación L/G a la cuál debe ser operada la torre para alcanzar las temperaturas especificadas o de diseño.

La evaluación económica de los factores determina la mejor disposición de la torre, por ejemplo: Número de celdas, altura, ventiladores, potencia, etc. Los valores de diseño de KaV/L y L/G ajustados para cambios de temperatura pueden transponerse a otras curvas de demanda. Estos puntos de ajuste predicen la aproximación o eficiencia para las condiciones de operación de otras torres.

El proceso de transferencia de masa y de calor en torres que emplean el flujo cruzado y el contraflujo está relacionado al mis-

-mo potencial de enfriamiento, por lo tanto, el método de integración numérica depende de la trayectoria relativa del flujo del aire y del agua en cada tipo de torre. El tipo de torre de flujo cruzado involucra una trayectoria de flujo de dos dimensiones en la cuál el agua cae desde lo alto de la torre y el aire fluye a través de aquella.

La temperatura del aire cambia tanto en dirección vertical como horizontal teniéndose los cambios correspondientes en la temperatura del agua. Los métodos empleados para el análisis de las torres a contra flujo no se pueden aplicar a las torres de flujo cruzado con el mismo grado de exactitud. Se han hecho intentos para ajustar las curvas de demanda del sistema de contraflujo de modo que refleje los cambios en las torres de tipo flujo cruzado, pero los métodos han arrojado resultados muy limitados.

Los intensos requerimientos para la conservación de la energía ha incitado a emplear diferentes combinaciones de rellenos en las nuevas torres de enfriamiento y en las ya existentes, logrando mejor funcionamiento en términos de mayor flujo de agua o menores valores de temperatura de la misma. En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran los diferentes esquemas de combinación de rellenos en las torres de enfriamiento. El hecho de agregar una gran transferencia y una gran caída de presión por medio del relleno puede, en la mayoría de los casos, elevar el nivel de funcionamiento de la torre. Se debe tener cuidado de

COMBINACION DE RELLENO EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

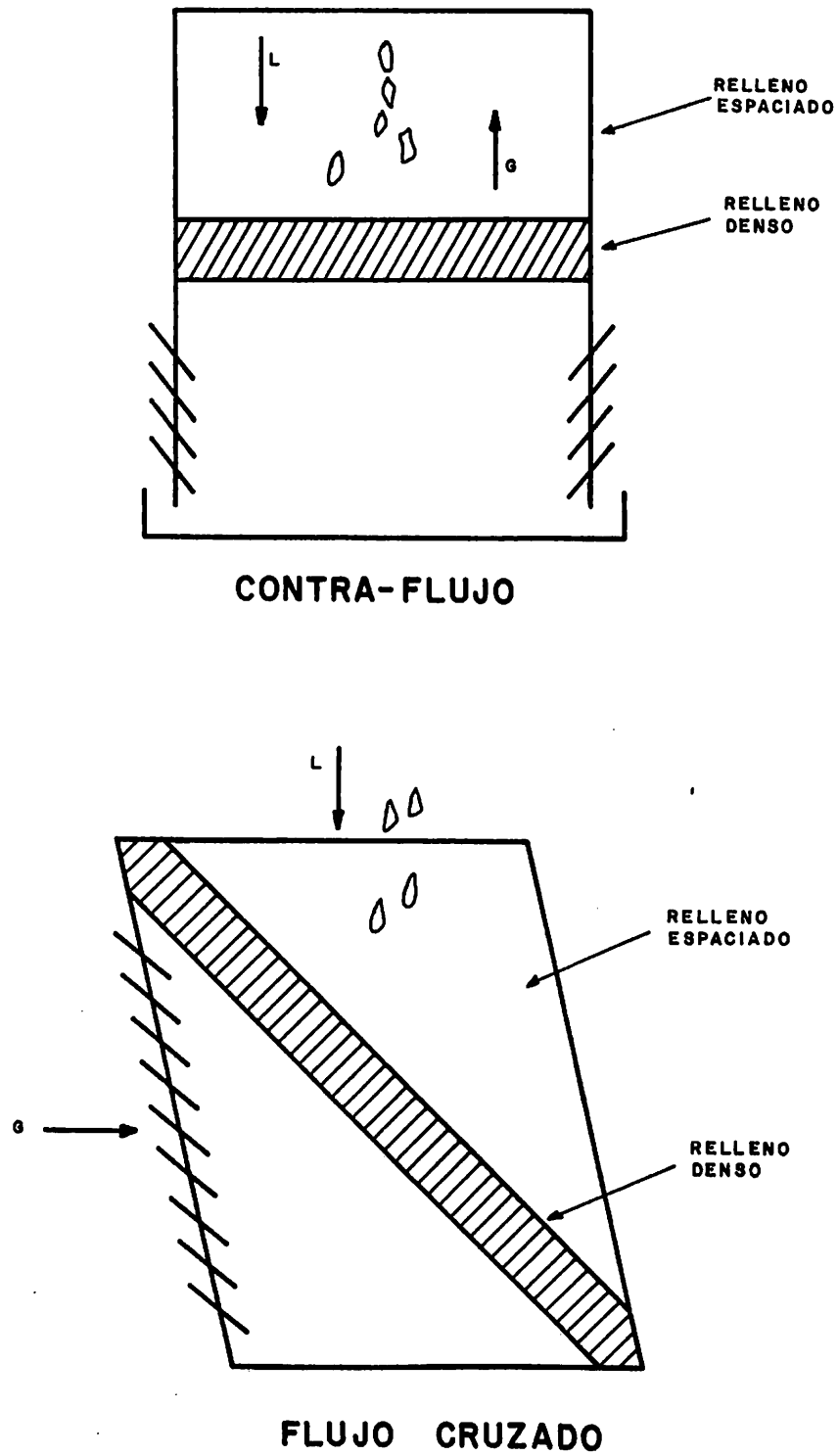


FIGURA No. 3.4

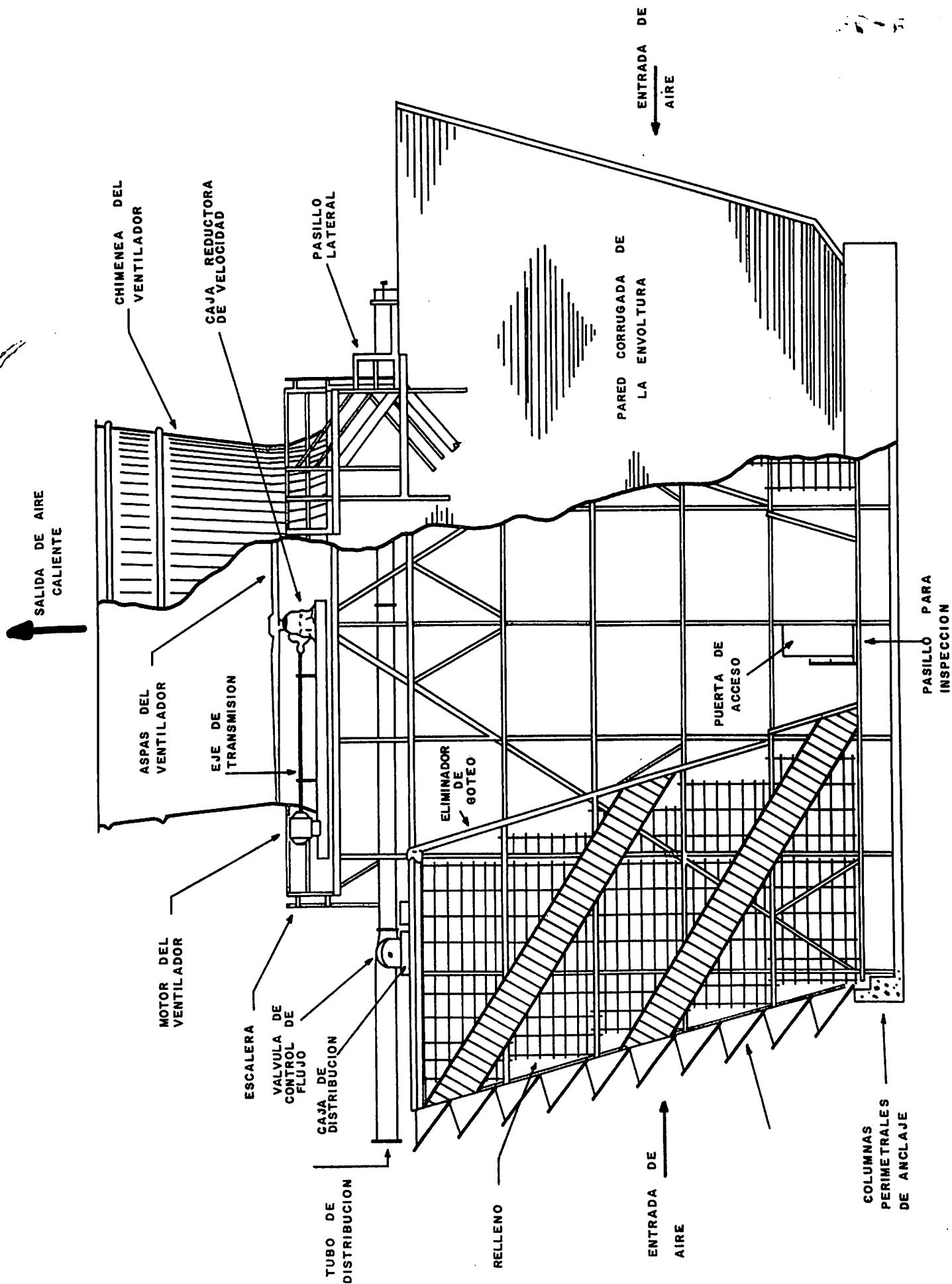


FIG. 3.5

no agregar mucho relleno en aquellas torres que tienen una potencia de ventiladores prefijada. Si la mayor caída de presión y la menor relación de flujo de aire no se compensan por la mayor relación de transferencia de la combinación de relleno, entonces podría ocurrir que se tiene una pérdida neta en el funcionamiento de la torre.

Una torre nueva puede diseñarse con una mayor capacidad de agua por unidad de área plana, con temperaturas más bajas para el agua o con menores requerimientos de potencia usando una combinación de rellenos. Este tipo de torre puede ser diseñado correctamente y podemos garantizar su funcionamiento si las características de los dos tipos de relleno se calculan para y suministrados a los usuarios por el fabricante.

Se requiere de métodos probados de funcionamiento y datos exactos de diseño para el uso apropiado de la combinación de rellenos. Las aproximaciones, que emplean factores de equivalencia tales como: "Un pie de relleno denso reemplazan ocho pies de relleno espaciado" pueden conducir a cometer serios errores. El diseño de cada torre debe considerar sobre una base individual. Las soluciones requieren no sólo de datos de diseño exactos sino también de buena lógica ingenieril, así como de Instalaciones de Campo bien documentadas y datos de prueba.

CALCULOS TERMICOS:

Para analizar y predecir el funcionamiento de una torre de enfriamiento se tiene dos parámetros invaluable de operación, que son L/G los

cuáles están referidos a la relación líquido a gas. En una torre de enfriamiento, el líquido es el agua y el gas es el aire. Puesto que la relación es adimensional, el flujo de agua (L) está expresado en libras por hora por pie cuadrado de área plana y el flujo de masa de aire (G) como libras de aire seco por hora por pie cuadrado de área plana. Esto significa que el agua, expresada en galones por minuto debe cambiarse por el empleo de constantes si el aire está dado en - pies cúbicos por minuto. Esto se puede hacer por medio de la relación indicada en las ecuaciones que aparecen abajo:

$$1) \quad L = \frac{\text{Gal H}_2\text{O}}{\text{Min}} \times \frac{60 \text{ Min}}{\text{Hora}} \times \frac{0.1337 \text{ pie}^3}{\text{Gal.}} \times \frac{62.06 \text{ Libras}}{\text{Pie}^3} \times \text{Pie}^2 \text{ área plana.}$$

$$2) \quad G = \frac{\text{Pie}^3 \text{ Aire}}{\text{Hora}} \times \frac{60 \text{ Min}}{\text{Hora}} \div \frac{14.003 \text{ Pie}^3}{\text{Libra}}, \text{ pie}^2 \text{ área plana.}$$

La otra herramienta muy usual es el valor KaV/L que es la característica de la torre. Esta se refiere al factor de eficiencia de la torre proporcionado por el tipo particular de las plataformas de relleno en combinación con las condiciones de diseño requeridos. La relación es un integral conocido como la ecuación de Merkel y es la ecuación básica de transferencia de calor, la cuál es aplicable a cualquier método de enfriamiento por contacto directo de aire y agua y que ha sido integrado por la "Función de evaluación de cuatro puntos de Tcheby-Cheff" por medio de computadora sobre un amplio rango de variables y está expresada por la ecuación:

$$\frac{KaV}{L} \text{ (Requerido)} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h_w - h_a}$$

Para encontrar el valor, se debe emplear la Tabla 11.17 que da los distintos valores de la entalpía de la mezcla de vapor saturado (a 29.921" Hg). A continuación se ilustra y plotea un problema de muestra:
Nomenclatura empleada.

- a Area de la superficie de transferencia por volumen unitario de la torre; pié cuadrado por pié cúbico.
- G Masa de flujo de aire; libras de aire seco por hora por pié cuadrado.
- h Entalpía de la mezcla de vapor de aire-agua; BTU por libra de aire seco.
- h_a Entalpía de la mezcla de vapor de aire-agua a temperatura de bulbo húmedo; BTU por libra de aire seco.
- h_w Entalpía de la mezcla de vapor de aire-agua a la temperatura de la masa de agua, BTU por libra de aire seco.
- h₁ Entalpía de la mezcla de vapor de aire-agua a temperatura de bulbo húmedo a la entrada; BTU por libra de aire seco.
- h₂ Entalpía de la mezcla de vapor de aire-agua a temperatura de bulbo húmedo a la salida; BTU por libra de aire seco.
- K Coeficiente de transferencia de la entalpía global; libra por hora por pié cuadrado por libra de agua por libra de aire seco.
- L Flujo de masa de agua; libra por hora por pié cuadrado de área plana.
- Q Capacidad de la torre; por ciento de flujo de agua de diseño.
- T Temperatura de la masa de agua; °F.
- T₁ Temperatura del agua caliente; °F.

- T_2 Temperatura del agua fría; °F.
 V Volumen efectivo de la torre de enfriamiento; pié cúbico por pié cuadrado de área plana.
 bhp Potencia de freno.
 CWT Temperatura del agua fría °F.
 gpm Galones por minuto (medida U.S.A.)
 HWT Temperatura del agua caliente, °F.
 KAV/L Característica de la torre.
 L/G Relación líquido a gas, libra de agua por libra de aire seco.
 WBT Temperatura de bulbo húmedo; °F.

Ejemplo: Torre de Enfriamiento 1.

1. Condiciones de Diseño:

$$\left. \begin{array}{l} HWT = 95^{\circ}F. \quad T_1. \\ CWT = 85^{\circ}F. \quad T_2. \end{array} \right\} \Delta T = 10^{\circ}F.$$

$$WBT = 78^{\circ}F \quad h_1.$$

$$GPM = 2100 \text{ por celda (84.00 Total).}$$

2. Flujo de Aire.

12 Pies de diámetro, 9 aspas del ventilador.

40 hp. potencia, a 318 RPM.

225,000 CFM (MFG de curvas de diseño de ventiladores).

$$3. \quad \frac{L}{G} : \quad L = (2100 \text{ GPM}) / (0.1337 \text{ P}^3/\text{Gal}) = 208.8 \text{ P}^3/\text{min.}$$

$$\text{Factor de conversión} = 0.1337 \frac{\text{P}^3}{\text{gal.}}$$

$$\text{Densidad a EWT} = 62.06 \text{ lb/P}^3.$$

$L = \dot{Q} \rho$ Donde $\dot{Q}$ = Caudal de agua por celda.

ρ = Densidad del agua.

$$L = 208.8 \frac{\text{P}^3}{\text{min}} (62.06 \frac{\text{lb}}{\text{Pie}^3}) 60 = 1045.587 \text{ lbs. de agua/hora.}$$

$G = \dot{q} / \gamma$ donde $\dot{q}$ = Caudal del aire.

γ = Densidad del aire a WBT de tabla 11.17

$$G = \frac{225000 \text{ CFM (60 Min)}}{14.003 \text{ P}^3/\text{lb.}}$$

$$G = 964079 \text{ lbs. de aire/hora.}$$

$$\frac{L}{G} = \frac{1045.587}{964079} \frac{\text{lbs. de agua/hora.}}{\text{lbs. de aire/hora.}}$$

$$\frac{L}{G} = 1.08$$

$$4. \quad \left(\frac{K a V}{L} \right) (\text{Requerido}) = \int_{T_2}^{T_1} \frac{\Delta T}{h_w - h_a} \approx \frac{T_1 - T_2}{4} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} + \frac{1}{h_4} \right)$$

Donde: h_1 . (de tabla 11.18 a WBT = 78°F) = 41.58 BTU/lb. de Aire Seco.

$$h_2 = h_1 + \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T.$$

$$h_2 = 41.58 + (1.08) 10 = 52.38 \text{ BTU/lb. de Aire Seco.}$$

T°F	hw	ha	hw-ha	1/h.
95 T ₂ = 85	49.43	TWBT = 78°F h ₁ = 41.58		
T ₂ +0.1 (ΔT) = 86	50.66	h ₁ +0.1 (L/G) ΔT = 42.66	8.0	0.1250
T ₂ +0.4 (ΔT) = 89	54.56	h ₁ +0.4 (L/G) ΔT = 45.90	8.66	0.1155
T ₁ -0.4 (ΔT) = 91	57.33	h ₂ -0.4 (L/G) ΔT = 48.06	9.27	0.1078
T ₁ -0.1 (ΔT) = 94	61.77	h ₂ -0.1 (L/G) ΔT = 51.30	10.47	0.0956
120 T ₁ = 95	63.32	h ₂ = 52.38		

$$h_1 + 0.1 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T = h_a. \quad h_a = 41.58 + 0.1 (1.08) 10 = 42.66$$

$$h_1 + 0.4 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T = h_a. \quad h_a = 41.58 + 0.4 (1.08) 10 = 45.90$$

$$h_2 - 0.4 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T = h_a. \quad h_a = 51.38 - 0.4 (1.08) 10 = 48.06$$

$$h_2 - 0.1 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T = h_a. \quad h_a = 52.38 - 0.1 (1.08) 10 =$$

$$\frac{K_a V}{L} \text{ (Requerido)} = \frac{T_1 - T_2}{4} \left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} + \frac{1}{h_4} \right]$$

$$\frac{K_a V}{L} \text{ (Requerido)} = \frac{95-85}{4} \left[0.1250 + 0.1155 + 0.1079 + 0.0956 \right]$$

$$\frac{K_a V}{L} \text{ (Requerido)} = \underline{1.11}$$

5.

Velocidad de aire de Entrada.

$$\frac{CFM}{Area} = \frac{\dot{q}}{area} = \frac{225000}{22 \times 25} = \underline{409 \text{ p/min.}}$$

3.1 Diseño y Especificaciones de una Torre de Enfriamiento. Tipo: Contra-Flujo.

El punto de inicio a partir de las condiciones de diseño requeridas. El criterio es tomado de los requerimientos de ingeniería del proceso o del tamaño del sistema de refrigeración que se encuentre instalado.

Las condiciones de diseño en este particular ejemplo, podrían ser:

- Temperatura de agua caliente = 103°F.
- Temperatura de agua fría. = 88°F.
- Temperatura de Bulbo Húmedo. = 80°F.
- Agua de circulación. = 10000 GPM.

Esto nos proporciona 15° de rango y 8° de aproximación. El pa-
so siguiente es la determinación de la relación requerida de lí-
quido y gas (L/G). Esta relación varía dependiendo del dise-
ño de las torres de enfriamiento, alrededor de 0.8 a 2.0. Basa-
dos con la experiencia del Instituto de Torres de Enfriamiento
(CTI, Cooling Tower Institute), nosotros asumimos un valor de -
1.0 que es un promedio del punto de inicio.

El líquido (L) y el gas (G) están expresados en libras de agua
por hora, por pie cuadrado y el gas en libras de aire por ho-
ra, por pie cuadrado de área. Debemos convertirlo en lbs. por
hora.

1. Condiciones de Diseño.

$$\begin{aligned} \text{HWT} &= 103^{\circ}\text{F} = T_1 & \Delta T &= 15^{\circ}\text{F}. \\ \text{CWT} &= 88^{\circ}\text{F} = T_2 & \text{Eficiencia} &= 8^{\circ}\text{F}. \\ \text{WBT} &= 80^{\circ}\text{F} = h_1 \\ \text{GPM} &= 10000 & 2500 \text{ GPM por Celda.} \end{aligned}$$

2. Flujo de Aire.

$$\frac{L}{G} = \frac{\text{Flujo Másico de agua en lbs. por Hora por pie cuadrado}}{\text{Flujo Másico de aire en lbs. por Hora por pie cuadrado}}$$

$$L = \left(\frac{L \text{ gal}}{\text{Min}} \right) \cdot \left(\frac{60 \text{ Min}}{1 \text{ Hora}} \right) \cdot \left(\frac{0.1337 \text{ pies}^3}{\text{Gal.}} \right) \cdot \left(\frac{62.06 \text{ lbs.}}{\text{pies}^3} \right) = \frac{(L) 497.85 \text{ lb/H}}{}$$

$$G = \left[\left(\frac{G \text{ pies}^3}{\text{Min.}} \right) \left(\frac{60 \text{ Min}}{1 \text{ Hora}} \right) \right] \cdot \left(\frac{14.087 \text{ lbs.}}{\text{pies}^3} \right) = \frac{(G) 4.26 \text{ lbs/Hora.}}{}$$

Donde: 0.1337 pies³/gal. es un factor de conversión.

62.06 lbs/pies³. es densidad del agua = ρ

14.087 lbs/pies es densidad del aire. = γ

Por lo que confirmamos que:

$$L = \dot{Q} \ell \quad (\text{Flujo másico del agua} * \text{Densidad}).$$

$$G = \dot{q} y \quad (\text{Flujo másico del aire} * \text{Densidad}).$$

$$\therefore \frac{L}{G} = \frac{497.85 (L) \text{ lb/H.}}{4.26 (G) \text{ lb/H.}} = \underline{116.9}$$

Si asumimos que:

$$\frac{L}{G} = 1.0 = \frac{\text{GPM}}{\text{CFM}} * 116.9 = \frac{10000}{\text{CFM}} * 116.9$$

Solucionando para CFM tenemos:

$$\text{CFM} = \frac{116.9 (10000)}{1}$$

$$\text{CFM} = 1169000 \text{ Requeridos.}$$

3. Determinación del tamaño de la celda.

- Asumiendo que pasan a 500 pies/min. a través del relleno.

$$\frac{1169000}{2} = \frac{584500}{500} = 1169 ; \sqrt{1169} = 34.2 \text{ Pies.}$$

$$\frac{1169000}{3} = \frac{389667}{500} = 779.3 ; \sqrt{779.3} = 27.9 \text{ Pies.}$$

$$\frac{1169000}{4} = \frac{292250}{500} = 584.5 ; \sqrt{584.5} = 24.1 \text{ Pies.}$$

Como se ha dividido el flujo de aire por el número supuesto de celdas y se ha logrado determinar que con 4 celdas se obtiene un tamaño de 24 pies que es un tamaño bastante considerable, el cual tomaremos como - bueno para nuestro ejemplo.

Aunque se pueden calcular otros tamaños de celdas dependiendo de las condiciones de diseño

$$4. \quad \frac{K_a V}{L} \text{ (Requerido)} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{\Delta T}{h_w - h_a}$$

Donde: $h_1 = 43.69 \text{ BTU/lb. a WBT} = 80^\circ\text{F.}$ Tabla 11.18

$$h_2 = h_1 + \frac{L}{G} (\Delta T) = 43.69 + 1.0 (15)$$

$$h_2 = 58.69 \text{ BTU/lb.}$$

T°F.	hw	ha	hw-ha	1/Δh
$T_1 = 88.0$	52.23	$h_1 = 43.69$		
$T_2 + (0.1) (\Delta T) =$		$h_1 + 0.1 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T =$		
$88 + (0.1) (15) = 8.95$	55.63	$43.69 + 0.1 (1.0) (15) = 45.19$	10.04	0.0996
$T_2 + 0.4 (\Delta T) =$		$h_1 + 0.4 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T =$		
$88 + 0.4 (15) = 94.1$	61.77	$43.69 + 0.4 (1.0) 15 = 49.69$	12.08	0.0827
$T_1 - 0.4 (\Delta T) =$		$h_2 - 0.4 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T =$		
$103 - 0.4 (15) = 97$	66.55	$58.69 - 0.4 (1.0) (15) = 52.69$	13.86	0.0721
$T_1 - 0.1 (\Delta T) =$		$h_2 - 0.1 \left(\frac{L}{G} \right) \Delta T =$		
$103 - 0.1 (15) = 101.5$	74.48	$58.69 - 0.1 (1.0) 15 = 57.19$	17.29	0.0578
$T_2 = 103.0$	77.34	$h_2 = 58.69$		

$$\Sigma 1/\Delta h = 0.3122$$

$$\frac{K_a V}{L} \text{ (REQD)} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{\Delta T}{h_w - h_a} \cong \frac{T_1 - T_2}{4} \left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} + \frac{1}{h_4} \right]$$

$$= \frac{103 - 88}{4} \boxed{0.3122}$$

$$\frac{K_a V}{L} \text{ (REQD)} = \frac{1.17}{\text{====}}$$

5. Velocidad del Aire de Entrada.

Como se tienen 4 celdas, se toma CFM = 292250 y celdas de 24'x24 pies.

$$\frac{292250}{24 \times 24} = 507 \text{ pies por minuto (p}^3\text{/min)}.$$

Utilizando las curvas del fabricante de ventiladores en la Fig.3.6 y sabiendo que 0.5" de agua es un promedio de la presión estática descendiente de trabajo a través de la torre de este tipo, nosotros obtenemos 40 HP. requeridos para la transmisión de un ventilador de 18 pies de diámetro y 8 aspas.

El resultado del cálculo del tamaño de la celda se hizo dividiendo -- 292250 CFM de aire entre 500 GPM de agua que da 584.5 pies cuadrados de área requerido, por lo que se obtiene una celda de 24 pies por 24 pies.

- Proceso de Selección del Ventilador.

- Diámetro de ventilador 18 pies.
 - Velocidad 239 RPM.
 - CFM = 292253 $\approx$ 300000
 - STD presión actual = 0.491" H₂O = (S P_{ACT}).
1. Presión a Velocidad Normal. (V P_{STD}), según tabla T-16B-6.
(Standard Velocity Pressure V P_{STD})
V P_{STD} = 300000 CFM a la línea de presión de velocidad
da = 0.18" H₂O.
 2. Determinación del Angulo de Ataque del Ventilador.

a) Presión actual total (T P_{ACT})

$$T P_{ACT} = S P_{ACT} + \left(V P_{STD} * \frac{1}{\text{Relación de Densidad}} \right)$$

La relación de densidad se obtiene del monograma 1 (Chart No.1) con la T₁ = 103°F y al nivel del mar obtenemos una relación de la densidad de 1.06

entonces:

$$T P_{ACT} = 0.491 + (0.18 * \frac{1}{1.06}) = \underline{0.66" H_2O}.$$

b) Presión total corregida.

$$TP_{CORR} = T P_{ACT} * \left(\frac{1}{\text{Relación de Densidad}} \right)$$

$$TP_{CORR} = 0.66 * \left(\frac{1}{1.06} \right) = \underline{0.62" H_2O}$$

c) Angulo de ataque del Ventilador.

En la tabla T-16B-6, la intersección de la presión total 0.66" H₂O y el flujo de aire 300000 CFM nos da 8° de ángulo del ventilador.

3. Determinación de la Potencia necesaria (H P_{ACT}).

$$H P_{ACT} = HP_{CURVA} \cdot \frac{1}{\text{Relación de Densidad}}$$

Según la tabla T-16B-6 con un flujo de 300000 CFM y con 8° de ángulo de ataque necesitamos.

$$HP_{CURVA} = 31.$$

$$\text{Entonces: } HP_{ACT} = 31 \cdot \frac{1}{1.06}$$

$$HP_{ACT} = 39.2 \approx \underline{40 HP}$$

4. Eficiencia del Ventilador.

$$FAN EFF = \frac{CFM * TP_{ACT}}{6356 * HP_{ACT}}$$

$$FAN EFF = \frac{300000 * 0.66}{6356 * 40} = \frac{198000}{254240}$$

$$FAN EFF = 0.77\%$$

Nuestra siguiente consideración será la selección del relleno de la torre que es un factor importante puesto que determina la altura total de la torre.

La mayoría de fabricantes que venden los rellenos de las torres proveen de curvas de eficiencia de sus materiales usados. Estas curvas son obtenidas de laboriosas pruebas realizadas, y luego expandidas por la tecnología de las computadoras.

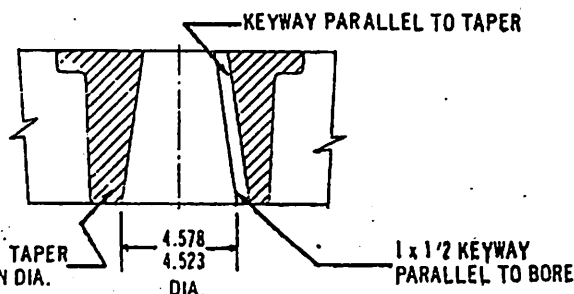
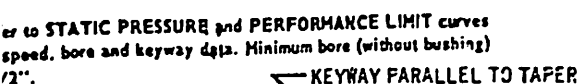
Con los diferentes tipos de materiales disponibles se puede seleccionar la mejor configuración para un diseño particular. Puesto que tenemos un ejemplo de torre de contra-flujo, tomaremos un relleno celular el cual es el de mayor eficiencia. En la Figura 3.7 se muestra una familia de curvas de este tipo de relleno fabricado.

Esta se utiliza de la siguiente forma:

1. El primer punto de partida es la relación L/G de las curvas a 1.0
2. Este diseño se refiere a una temperatura de Bulbo Húmedo de 80°F .
3. El rango de enfriamiento del diseño es de $15^{\circ}\text{F} = (103^{\circ}\text{F} - 88^{\circ}\text{F})$.
4. La entrada de agua caliente es a 103°F ,. Este se puede interpolar como se observa en la gráfica.
5. El rango de enfriamiento 15°F y la intersección de la temperatura de agua caliente 103°F , obtenemos un $KaV/L = 1.2$, el cual es una característica requerida a los parámetros de condición del diseño requerido.

Teniendo esta información, observamos las curvas de funcionamiento de características específicas del relleno, Figura 3.8, comenzamos observando la gráfica con la velocidad del aire de entrada del diseño que es de 500 pies/minuto y vamos verticalmente justo a determinar un $\frac{KaV}{L}$ de 1.2. Esto indica que aparentemente 30 pulgadas de este material de relleno es conveniente para las especificaciones de este diseño.

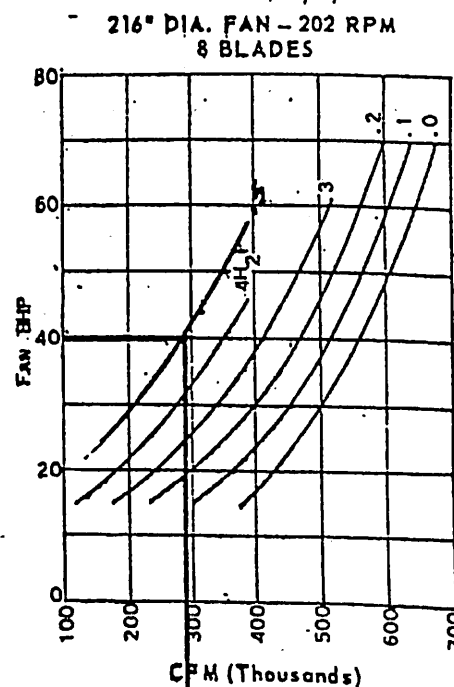
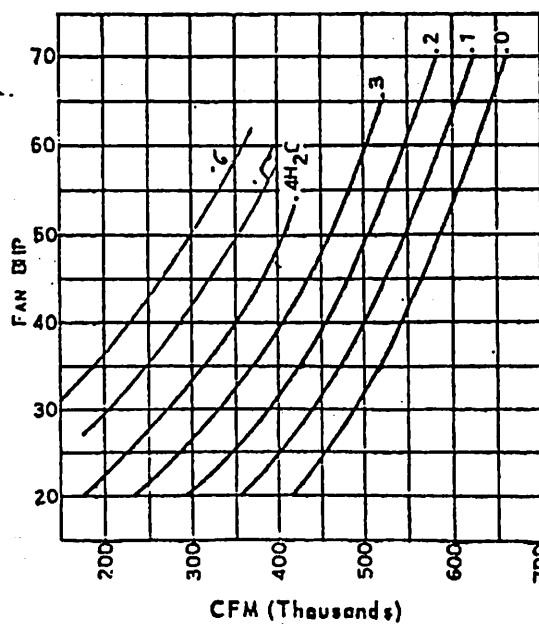
Usando esta información nosotros podemos ya determinar la altura total de nuestra torre de contra flujo, seleccionamos 12 pulgadas de altura del depósito de agua, 6 pies de altura de las lumbreras de entrada de aire, 30 pulgadas de altura del relleno con un adicional de 30 pulgadas de capacidad futura de expansión, 24 pulgadas de altura del sistema de rociado, 12 pulgadas de altura para los eliminadores de gota y deflectores, 48 pulgadas de altura para el aire de descarga y 8 pies de altura de la envolvente del ventilador. Esto sumado nos dá un total de 27 pies de altura total de la torre de enfriamiento de contra - flujo de una celda, que se observa en la Figura 3.9.



Dimensions of blade above and below fan center line at maximum pitch of $48\frac{1}{2}^\circ$ on pitching boss.

*Minimum clearance at tip of trailing edge.

212" DIA. FAN - 202 RPM
8 BLADES



Curves are based on model tests, simulating AMCA procedures. The test cylinder was eased inlet with close tip clearance. Tip clearances, fan cylinder and system characteristics can cause variation from the curves shown above.

FIG 3.6 FAN CURVES



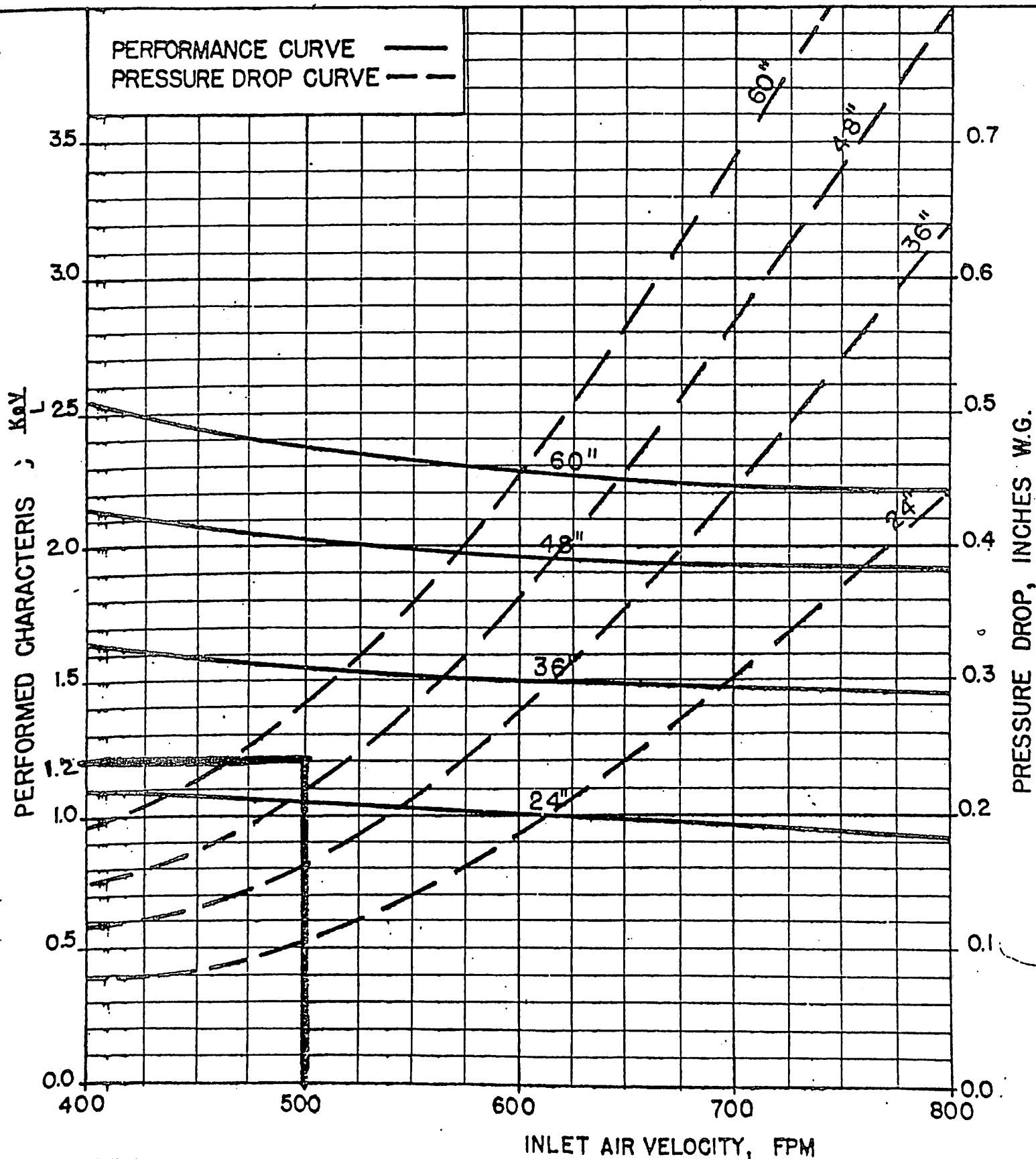
FILL CHARACTERISTICS
CF 19060

3 503
SEPTEMBER, 1973

18.7

AIR DENSITY .071 $\frac{\text{LBS.}}{\text{CU.FT.}}$

$\frac{\text{WATER}}{\text{AIR}}$ RATIO = 1.0





REQUIRED CHARACTERISTICS COUNTERFLOW

4 013
SEPTEMBER, 1973

BAROMETRIC PRESSURE 29.92 inches Hg

$\frac{\text{WATER}}{\text{AIR}}$ RATIO=1.0

WBT = 80 °F

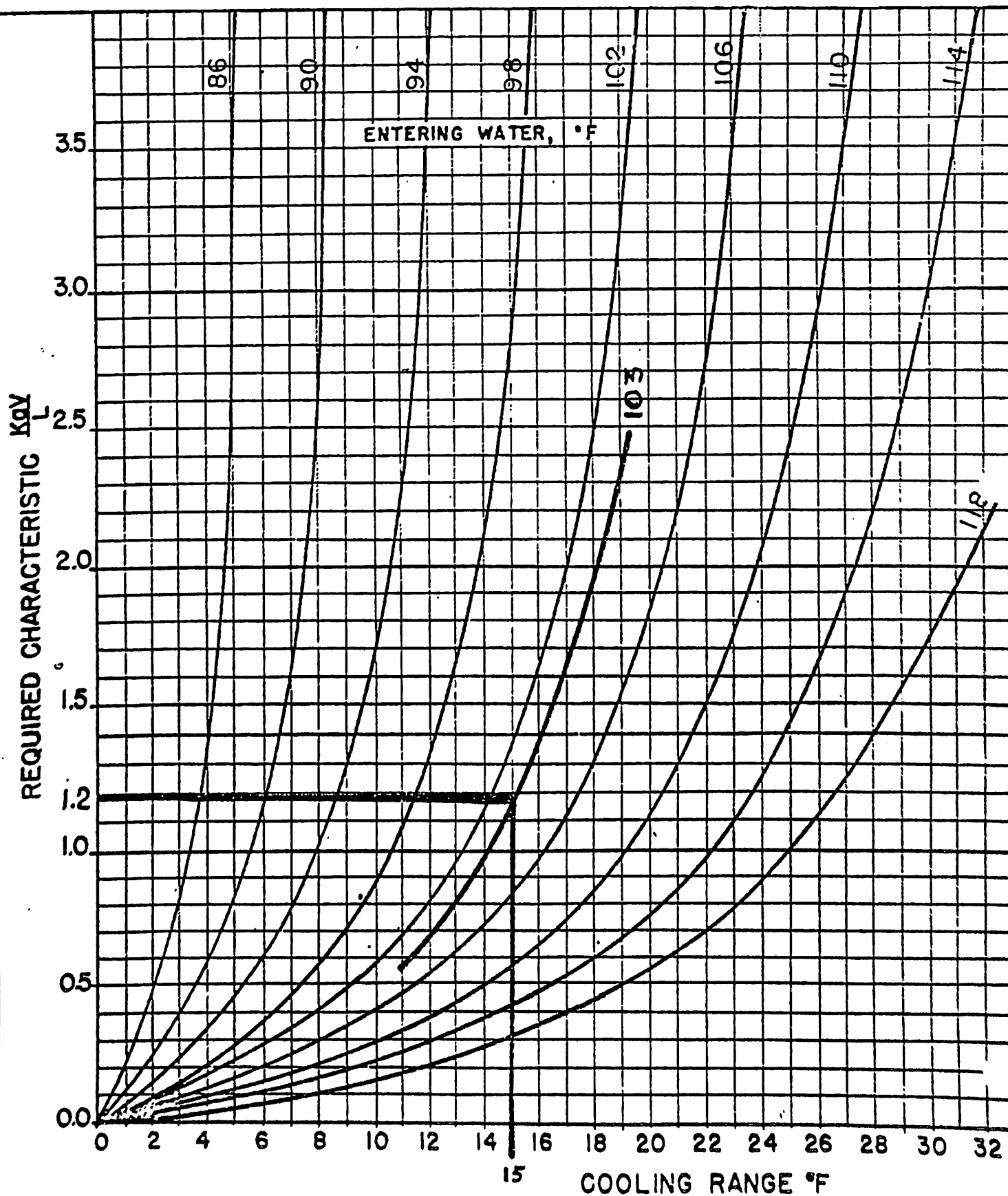


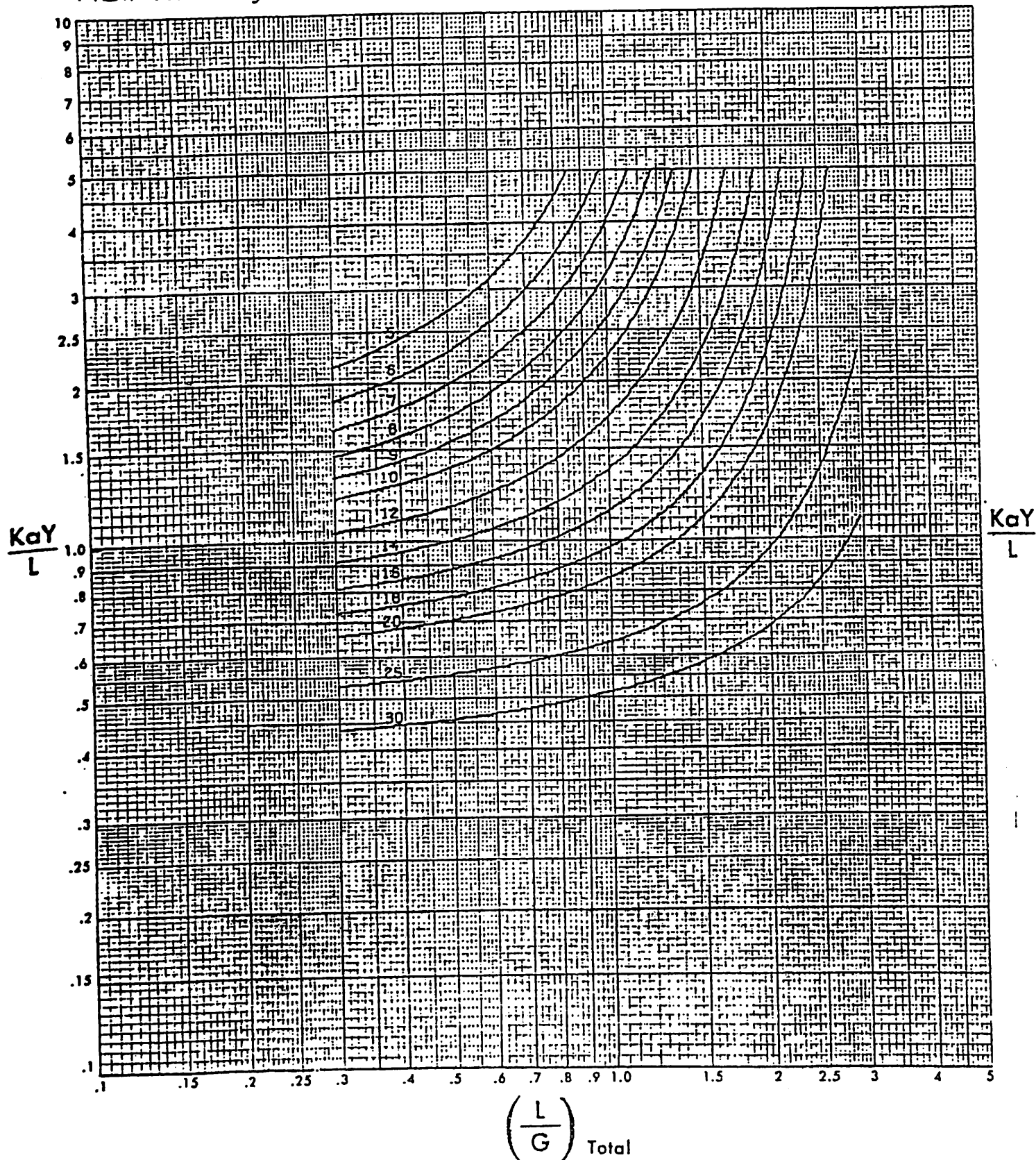
FIGURE 8.0

Figure 4.

70 °F, WET BULB
20 °F, RANGE

✓ 11.6

neil w. kelly & associates Thermal Demand Curves



Volume of Saturated Air-Water Vapor Mixtures at 29.921 In Hg
(cubic feet of mixture per pound of dry air)

11.17

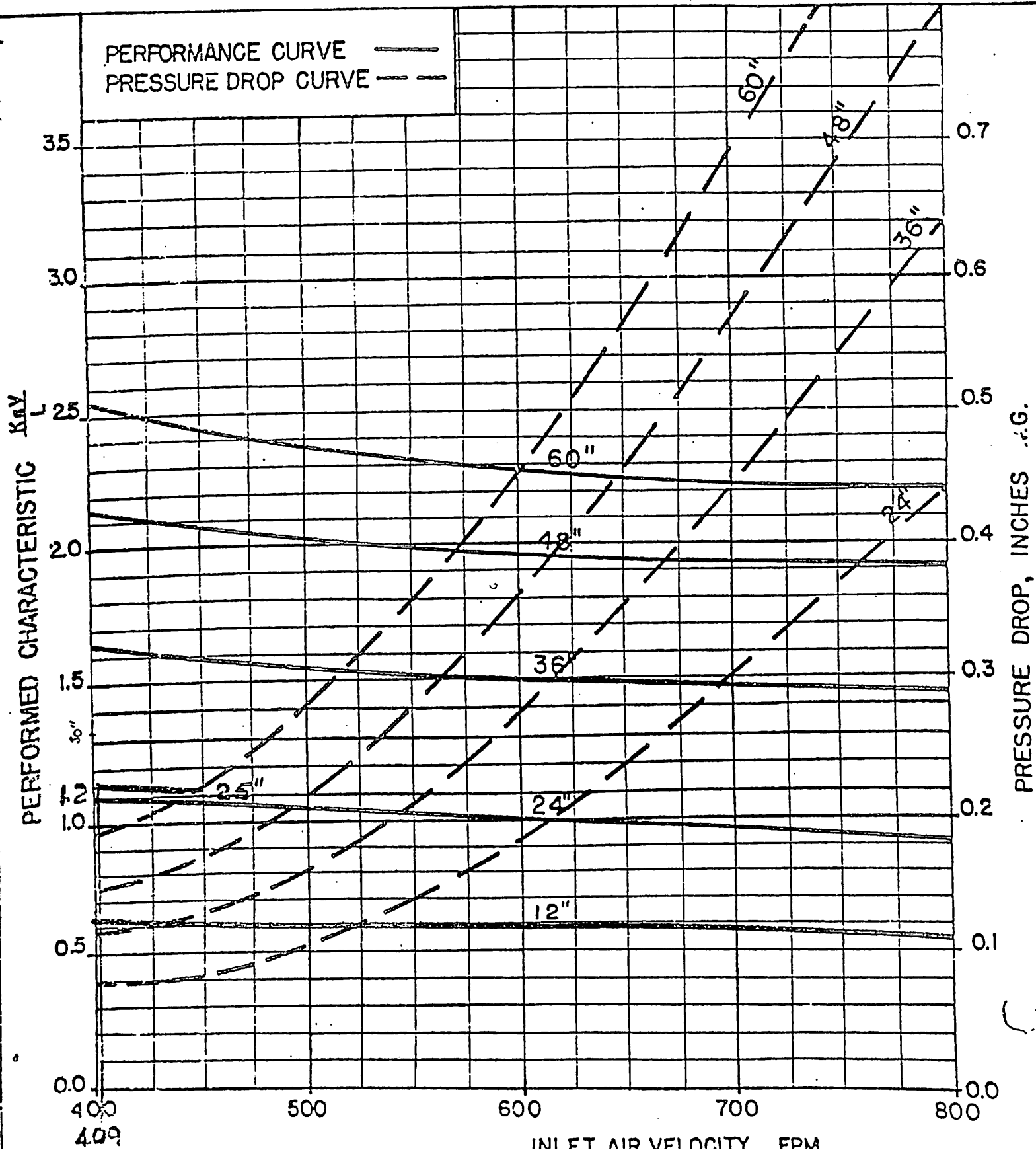
°F	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	°F
60	13.329	13.332	13.336	13.339	13.343	13.346	13.349	13.353	13.356	13.360	60
61	13.363	13.367	13.370	13.374	13.377	13.381	13.384	13.388	13.391	13.395	61
62	13.398	13.402	13.405	13.409	13.412	13.416	13.419	13.423	13.426	13.430	62
63	13.433	13.437	13.440	13.444	13.447	13.451	13.454	13.458	13.461	13.465	63
64	13.468	13.472	13.475	13.479	13.482	13.486	13.490	13.493	13.497	13.500	64
65	13.504	13.508	13.511	13.515	13.518	13.522	13.525	13.529	13.532	13.536	65
66	13.539	13.543	13.546	13.550	13.554	13.558	13.561	13.565	13.569	13.572	66
67	13.576	13.580	13.583	13.587	13.591	13.595	13.598	13.602	13.606	13.609	67
68	13.613	13.617	13.620	13.624	13.628	13.632	13.635	13.639	13.643	13.646	68
69	13.650	13.654	13.657	13.661	13.665	13.669	13.672	13.676	13.680	13.683	69
70	13.687	13.691	13.694	13.698	13.702	13.706	13.709	13.713	13.717	13.720	70
71	13.724	13.728	13.732	13.735	13.739	13.743	13.747	13.751	13.754	13.758	71
72	13.762	13.766	13.770	13.774	13.778	13.782	13.785	13.789	13.793	13.797	72
73	13.801	13.805	13.809	13.813	13.817	13.821	13.825	13.829	13.833	13.837	73
74	13.841	13.845	13.849	13.853	13.857	13.861	13.865	13.869	13.873	13.877	74
75	13.881	13.885	13.889	13.893	13.897	13.901	13.905	13.909	13.913	13.917	75
76	13.921	13.925	13.929	13.933	13.937	13.942	13.946	13.950	13.954	13.958	76
77	13.962	13.966	13.970	13.974	13.978	13.983	13.987	13.991	13.995	13.999	77
78	14.003	14.007	14.011	14.016	14.020	14.024	14.028	14.032	14.037	14.041	78
79	14.045	14.049	14.053	14.058	14.062	14.066	14.070	14.074	14.079	14.083	79
80	14.087	14.091	14.096	14.100	14.104	14.109	14.113	14.117	14.121	14.126	80
81	14.130	14.135	14.139	14.143	14.148	14.152	14.156	14.161	14.165	14.170	81
82	14.174	14.178	14.183	14.187	14.192	14.196	14.200	14.205	14.209	14.214	82
83	14.218	14.222	14.227	14.231	14.236	14.240	14.245	14.249	14.254	14.258	83
84	14.263	14.267	14.272	14.276	14.281	14.285	14.290	14.294	14.299	14.303	84
85	14.308	14.313	14.317	14.322	14.326	14.331	14.336	14.340	14.345	14.349	85
86	14.354	14.359	14.363	14.368	14.373	14.377	14.382	14.387	14.391	14.396	86
87	14.401	14.405	14.410	14.415	14.420	14.424	14.429	14.434	14.439	14.443	87
88	14.448	14.453	14.458	14.462	14.467	14.472	14.477	14.482	14.486	14.491	88
89	14.496	14.501	14.506	14.511	14.516	14.521	14.526	14.530	14.535	14.540	89
90	14.545	14.550	14.555	14.560	14.565	14.570	14.575	14.580	14.585	14.590	90
91	14.595	14.600	14.605	14.610	14.615	14.620	14.625	14.630	14.635	14.640	91
92	14.645	14.650	14.656	14.661	14.666	14.671	14.676	14.681	14.686	14.692	92
93	14.697	14.702	14.707	14.712	14.718	14.723	14.728	14.733	14.738	14.744	93
94	14.749	14.754	14.760	14.765	14.770	14.776	14.781	14.786	14.791	14.797	94
95	14.802	14.808	14.813	14.818	14.824	14.829	14.835	14.840	14.845	14.851	95
96	14.856	14.862	14.867	14.873	14.878	14.884	14.889	14.895	14.900	14.906	96
97	14.911	14.917	14.922	14.928	14.933	14.939	14.944	14.950	14.956	14.961	97
98	14.967	14.972	14.978	14.984	14.989	14.995	15.001	15.007	15.012	15.018	98
99	15.024	15.029	15.035	15.041	15.047	15.052	15.058	15.064	15.070	15.076	99
100	15.081	15.087	15.093	15.099	15.105	15.111	15.117	15.123	15.128	15.134	100
101	15.140	15.146	15.152	15.158	15.164	15.170	15.176	15.182	15.188	15.194	101
102	15.200	15.206	15.212	15.218	15.224	15.231	15.237	15.243	15.249	15.255	102
103	15.261	15.267	15.273	15.280	15.286	15.292	15.298	15.304	15.311	15.317	103
104	15.323	15.330	15.336	15.342	15.348	15.355	15.361	15.368	15.374	15.380	104
105	15.387	15.393	15.400	15.406	15.413	15.419	15.426	15.432	15.439	15.446	105
106	15.452	15.458	15.465	15.471	15.478	15.485	15.491	15.498	15.504	15.511	106
107	15.518	15.524	15.531	15.538	15.544	15.551	15.558	15.565	15.572	15.578	107
108	15.585	15.592	15.599	15.606	15.613	15.620	15.626	15.633	15.640	15.647	108
109	15.654	15.661	15.668	15.675	15.682	15.689	15.696	15.703	15.710	15.717	109
110	15.724	15.731	15.739	15.746	15.753	15.760	15.767	15.775	15.782	15.789	110
111	15.796	15.803	15.811	15.818	15.825	15.833	15.840	15.847	15.855	15.862	111
112	15.869	15.877	15.884	15.892	15.899	15.907	15.914	15.922	15.929	15.937	112
113	15.944	15.952	15.959	15.967	15.974	15.982	15.990	15.997	16.005	16.013	113
114	16.020	16.028	16.036	16.044	16.051	16.059	16.067	16.075	16.083	16.090	114
115	16.098	16.106	16.114	16.122	16.130	16.138	16.146	16.154	16.162	16.170	115
116	16.178	16.186	16.194	16.202	16.210	16.218	16.227	16.235	16.243	16.251	116
117	16.259	16.268	16.276	16.284	16.293	16.301	16.309	16.318	16.326	16.334	117
118	16.343	16.351	16.360	16.368	16.377	16.385	16.394	16.402	16.411	16.420	118
119	16.428	16.437	16.446	16.454	16.463	16.472	16.480	16.489	16.498	16.507	119
120	16.515	16.524	16.533	16.542	16.551	16.560	16.569	16.578	16.587	16.596	120
121	16.605	16.614	16.623	16.632	16.641	16.650	16.659	16.669	16.678	16.687	121
122	16.696	16.705	16.715	16.724	16.734	16.743	16.752	16.762	16.771	16.781	122
123	16.790	16.800	16.809	16.819	16.828	16.838	16.848	16.857	16.867	16.876	123
124	16.886	16.896	16.906	16.916	16.926	16.936	16.945	16.955	16.965	16.975	124
°F	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	°F

Table 1 (continued). Enthalpy of Saturated Air-Water Vapor Mixture (at 29.921 in. Hg)^a

°F	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	°F
66	30.93	30.90	30.98	31.06	31.14	31.22	31.30	31.38	31.46	31.54	66
67	31.62	31.70	31.78	31.86	31.94	32.02	32.10	32.18	32.26	32.34	67
68	32.42	32.50	32.59	32.67	32.75	32.83	32.92	33.00	33.08	33.17	68
69	33.25	33.33	33.41	33.50	33.58	33.66	33.74	33.83	33.91	34.00	69
70	34.09	34.17	34.25	34.34	34.43	34.51	34.60	34.69	34.78	34.87	70
71	34.95	35.04	35.13	35.22	35.30	35.39	35.48	35.57	35.66	35.75	71
72	35.83	35.92	36.01	36.10	36.19	36.28	36.37	36.46	36.56	36.65	72
73	36.74	36.83	36.92	37.01	37.10	37.20	37.29	37.38	37.48	37.57	73
74	37.66	37.76	37.85	37.94	38.04	38.13	38.23	38.32	38.41	38.51	74
75	38.61	38.70	38.80	38.89	38.98	39.08	39.18	39.27	39.37	39.47	75
76	39.57	39.67	39.77	39.87	39.97	40.07	40.17	40.27	40.37	40.47	76
77	40.57	40.67	40.77	40.87	40.97	41.07	41.17	41.27	41.37	41.48	77
78	41.58	41.68	41.78	41.88	41.99	42.10	42.20	42.30	42.41	42.52	78
79	42.62	42.73	42.84	42.94	43.05	43.16	43.26	43.37	43.47	43.58	79
80	43.69	43.80	43.91	44.01	44.12	44.23	44.34	44.45	44.56	44.67	80
81	44.78	44.89	45.00	45.11	45.22	45.34	45.45	45.56	45.67	45.78	81
82	45.90	46.01	46.12	46.23	46.35	46.46	46.58	46.70	46.81	46.92	82
83	47.04	47.15	47.27	47.39	47.51	47.63	47.74	47.86	47.98	48.10	83
84	48.22	48.34	48.46	48.58	48.70	48.82	48.94	49.06	49.18	49.30	84
85	49.43	49.55	49.67	49.79	49.91	50.03	50.15	50.28	50.40	50.53	85
86	50.65	50.78	50.90	51.03	51.16	51.28	51.41	51.54	51.67	51.80	86
87	51.93	52.06	52.19	52.32	52.45	52.58	52.71	52.84	52.97	53.10	87
88	53.23	53.36	53.49	53.62	53.75	53.88	54.02	54.15	54.28	54.42	88
89	54.56	54.69	54.82	54.96	55.09	55.23	55.37	55.51	55.65	55.79	89
90	55.93	56.07	56.21	56.35	56.49	56.63	56.77	56.91	57.05	57.19	90
91	57.33	57.47	57.61	57.76	57.90	58.05	58.19	58.34	58.48	58.63	91
92	58.78	58.92	59.07	59.21	59.36	59.50	59.65	59.80	59.95	60.10	92
93	60.25	60.40	60.55	60.70	60.85	61.00	61.15	61.31	61.46	61.61	93
94	61.77	61.92	62.07	62.23	62.38	62.54	62.69	62.85	63.00	63.16	94
95	63.32	63.48	63.63	63.79	63.95	64.11	64.27	64.44	64.60	64.76	95
96	64.92	65.08	65.25	65.41	65.58	65.74	65.90	66.06	66.23	66.39	96
97	66.55	66.72	66.88	67.05	67.22	67.39	67.56	67.73	67.90	68.07	97
98	68.23	68.40	68.57	68.74	68.91	69.08	69.26	69.43	69.61	69.78	98
99	69.96	70.14	70.32	70.50	70.67	70.85	71.02	71.20	71.38	71.55	99
100	71.73	71.91	72.09	72.27	72.45	72.63	72.82	73.00	73.19	73.37	100
101	73.55	73.73	73.92	74.11	74.29	74.48	74.67	74.86	75.04	75.23	101
102	75.42	75.62	75.82	76.01	76.20	76.39	76.58	76.77	76.96	77.15	102
103	77.34	77.54	77.73	77.93	78.12	78.32	78.52	78.72	78.92	79.12	103
104	79.32	79.52	79.72	79.92	80.12	80.32	80.52	80.72	80.93	81.13	104
105	81.34	81.54	81.75	81.95	82.16	82.37	82.58	82.79	83.00	83.21	105
106	83.42	83.63	83.84	84.05	84.26	84.48	84.69	84.91	85.12	85.34	106
107	85.56	85.77	85.99	86.21	86.43	86.65	86.87	87.10	87.32	87.54	107
108	87.76	87.99	88.22	88.44	88.67	88.89	89.11	89.34	89.57	89.80	108
109	90.03	90.25	90.48	90.71	90.94	91.17	91.40	91.64	91.87	92.10	109
110	92.34	92.57	92.81	93.05	93.29	93.52	93.76	94.00	94.24	94.48	110
111	94.72	94.96	95.21	95.45	95.70	95.94	96.19	96.44	96.68	96.93	111
112	97.18	97.43	97.68	97.93	98.18	98.43	98.68	98.94	99.19	99.45	112
113	99.71	99.96	100.22	100.48	100.74	101.00	101.26	101.52	101.78	102.05	113
114	102.31	102.58	102.84	103.10	103.37	103.63	103.90	104.17	104.44	104.71	114
115	104.98	105.25	105.52	105.79	106.06	106.34	106.61	106.89	107.17	107.45	115
116	107.73	108.01	108.29	108.57	108.85	109.13	109.41	109.70	109.98	110.27	116
117	110.55	110.84	111.13	111.42	111.71	112.00	112.29	112.58	112.87	113.16	117
118	113.46	113.75	114.05	114.35	114.65	114.95	115.25	115.55	115.86	116.16	118
119	116.46	116.77	117.07	117.38	117.69	118.00	118.30	118.61	118.92	119.23	119
120	119.54	119.85	120.17	120.48	120.80	121.12	121.44	121.76	122.08	122.40	120
121	122.72	123.04	123.36	123.68	124.01	124.34	124.67	125.00	125.33	125.65	121
122	125.98	126.31	126.64	126.98	127.31	127.65	127.99	128.33	128.67	129.01	122
123	129.35	129.69	130.03	130.37	130.72	131.06	131.41	131.75	132.10	132.45	123
124	132.80	133.15	133.50	133.85	134.21	134.57	134.93	135.29	135.66	136.03	124
125	136.4	136.7	137.1	137.5	137.8	138.2	138.6	139.0	139.3	139.7	125
126	140.1	140.5	140.8	141.2	141.6	142.0	142.3	142.7	143.1	143.5	126
127	143.9	144.3	144.7	145.1	145.5	145.9	146.3	146.7	147.1	147.4	127
128	147.8	148.2	148.6	149.0	149.4	149.8	150.2	150.6	151.0	151.4	128
129	151.8	152.2	152.6	153.0	153.4	153.8	154.2	154.6	155.1	155.5	129
130	155.9	156.3	156.8	157.2	157.6	158.0	158.5	158.9	159.4	159.8	130
131	160.3	160.7	161.2	161.6	162.0	162.5	162.9	163.4	163.8	164.2	131
132	164.7	165.1	165.6	166.0	166.5	167.0	167.4	167.9	168.3	168.8	132
133	169.3	169.7	170.2	170.7	171.1	171.6	172.1	172.6	173.0	173.5	133
134	174.0	174.5	175.0	175.4	175.9	176.4	176.9	177.4	177.9	178.4	134
135	178.9	179.4	179.9	180.4	180.9	181.4	181.9	182.4	182.9	183.4	135

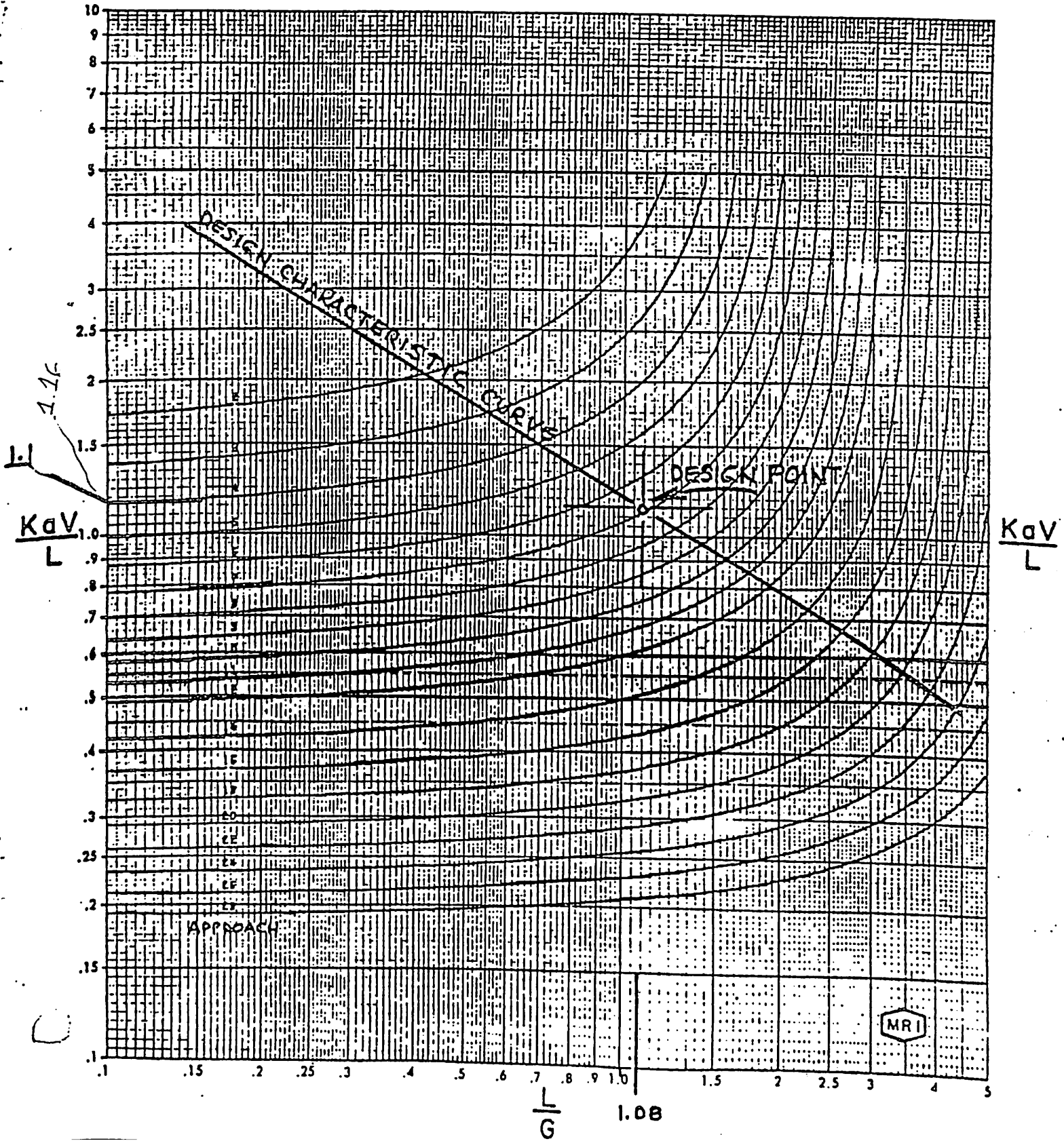
AIR DENSITY .071 $\frac{\text{LBS.}}{\text{CUFT.}}$

$\frac{\text{WATER}}{\text{AIR}}$ RATIO=1.0





78 WET BULB (°F)
10 RANGE (°F)

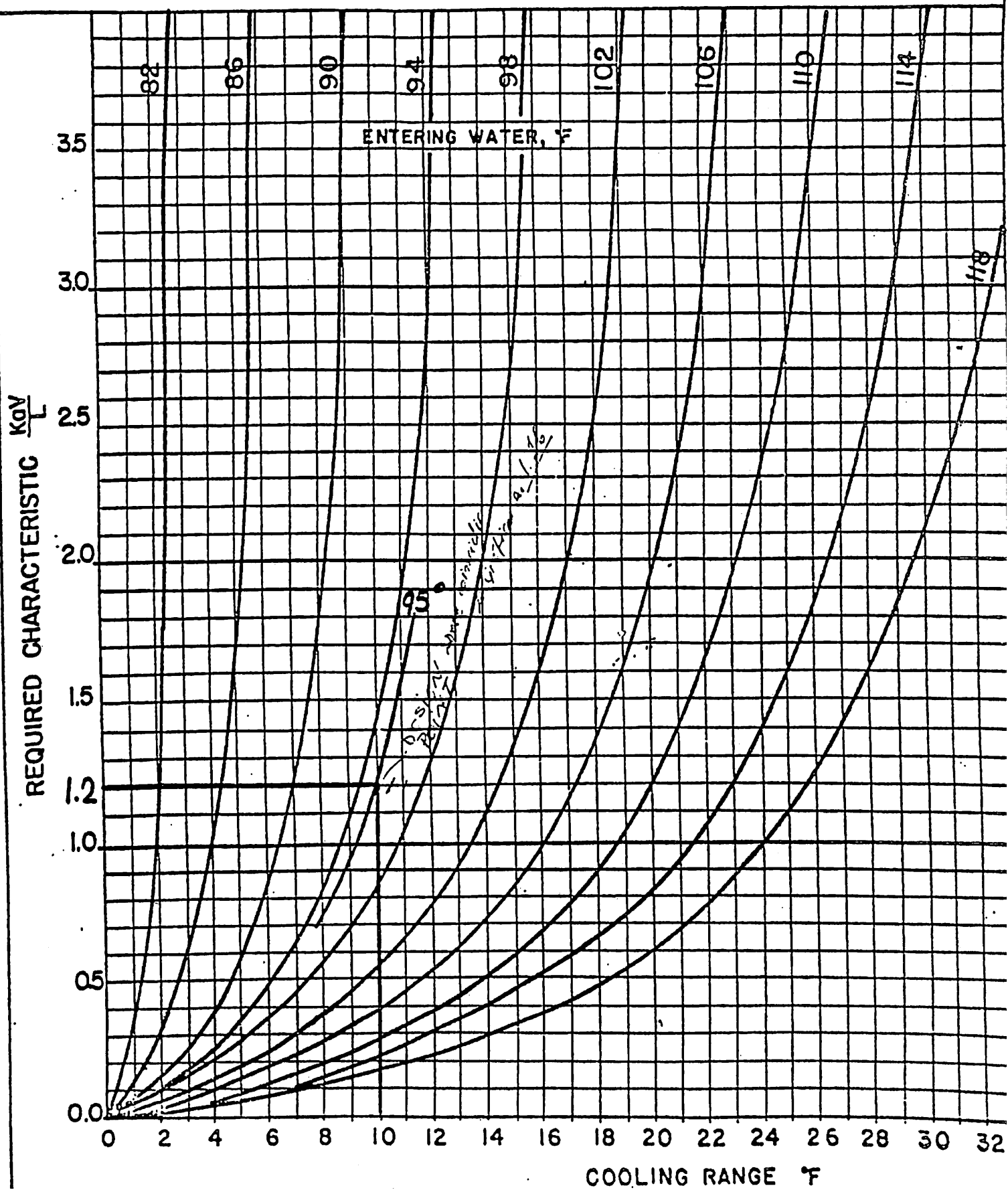


REQUIRED CHARACTERISTICS COUNTERFLOW.

BAROMETRIC PRESSURE 29.92 inches Hg

WATER
AIR RATIO=1.0

WBT = 78 °F



HUDSON PRODUCTS CORPORATION

CERTIFIED FAN PERFORMANCE

1-100-6

THESE RATINGS ARE THE RESULT OF TESTS RUN IN ACCORDANCE WITH FIGURES NO. 3 AND 6 OF BULLETIN 210, APRIL 1962 EDITION, STANDARD TEST CODE FOR AIR MOVING DEVICES ADOPTED BY THE AIR MOVING AND CONDITIONING ASSOCIATION. RATED IN ACCORDANCE WITH THE STANDARD TEST CODE BY THE TEXAS ENGINEERING EXPERIMENT STATION.

BLADE MODEL T-16B 6 BLADES

TIP SPEED 12,000 FPM 239 RPM

AIR DENSITY .075 LBS/CU FT

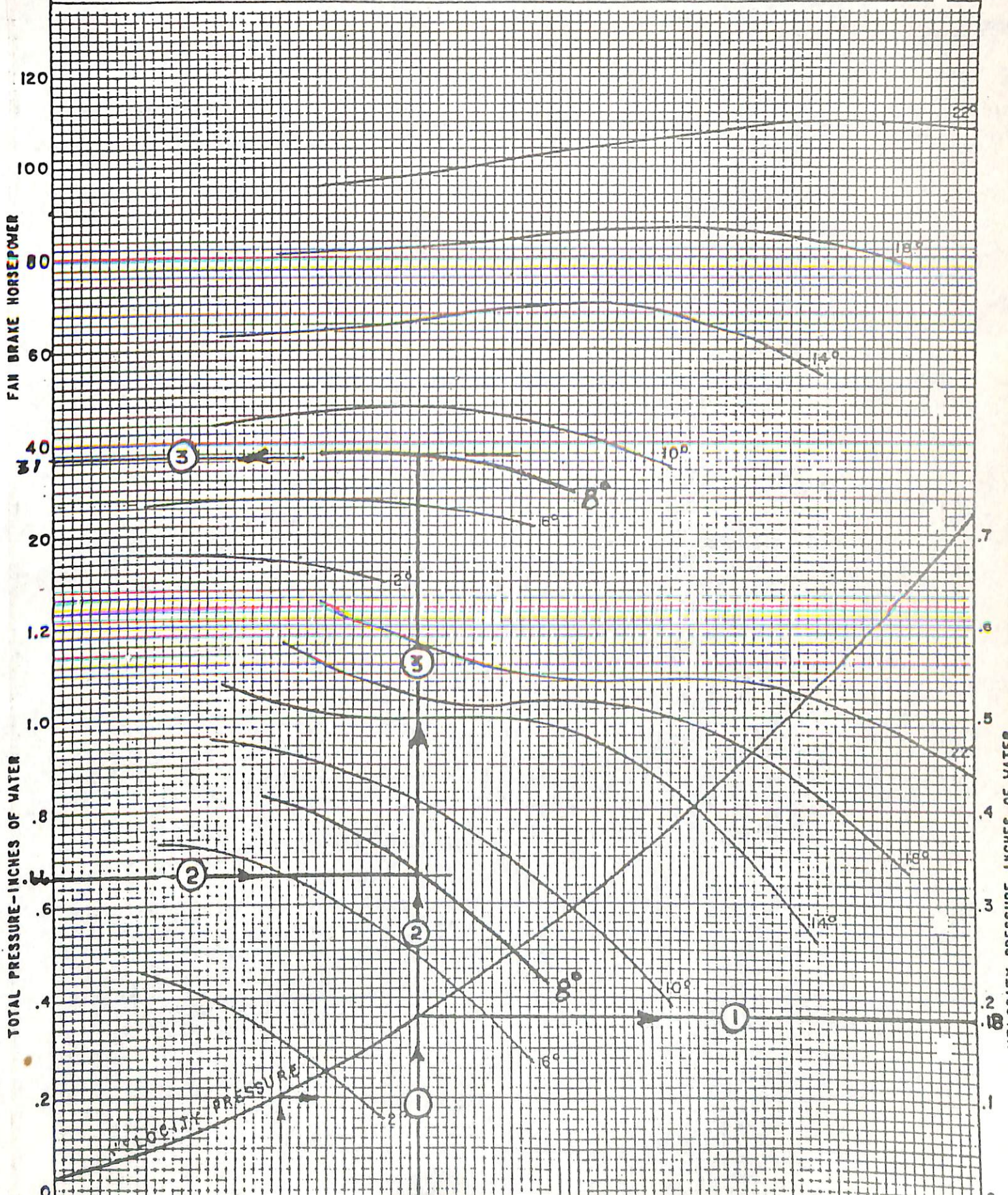
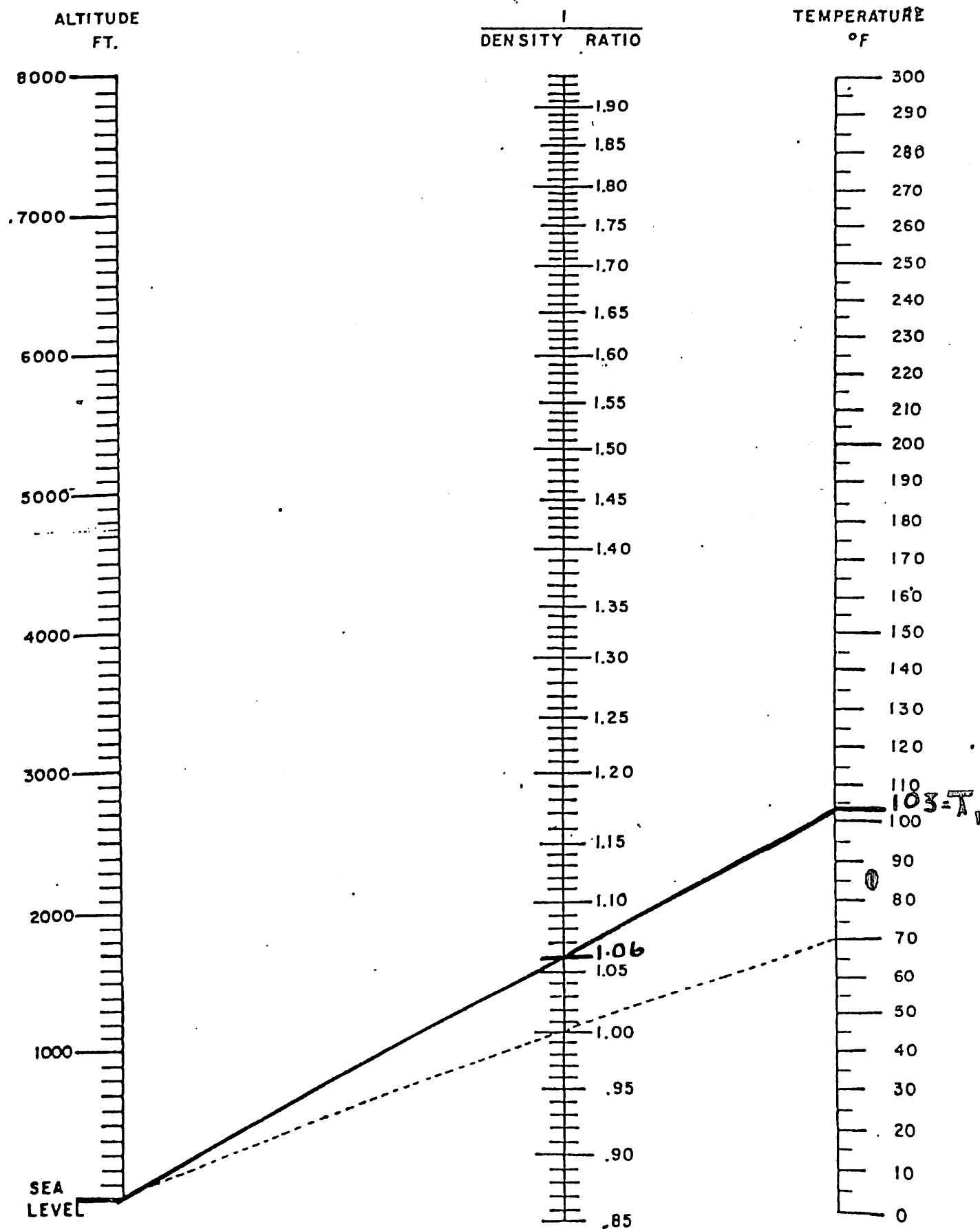
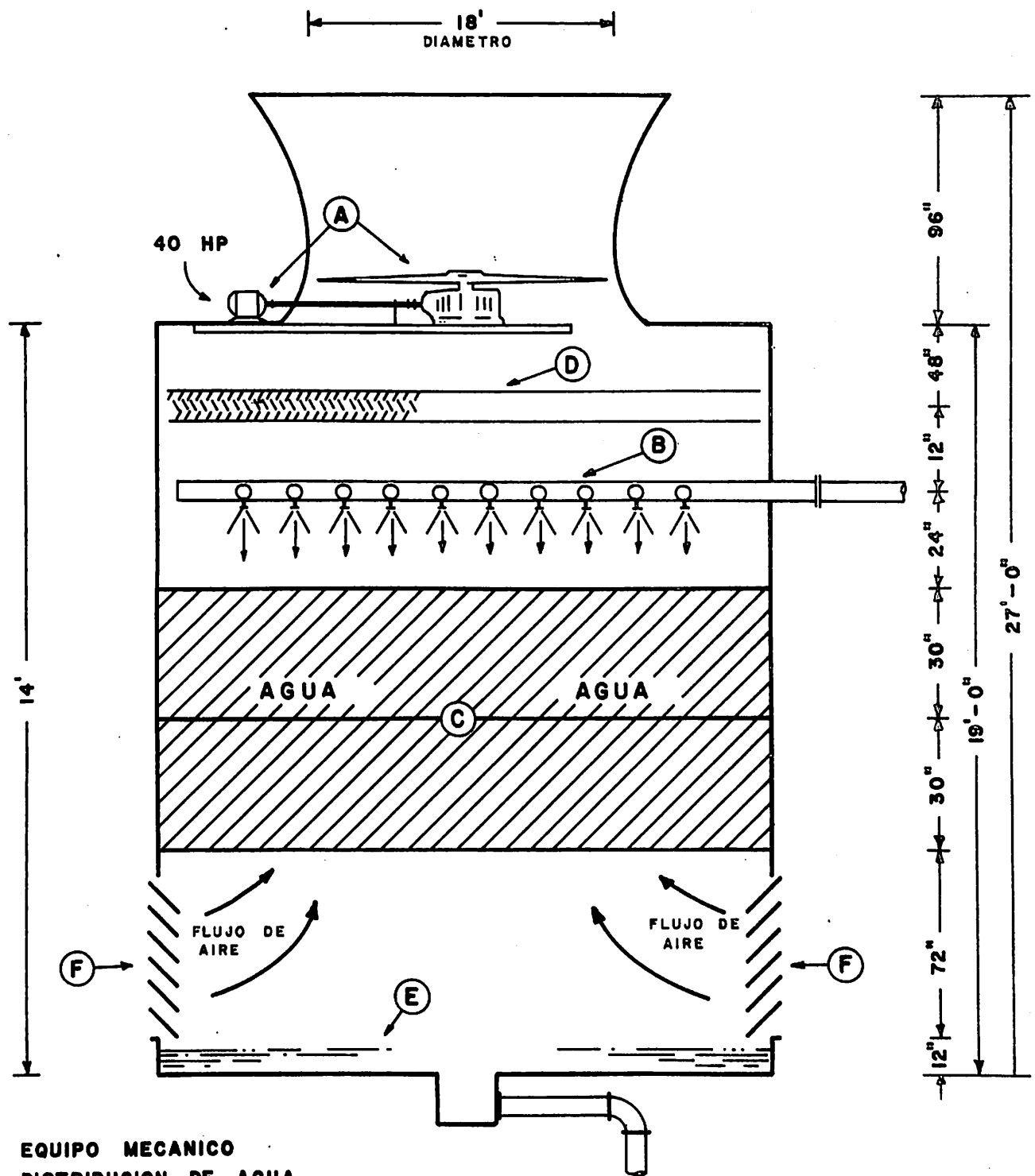


CHART NO. 1 NOMOGRAPH FOR DETERMINING AIR DENSITY CORRECTION



ESQUEMA DE CONTRAFLUJO



- A.- EQUIPO MECANICO
- B.- DISTRIBUCION DE AGUA
- C.- RELLENO
- D.- ELIMINADOR DE GOTEIO
- E.- DEPOSITO DE AGUA FRIA
- F.- PERSIANA PARA ENTRADA DE AIR

SIN ESCALA

FIGURA No. 3.9

4. CONSTRUCCION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.

4.1 Fundamentos.

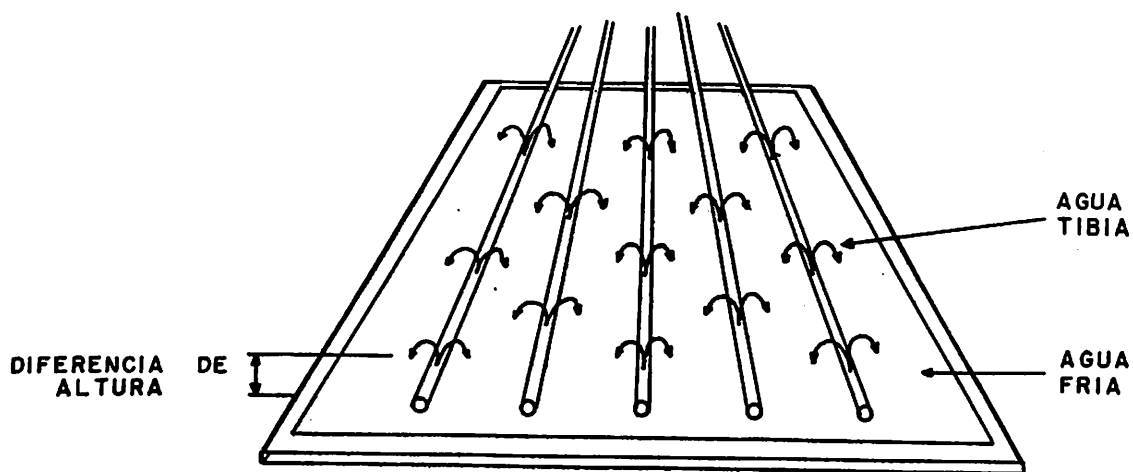
El agua caliente de un proceso no siempre se ha enfriado y recirculado para su uso posterior.

Antes del desarrollo de las torres de enfriamiento, la industria traía agua fría de algún depósito y la descartaba cuando ésta se encontraba caliente.

En el caso de que una planta se encontrara cerca de un río ó una corriente, debe de tomar el agua en corriente arriba y descargar el agua caliente corriente abajo, en caso de no poseer un río ó una corriente, debe de ser sacada de un estanque, y el agua caliente debe ser regresada al estanque, esta forma de enfriamiento ya no es usada actualmente, por presentarse el problema, tanto de escasez del agua como la contaminación de la misma, por lo que se pensó en otras formas de enfriamiento del agua.

El agua cuando es regresada al estanque se lleva a cabo un enfriamiento evaporativo debido a la exposición de la superficie al aire; cómo este tipo de enfriamiento no resulta eficiente, hay necesidad de modificar el sistema y esto se logra al vaciar el agua caliente sobre el estanque, obteniendo con esto un mayor enfriamiento del agua, debido a que existe un mayor contacto de agua-aire.

Este sistema se muestra a continuación:



SISTEMA DE ENFRIAMIENTO ESTANQUE
DE ROCIADO

FIG. 4.1

Ya que mayor cantidad de area de superficie se expone, la razón de evaporación aumenta, pero al exponer el agua al viento conlleva otro problema, este es, que el agua es soplada dando como resultado pérdida de agua; para reducir esta pérdida de agua se diseñaron las torres de enfriamiento.

4.2 Clases de Torres.

Los componentes básicos son los mismos en todas las torres de enfriamiento, pero el arreglo difiere en diseños de flujo en contra corriente y flujo cruzado.

Los términos de flujo cruzado y flujo en contra corriente se usan

para describir la dirección en la cual el aire y el agua fluyen a través de la torre. En un diseño en contra corriente, el aire y el agua fluyen en la misma dirección pero en sentidos diferentes, el agua fluye hacia abajo por gravedad a través de la torre, y el aire sube a través del agua debido a la diferencia de densidades que tiene el aire a su paso por la torre.

El funcionamiento de una torre de enfriamiento de flujo en contra corriente es básicamente el siguiente; debido a que el agua caliente desciende, éste va perdiendo calor a través de su recorrido por lo que en la parte más baja el agua se encuentra relativamente más fría, al introducirse el aire seco en la parte más baja - de la torre facilita la evaporación de ésta, debido a que el aire seco posee una temperatura de bulbo húmedo menor que el aire húmedo, conforme el aire va ascendiendo su temperatura de bulbo húmedo va aumentando, y se encuentra con agua más caliente, - la cual posee más facilidad para evaporarse que el agua fría, esta combinación de agua caliente con aire de mayor temperatura de bulbo húmedo y agua fría con aire seco, es una de las características importantes de las torres de enfriamiento de flujo en contra corriente, lo cual las hace bastante eficientes.

En el caso de una torre de enfriamiento de flujo cruzado el agua caliente cae de la parte de arriba de la torre hacia abajo, de la misma forma que lo hace el diseño en contra corriente, pero el aire se mueve horizontalmente a través del agua que cae hacia abajo. En este diseño, el aire seco que entra en el fondo de la torre se encuentra únicamente con el agua más fría que ya ha descendido, al igual que en la parte superior el aire seco posee la

misma temperatura de bulbo húmedo, la cual no produce una mayor transferencia de calor, con lo que este diseño de torre es menos eficiente que una torre de flujo en contra corriente.

Estos diseños de torres se pueden observar en los anexos 1 y 2 respectivamente.

4.3 Partes de la Torre de Enfriamiento.

Como básicamente en una torre de enfriamiento existe transferencia de calor por evaporación, que es calor latente y un cambio de temperatura en la sustancia, esto es transferencia de calor sensible, se logra realizar eficientemente puesto que el agua que se deja caer debe de ser esparcida en toda el área de la torre, esto se logra realizar con los depósitos de distribución, por donde el agua se distribuye por la torre, en estos canales de distribución se tienen unas boquillas de rociado de baja presión, esta boquilla facilita la distribución del agua.

El agua al salir de la boquilla de rociado debe de ser esparcido en una área mayor, para facilitar el enfriamiento del agua, esto se logra con tableros de redistribución. Existen varios tipos de tableros de redistribución, pero la eficiencia de cada uno de ellos es bastante aceptable, la función principal es la de formar pequeñas gotas de agua para mayor rapidez de enfriamiento del agua.

A continuación se muestra un esquema de las partes de una torre de enfriamiento, en tres diferentes tipos de torre:

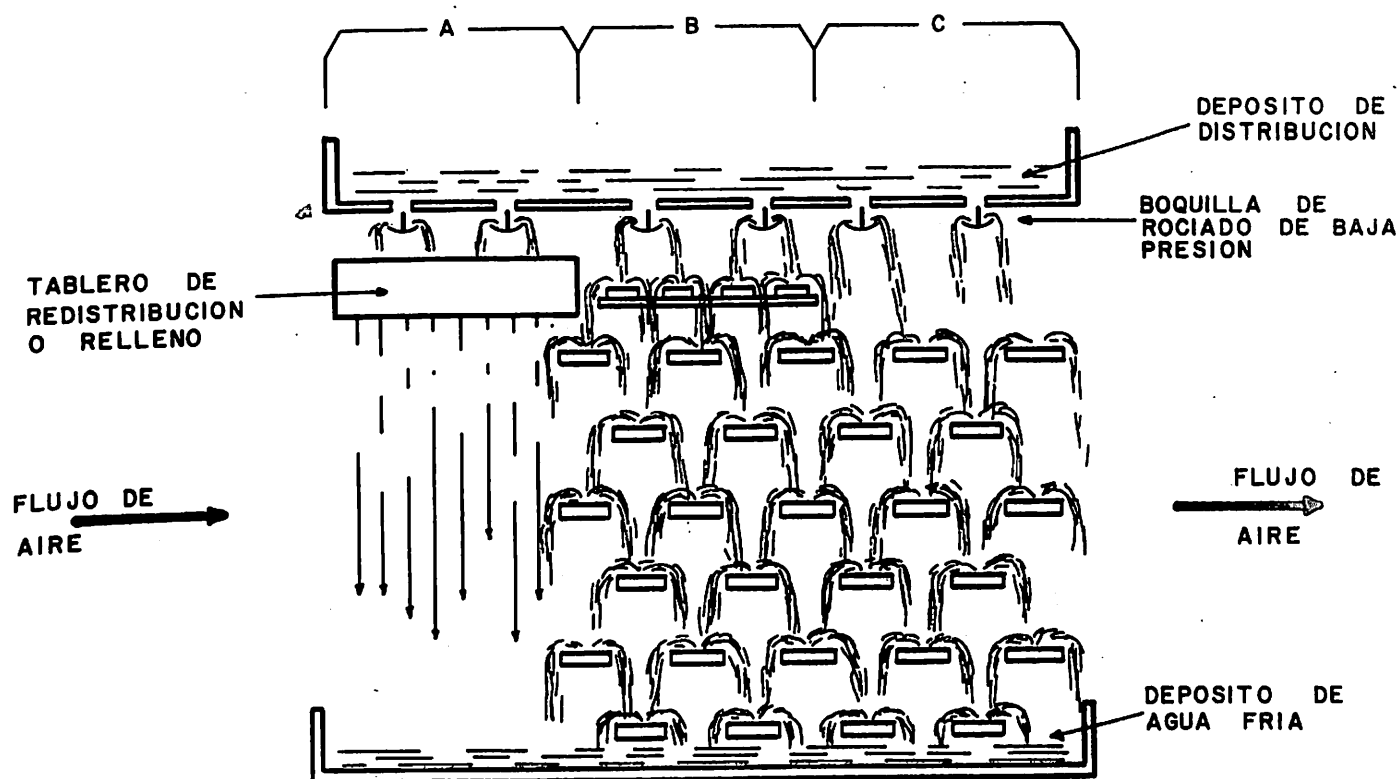


FIG. 4.2

El tablero de redistribución en las areas A y B causa que las corrientes de sólidos se rompan en gotas pequeñas del tamaño correcto poco tiempo después que dejan el depósito de distribución. No existe tablero de redistribución en el tipo C de torre de enfriamiento, no se expone tanta área de superficie debido a que el

agua cae hasta dos pies de alto antes de salpicar en pequeñas gotas.

Los tableros de redistribución son de varios tipos, mencionaré aquí tres tipos de estos, y su funcionamiento:

4.3.1 Barras convencionales de Rociado.

Después de que el agua caliente llega a la distribución ya sea que llegue a tuberías ó a boquillas de rociado, al salir el agua por éstas, las gotas de agua saltan de tablilla en tablilla en trayectoria vertical hacia el depósito de agua fría.

Cuando el aire de enfriamiento asciende verticalmente en contra flujo ó se mueve horizontalmente en flujo cruzado, la parte exterior de la gota de agua es enfriada, por esa razón mientras mayor cantidad de gotas se forman, el enfriamiento será mayor.

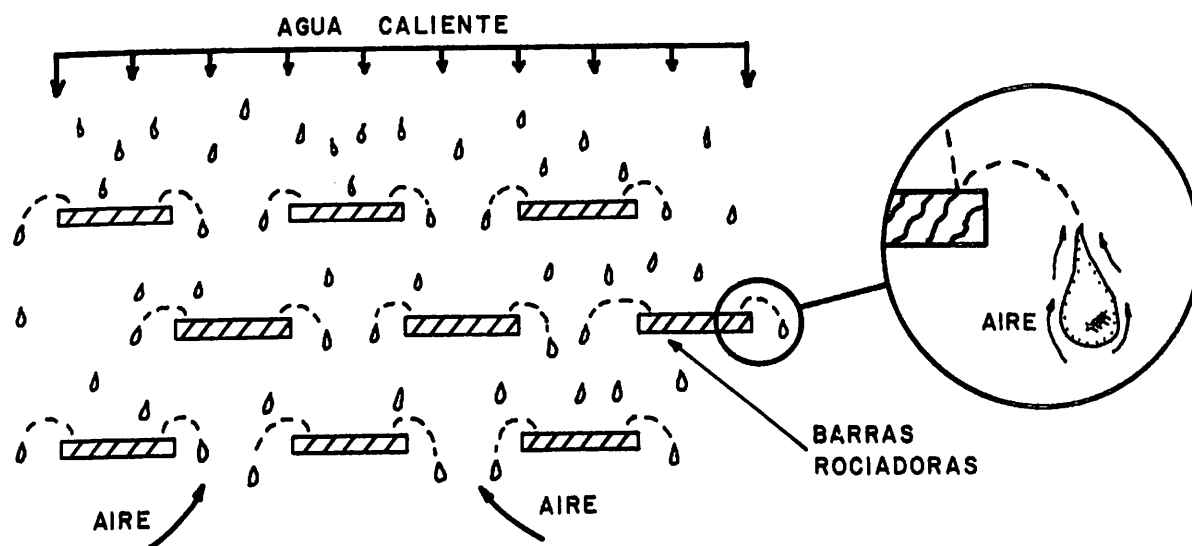


FIG. 4.3

4.3.2 Celdas de Llenado.

Al salir el agua caliente de las boquillas de rociado, y el agua en forma de gotas hace contacto con el tablero de redistribución de este tipo, el agua al entrar se adhiere a las paredes de la celda, en forma de una capa delgada de agua. Al entrar el aire de enfriamiento en flujo cruzado ó al subir el aire en contra flujo se obtiene un grado de enfriamiento más rápido.

Este tipo de celda, también es llamado película de llenado.

Se ha visto que la celda de llenado en cualquier lugar es 50% a 75% más eficiente que el sistema de barras de rociado, de 24" pulgadas a 48" pulgadas de profundidad en la trayectoria puede hacer el mismo trabajo que seis tablillas de 20 pies, hechos de madera, esto demuestra la mayor eficiencia y economía de las celdas de llenado.

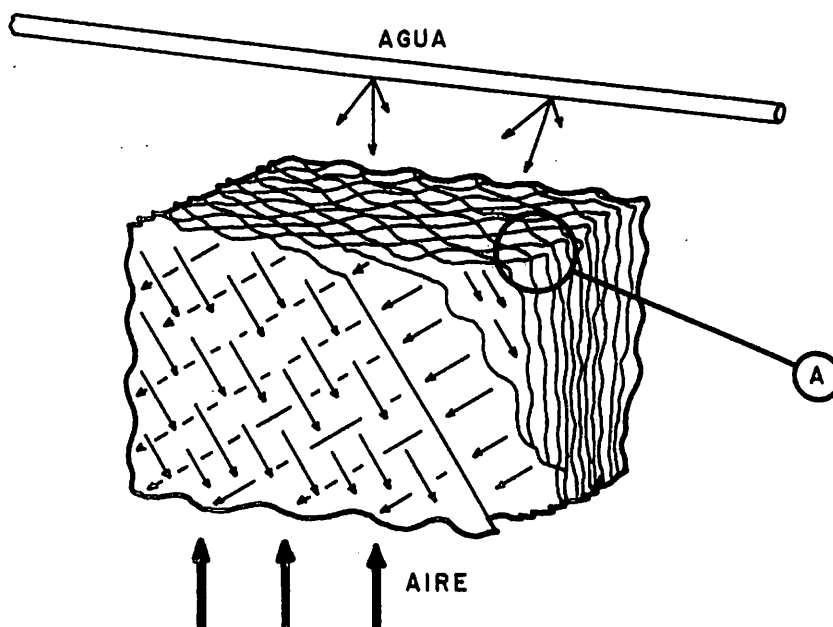


FIG. 4.4

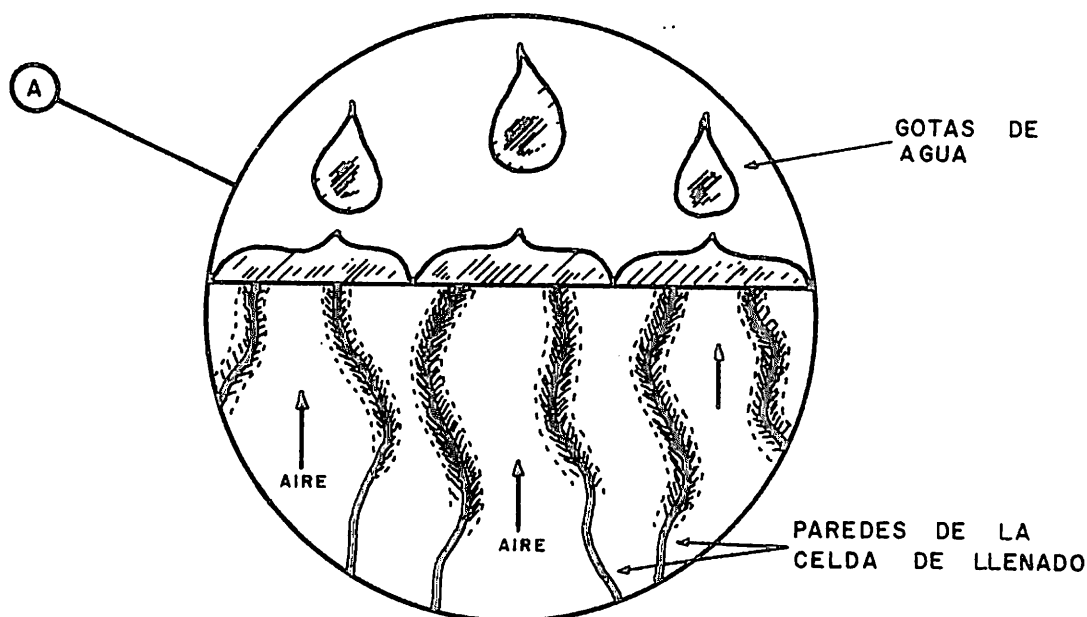


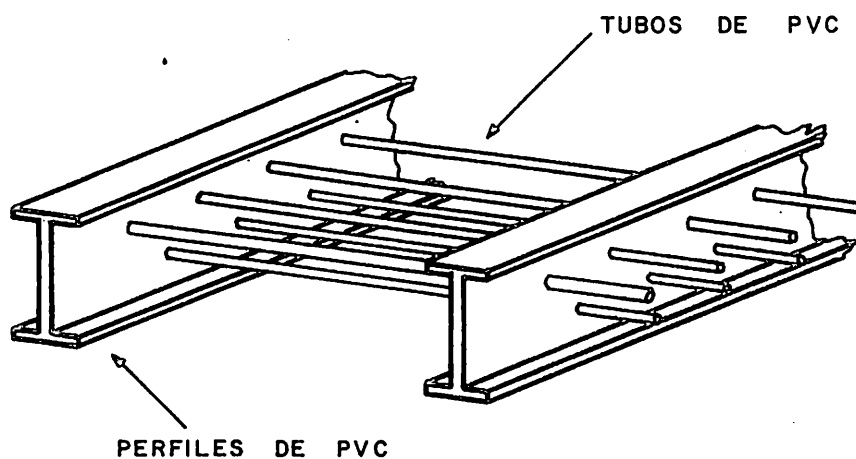
FIG. 4.5

4.3.3 Reja de Llenado.

El relleno de una torre también consiste en rejillas removibles que se puedan colocar en un orden para poder quebrar la caída de agua en un efecto de cascada.

Esta caída del agua en cascada incrementa el tiempo necesario para que la gota de agua pase a través de la torre y por lo tanto se incrementa la superficie de contacto - del agua con el aire que corre en contra flujo.

Este consiste en perfiles de PVC que poseen agujeros donde se introducen tubos de PVC, se colocan dos filas de tubos de diámetro pequeño, en forma cruzada para que toda la caída de agua se transforme en una cascada de gotas, como se muestra en la figura 4.6



REJAS DE LLENADO

FIG. 4.6

4.3.4 Eliminadores de Gota.

El aire, posee una gran importancia en el funcionamiento de una torre de enfriamiento, puesto que la evaporación no será eficiente si el aire no se distribuye adecuadamente; el paso del flujo y el volumen del aire que entra a la torre se controla por las rendijas de entrada de aire. El aire al entrar al área de relleno de la torre se satura y fluye hacia afuera de la torre, mientras el agua fría cae hacia abajo al fondo de la torre.

El aire saturado que sube, posee algunas gotas de agua que arrastra, comunmente a estas gotas de agua se les llama -brisa, para evitar que estas gotas de agua salgan de la -

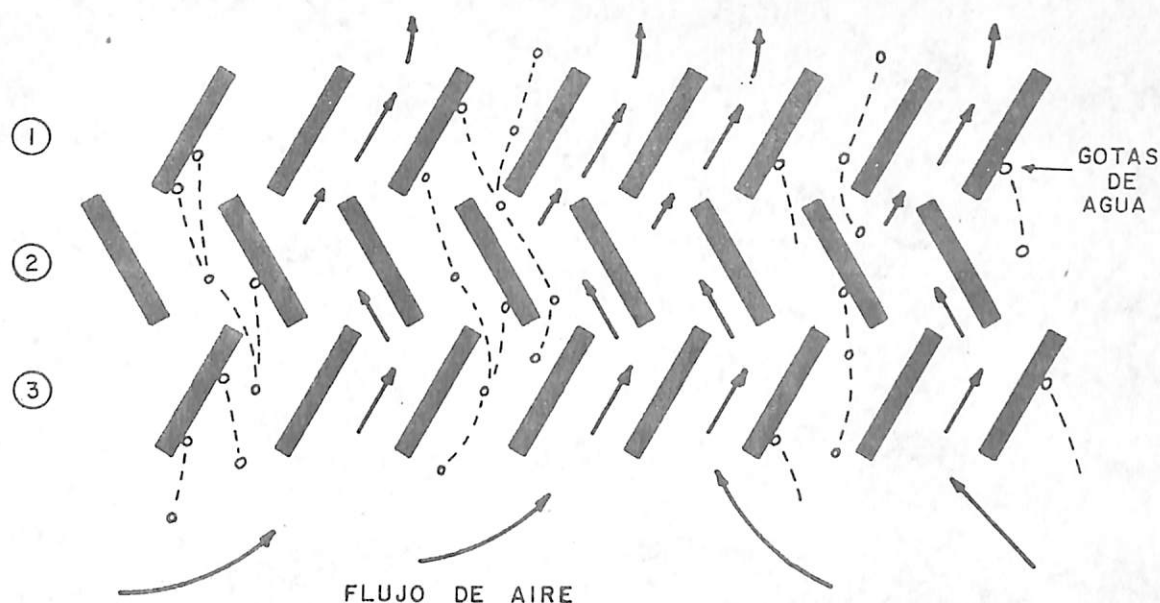
torre por los ventiladores se instalan los eliminadores de gota, estos en una torre de contra flujo se instalan entre el sistema de distribución de agua y el ventilador, mientras que en la torre de flujo cruzado los eliminadores de gota están colocados entre el relleno y la cámara central.

La resistencia del flujo de aire a través de los eliminadores produce una presión uniforme en el espacio entre los eliminadores de gota y los ventiladores. Esta presión equilibrada tiende a proveer un flujo uniforme a través de la cámara de llenado de la torre.

Los eliminadores son normalmente clasificados en: paso simple, dos pasos, tres pasos y más, dependiendo del número de cambios del flujo de aire.

Generalmente, muchos pasos aumenta la presión de la gota. Algunos eliminadores consisten en tablillas colocadas en armazones que proveen una configuración deseada. El diseño de tablillas convencionales de madera en los eliminadores de gota permiten el paso del aire pero, previenen la entrada de gotas de agua para ser descargadas hacia afuera por los ventiladores.

Muchos eliminadores de este tipo son de tres pasos básicos, que pueden refrenar una acumulación de agua, a velocidades de 450 pies por minuto, este tipo se muestra en la figura siguiente:



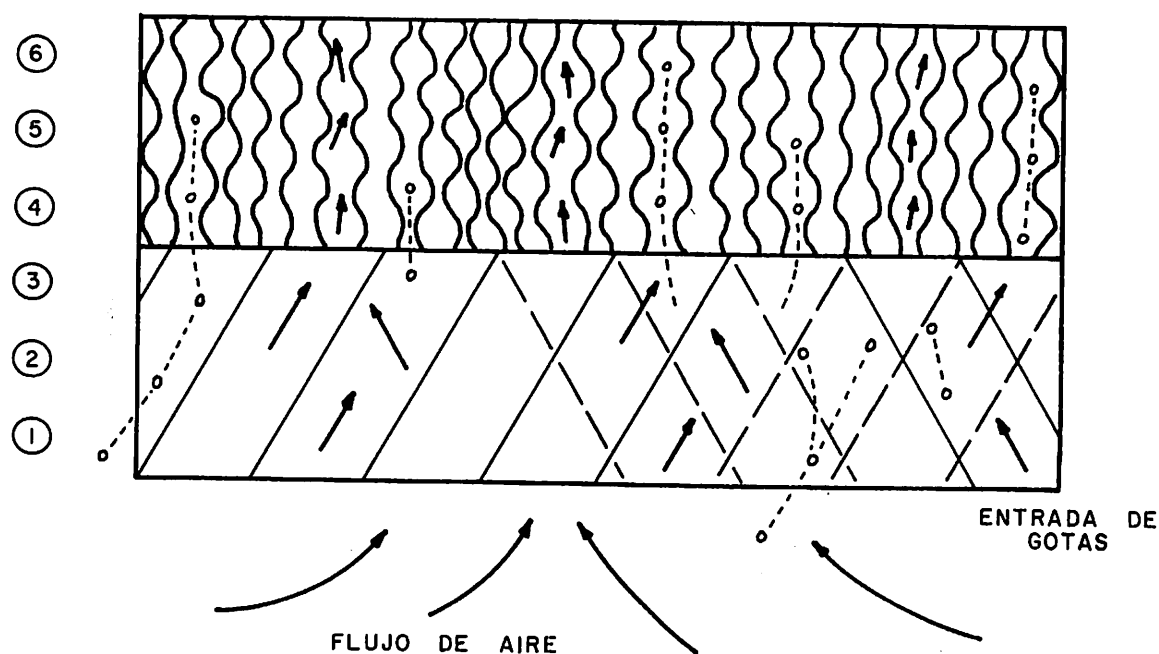
ELIMINADORES TIPO TABLILLA DE TRES PASOS

FIG. 4.7

Existen otros tipos de eliminadores de gota que no son de tablillas de madera, estos son diseños más modernos, fabricados de un material celular, estos son bien efectivos ya que pueden cambiar la dirección del flujo de aire, cuando éste posee velocidades altas.

Estos tipos de eliminadores de gota pueden ser utilizados en cualquier tipo de torre, ya sea de flujo cruzado ó contra flujo, colocados estos en posición vertical u horizontal. Estos consisten en planchas de material celular de 4 pulgadas de espesor que pueden tener seis pasos parejos para efectuar el cambio de dirección del flujo de aire.

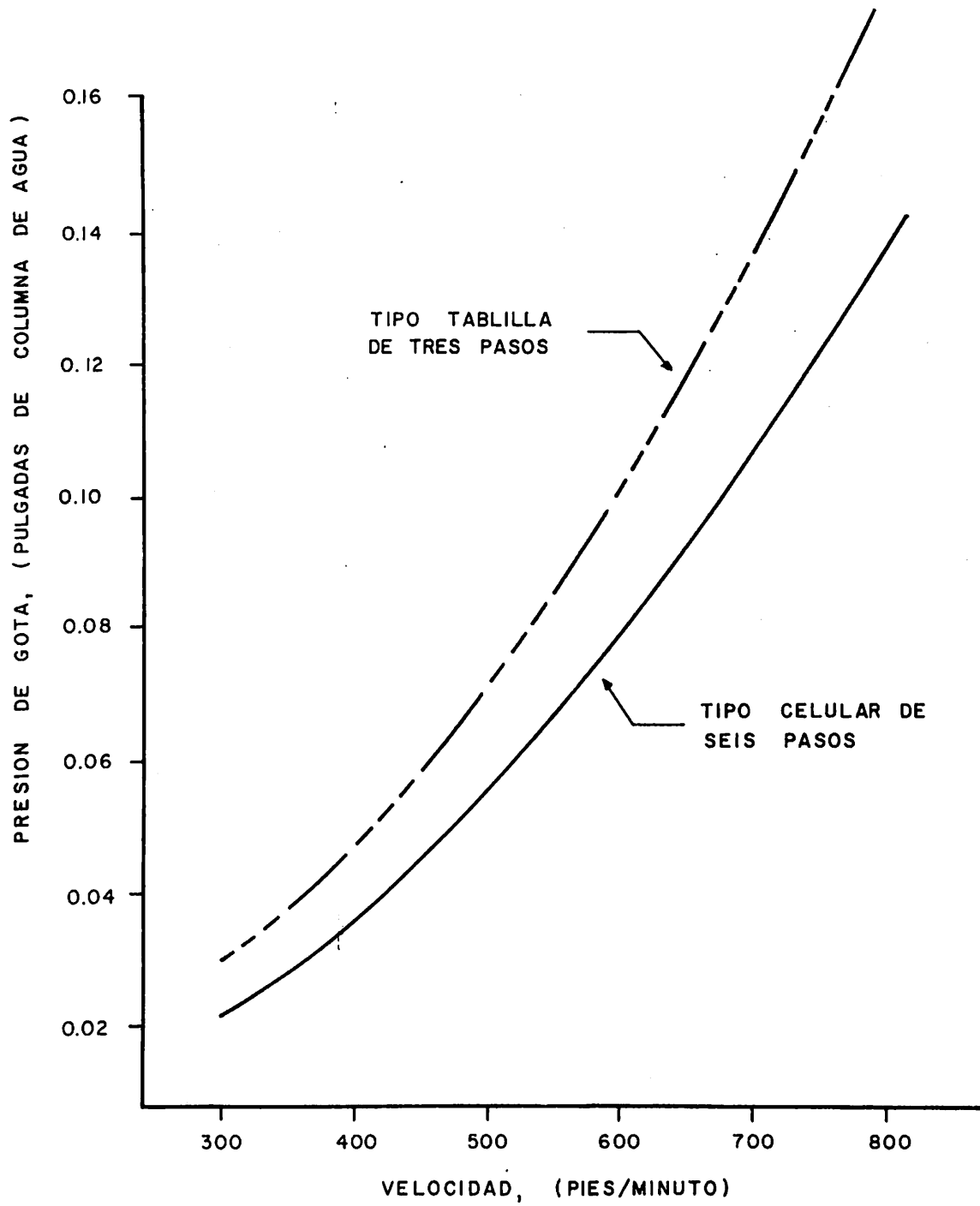
Los eliminadores de gota de material celular pueden ser contruídos para trabajar con eficiencia para velocidades hasta de 950 pies por minuto, este tipo se muestra en la figura siguiente:



ELIMINADORES DE GOTA CELULAR DE SEIS PASOS

FIG. 4.8

A continuación muestro una gráfica comparativa entre los eliminadores de gota celular y de tablilla convencional y se observa la mayor eficiencia del tipo celular de sus pasos.



GRAFICA 4.1

4.3.5 Estructura de la Torre.

El diseño correcto de la estructura de la armazón de una torre de enfriamiento, es una tarea difícil. Esto no es sólo necesario para una unidad con estructura estable resultante, sino que también el diseño debe ser compatible con los requerimientos de montaje técnicos, aerodinámicos y económicos. La estructura de la torre de enfriamiento debe de ser capaz de soportar no sólo el peso de los componentes básicos tal como el equipo mecánico, rejillas de llenado, y la cubierta de la torre, pero también el peso del agua de circulación, carga del viento y de posibles temblores. Esto se debe cumplir todo el tiempo para tener una operación libre de molestias, cuando se tiene severas condiciones de trabajo. La forma externa debe de ser conforme a los requerimientos del flujo de agua y aire. La mínima restricción del flujo de aire es particularmente muy importante. El diseño debe de ser también compatible con la fabricación de las partes pre-fabricadas para lograr un montaje económico.

La fabricación de las torres de enfriamiento debe de cumplir estos objetivos en varias formas. Un buen diseño de estructura de torre de enfriamiento debe tomar en cuenta que:

- A. La estructura debe ser diseñada para resistir unas 30 libras por pie cuadrado (lb./pie^2), ó 30 lbs./pie^2 de carga producida por el viento, en todas las superficies verticales. Un cierto aumento de las cargas por el viento puede ser necesarios.

- B. Las conexiones de la armazón deben de sujetarse con tornillos a la torre.
- C. En estructuras de madera, cerámica ó vidrio reforzado con plástico, las conecciones deben hacerse donde son necesarias para transmitir la carga de diseño a cualquier junta.

Las maderas largas ó medianas y columnas de acero en torres son normalmente espaciados en 4 pies por 8 pies ó 6 pies por 6 pies de centro; con el lateral, unidos todos aproximadamente de 6 pies ú 8 pies para torres de madera y a una gran distancia para torres de acero.

En adición a la condición total de estabilidad de la estructura, la transmisión de carga diagonal del viento o terremoto en compresión o tensión y compresión depende del tipo de junta usada en las columnas y en el anclaje.

Los requerimientos de diseño deben ser definidos, el ingeniero debe determinar y clasificar el tipo de carga impuesta a la estructura.

Las cargas se clasifican según se les considera así:

1. Carga muerta.
2. Carga de operación.
3. Carga viva.
4. Carga producida por el viento.
5. Cargas sísmicas.

Eje Transversal: Plano paralelo al final de la pared.

Eje Longitudinal: Paralelo a la cara de la lumbrera.

Columnas: Miembro presente de la carga vertical.

Viga: Asegurar la diagonal a condición de una estabilidad lateral, miembro presente de la carga horizontal.

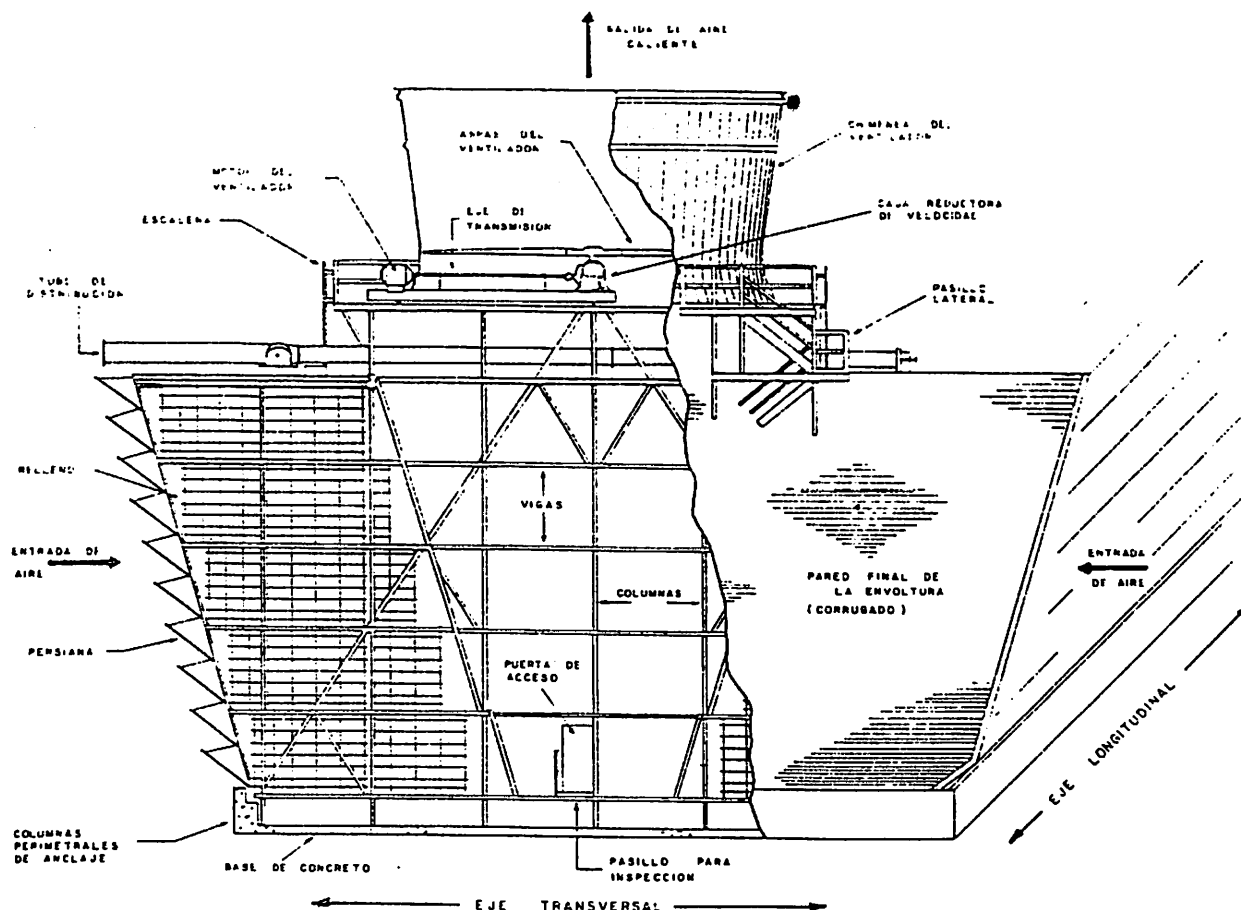


FIG. 4.9

Carga Muerta:

Es el peso de todos los componentes, estructurales y operacionales. El peso del material de la estructura, material de llenado, soportes, eliminadores de gota, equipo mecánico, ventiladores, tubería de distribución de agua.

La carga muerta es considerada como términos largos de carga.

Carga de Operación:

Es el peso del agua en la tubería del agua fría y agua caliente en

el depósito, agua suspendida en el material de relleno, en los eliminadores de gota, empuje del ventilador axial y fuerzas de desbalance del ventilador.

Carga Viva:

Peso del personal de operación o mantenimiento, que realiza sus operaciones sobre la torre.

Carga del Viento:

Determinada por el gradiente del peso y estos son calculados sobre áreas efectivas expuestas al viento.

La fuerza del viento llevada en cualquier punto es simple, es la presión del viento ejercida sobre una área determinada en el tiempo.

Carga Sísmica:

La variación de la carga es debido a la zona sísmica. Se deben de basar los cálculos de acuerdo a la historia de la zona.

4.4 Materiales usados en la construcción de las cubiertas de una Torre de Enfriamiento.

Cubiertas de la Torre de Enfriamiento:

Las funciones primarias de la cubierta de la torre son las de mantener el agua adentro de la unidad y prevenir que el aire haga una derivación del sistema de diseño de la entrada del mismo. También contribuye en gran parte en darle una buena apariencia. La cubierta, generalmente, no cumple una función estructural en la construcción de las torres convencionales. Todo lo contrario ocurre en las torres tipo paquete donde la cubierta es parte del sistema estructural. Es práctica corriente que la mayoría de los constructores exijan las torres con una cubierta de

pared sencilla, esto se debe primeramente a la disponibilidad de materiales que sean económicos y de mejor calidad para las técnicas de construcción y diseño.

El material más popular usado en las cubiertas de torres son táblas de cemento - asbesto. Este es de una inherente calidad, de fuerza, resistente a la corrosión, de buen aspecto, bajo - costo, es incombustible, y es un material de rápida disponibilidad. Este es usado casi en todos los campos de erección de torres.

Otro material que ha ganado más aceptación general por el bajo costo es el vidrio reforzado con plástico. Este está hecho con la misma calidad deseable que el cemento-asbesto en tablas, con la excepción de no ser incombustible, pero con la ventaja de poseer poco peso. La cubierta envolvente de plástico puede ser fabricada para retardar lo combustible, usando una resina especial.

Acero liviano, es usado como material en la cubierta envolvente de algunas torres tipo paquete.

4.5 Cilindros del Ventilador:

La función básica de un cilindro del ventilador es proveer un recinto alrededor del ventilador el cual ayuda a aprovechar el funcionamiento del ventilador. Estos también sirven para que el ventilador los utilice como un medio para descargar los vapores.

Los cilindros deben de ser contruidos de materiales que resistan la corrosión atmosférica y al ser instalados deben de ser fuertes a las cargas de vibración, por las que son producidas por la pulsación del flujo de aire.

El funcionamiento del ventilador es muy sensitivo en la entrada del flujo de aire, éste debe de tener los extremos de las -
aspas espacio libre, para su buen funcionamiento, esto es una
función del cilindro del ventilador, que satisface estos requereri
mientos. En el caso de que se suprima el flujo de aire del
ventilador la eficiencia disminuye. La supresión del flujo de
aire va acompañada de que la configuración específica de la en-
trada del ventilador debe cambiar.

Teóricamente, el contorno de una curva logarítmica es requerida,
prácticamente una elipse aproximada es satisfactoria. La e-
liminación de posibles obstrucciones estructurales en la entra-
da del ventilador podría así mismo ayudar al mejoramiento del
funcionamiento del ventilador.

El espacio entre el final de las aspas del ventilador y el ci-
lindro es de suma importancia, la pérdida del espacio entre as-
pas y el cilindro, aumenta la eficiencia del ventilador y dismini
nuye el nivel de fluído. Los materiales de construcción de -
los cilindros, obtenidos son llevados a consideración al control
de acabado de estos. Madera, acero y plástico son comunmente
usados. Plástico, porque está formado en adición con otros de
considerables características, éste es uno de los mejores mate-
riales para estas aplicaciones, aunque generalmente éste es más
costoso. Los cilindros son formados sobre moldes con control -
de calidad en el contorno y en las dimensiones. Cuando el dise-
ño es exacto, el resultado es un cilindro del ventilador que se
aproxima al ideal para el punto de parada del aire en movimiento.
Buenos cilindros pueden ser también contruidos de madera y ace-

-ro. El diseño del ventilador y del cilindro del ventilador están estrechamente relacionados y el control del nivel del ruido en la operación del ventilador. El ruido aereodinámico es el resultado de la turbulencia de la corriente de aire, esta es la fuente principal de ruido en una unidad de ventilación. Un diseño correcto, con una hélice y una buena instalación del ventilador es una condición de turbulencia mínima y mínimo ruido. Los cilindros del ventilador son de una gran altura y son conocidos como chimeneas del ventilador. Un tipo de extensión es en la forma de un difusor que proporciona un incremento gradual en la sección transversal de la estructura de salida, con la consecuencia de decrecimiento en la velocidad del agua. Esto se puede ver en la Figura 4.10 , en esta construcción se crea turbulencia en la entrada del aire a través del cilindro. Esta resistencia crea un adicional incremento en la presión estática y causa una pérdida en el volumen de aire. En la Figura 4.11 se observa que no se tiene problema en la entrada de aire al ventilador, la resistencia de la presión estática es eliminada, y la velocidad del vapor de agua es incrementada.

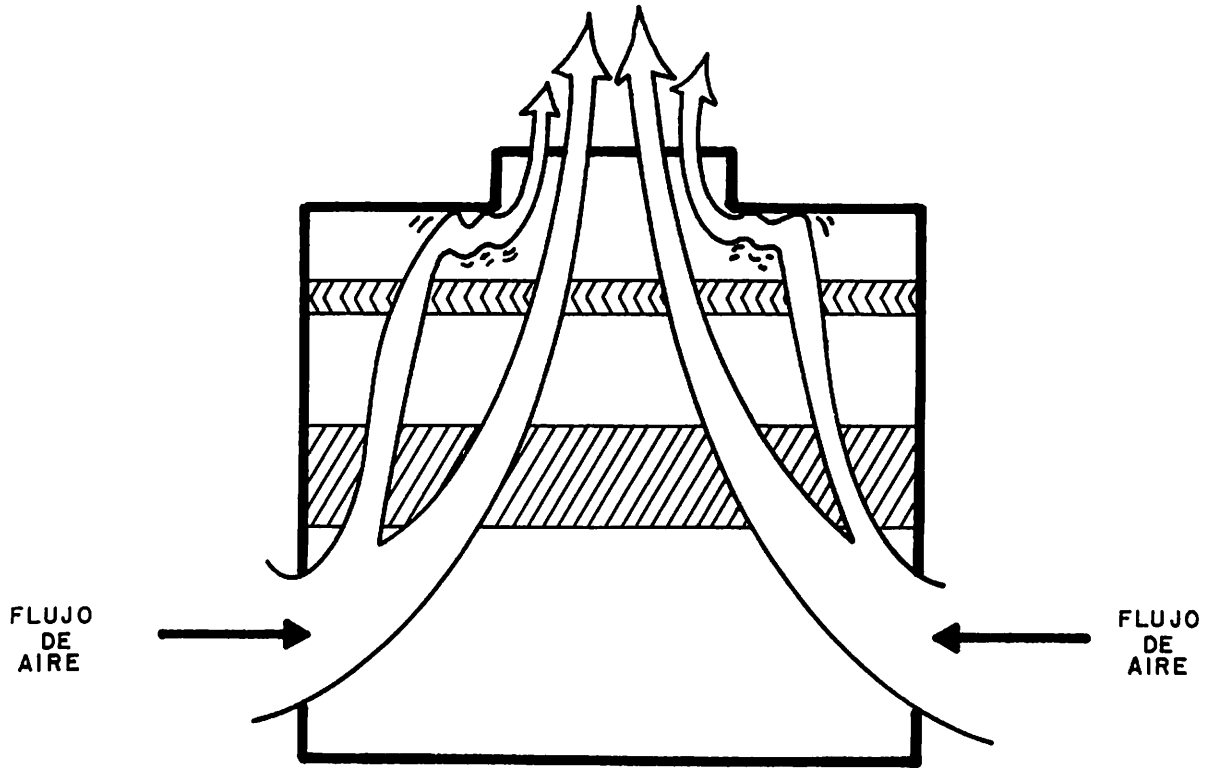


FIGURA 4.10

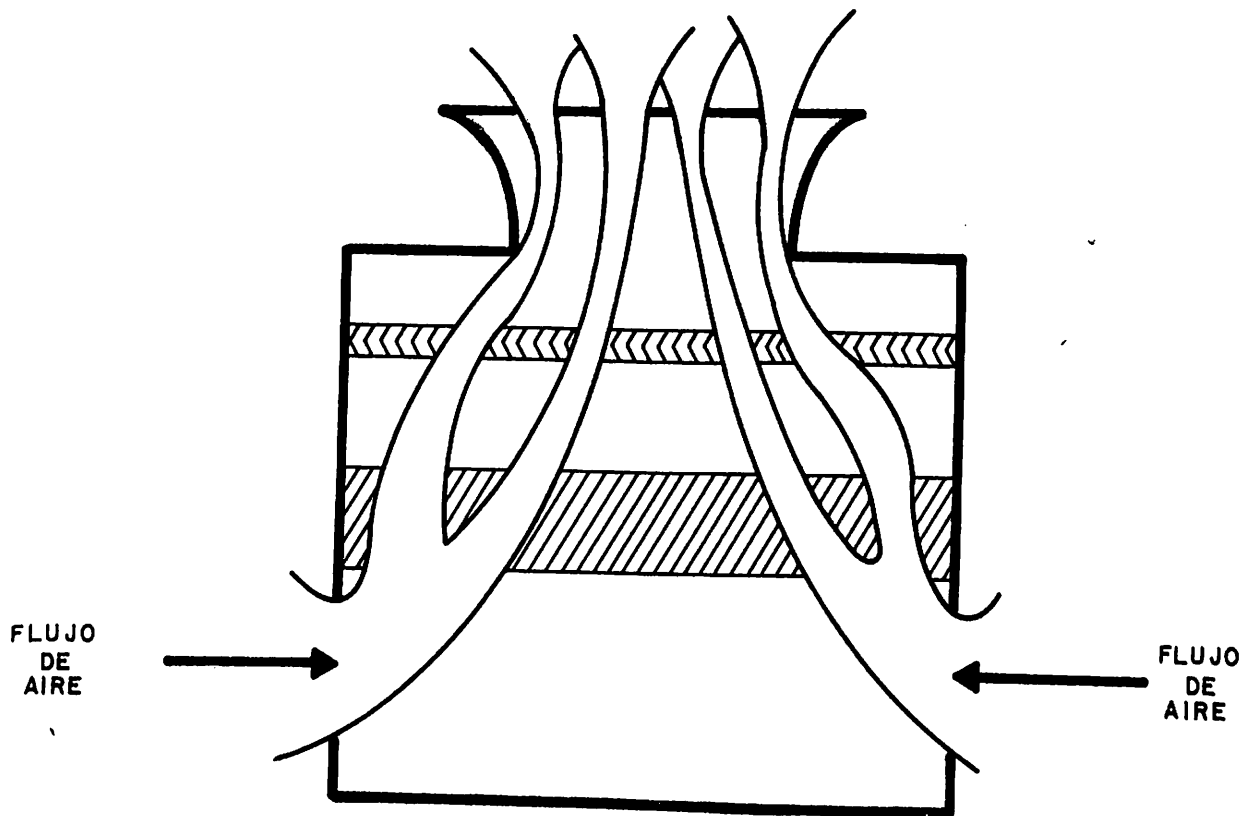


FIGURA 4.11

Cilindro del ventilador en forma de venturi, que incrementa la velocidad del aire de salida, reduce la presión estática, y crea aproximadamente un 7% de movimiento adicional al aire sin necesidad de incrementar la potencia al ventilador.

4.6 Tipos de Torres de Enfriamiento.

Todas las torres de enfriamiento están hechos de componentes básicos que controlan el flujo del aire y el agua a través de la torre y las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo a la forma en la cual el agua y el aire se encuentran dentro de la torre.

Pero las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo a la forma en la cual el aire se induce dentro y se remueve fuera de la torre.

4.6.1 Torres de Tipo Natural.

4.6.1.1 Tipo Atmosférico.

Una torre atmosférica se parece más a un sistema de estanque ya que depende de la velocidad del viento y la humedad relativa del aire para enfriar el agua fría. Algo del viento que entra en la torre es llevado hacia arriba, pero la mayor parte del viento sopla recto a través de la torre. El aire entra a través de aberturas en los lados de rendijas pasa horizontalmente sobre los listones de pulverización de agua, y salen a través de la pared de rendijas opuestas.

El flujo de aire a través de la torre es interrumpido y cambiado por las rendijas de entrada de aire y los listones de pulverización de agua para reponer el relleno, cualquier aire caliente y gotas de agua que salen a través de la parte superior de la torre deben pasar a través de los eliminadores de brisa o de gota.

Algunas torres atmosféricas tienen rendijas ajustables para entrada de aire y eliminadores de gota para dar un mayor control sobre el flujo de aire. Para obtener mayor cantidad de evaporación en este tipo de torre, el aire debe pasar rápidamente a través de la torre.

Una torre atmosférica generalmente está colocada con su pared de rendijas más grandes expuesta al viento para mayor flujo de aire. La torre debe construirse de manera que sea relativamente estrecha en la dirección del flujo de aire. El paso del aire es corto y la resistencia al flujo de aire es baja, debido a que una torre atmosférica depende de las condiciones atmosféricas existentes y requiere un sitio grande y abierto, éste no es muy eficiente. Este tipo de torre puede observarse en el anexo No.2.

4.6.1.2 Tipo Hiperbólica.

Estas torres eran construídas de madera, seguidamente se construyeron de madera y acero, actual-

-mente las torres de tiro natural son construídas con concreto reforzado. La fama de las torres de tiro natural ha cambiado conforme los años; al principio las torres eran cilíndricas, posteriormente se usó un diseño de dos conos re cortados. La forma corriente es hiperbólica, la cual dá a la torre una mayor fuerza y una ma yor habilidad para que fluya el aire a través de la armazón de la torre. Menos material es reque rido para la construcción porque menos volumen total de la torre es rodeada en los diseños nuevos de torres.

Las torres de tiro natural no usan ventiladores para mover el aire, el flujo de aire a través de la torre se lleva a cabo por la diferencia de densidad del aire, entre el aire de la atmósfera y la que entra, la cual es calentada, que enfría el agua. El calor causa que los gases calientes fluyan hacia arriba a través de la chimenea creando un tiro. Como todas las torres de enfriamiento, una torre hiperbólica transfiere algo de calor en el agua, directamente al aire.

La temperatura del aire dentro de la chimenea es siempre mayor que la temperatura atmosférica de afuera, esta diferencia en temperatura y densidad causa un constante tiro de aire.

Los dos flujos básicos son utilizados en las torres hiperbólicas, las hiperbólicas de contra-

-flujo y las de flujo cruzado.

Las torres de contra flujo proporcionan una mayor eficiencia para medios de transferencia de calor, aunque la mejor uniformidad en la distribución del agua y aire se lleva a cabo en la torre de flujo cruzado. En el diseño de flujo cruzado, el flujo de aire es normal al movimiento del agua y usualmente más relleno se requiere en las torres de contra flujo, por lo tanto las torres de flujo cruzado poseen una menor presión de gota.

En una torre hiperbólica de contra flujo el sistema de distribución de agua, el material de relleno y los eliminadores de gota se localizan dentro de la torre, mientras que en un diseño de flujo cruzado están afuera de la torre.

Una torre hiperbólica puede ser tan alta como 500 pies; debido a su tamaño, pueden manejar grandes capacidades de agua.

Estos tipos de torres pueden observarse en el anexo No.3.

4.6.2 Torres de Tiro Forzado.

En contraste con las torres de tiro natural, las torres de enfriamiento de tiro Mecánico utilizan ventiladores para ayudar a mover el aire. El uso de ventiladores aligera el proceso de enfriamiento e incrementa la eficiencia de la torre permitiendo que un mayor volumen de aire fluya sobre el agua que cae.

El mayor volumen de aire que se obtiene en una torre de tiro mecánico, significa mejor enfriamiento y mejor control sobre las condiciones de la torre.

Las torres de tiro forzado tienen instalados los ventiladores a un costado de la torre. El aire es empujado o forzado hacia arriba a través de las barras convencionales de rociado, los eliminadores de gota, por los ventiladores que están localizados a un lado de la torre.

La construcción interna de una torre de tiro forzado es similar a la de una torre atmosférica, con la diferencia que los lados de la estructura de la torre están cubiertos.

Los ventiladores que se usan en una torre de tiro forzado producen un volumen grande de aire con una velocidad de salida baja.

Esta velocidad de salida baja significa que el aire no será empujado hacia arriba de la torre. El aire cargado de humedad puede ser arrastrado de regreso a la torre y recircularlo a través de ella. Esta recirculación puede reducir la velocidad de evaporación de agua y por lo tanto también la eficiencia de la torre puede ser reducida tanto como un 20%, es por esta razón que este tipo de torre no es muy usado actualmente.

En el Anexo 4 se observa una torre de este tipo.

4.6.3 Torres de Tiro Inducido.

Cuando los ventiladores de la torre de tiro mecánico están localizados arriba de la estructura de la torre y el aire se hala o induce a través de la torre, se clasifica

la torre, como una torre de tiro inducido.

En este tipo de torre la recirculación de aire es de poca importancia, ya que los ventiladores montados arriba descargan bien el aire calentado sobre la corriente de aire que entra.

El uso de las torres de tiro mecánico, particularmente el de tipo inducido, varía desde sistemas comerciales de aire acondicionado pequeños hasta unidades multicelulares en plantas de enfriamiento. Las torres de tiro inducido pueden ser en contra flujo y de flujo cruzado. Ambos tipos de torres poseen rendijas móviles para regular la entrada de aire, y el volumen de aire que fluye a través de las torres se controla con la velocidad del ventilador y la cantidad de abertura del aire a los lados de la torre. La mayoría de partes son las mismas para todos los tipos de torres de enfriamiento evaporativo. Los materiales utilizados en la construcción de la torre deben de ser capaces de soportar los efectos del contacto constante de agua y aire, fluctuaciones de temperatura y ataque por impurezas destructivas que lleva el agua.

En el Anexo 6 se puede observar las torres de tiro inducido de flujo cruzado y de contra flujo.

5. AGUA DE ENFRIAMIENTO.

5.1 Problemas del Agua de Enfriamiento.

Debido a que el agua de recuperación que se usa en las torres de enfriamiento, generalmente proviene de recursos naturales tales como ríos, lagos y pozos. Cuando el agua llega a la planta para uso de enfriamiento, contiene demasiadas impurezas. Debido a que el agua puede disolver casi todo lo que se pone en contacto con ella, se considera que el agua es un buen solvente. Además de que el agua puede disolver sólidos, puede absorber gases. El agua también colecciona pequeñas partículas de sólidos suspendidos como partículas de arena, óxido y otros sólidos que quedan disueltos en el agua.

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

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

A medida que el agua y el aire se ponen en contacto en el área de relleno o sea dentro de la torre, las impurezas en el aire son absorbidos por el agua, por lo tanto aumenta el nivel de sólidos totales. A medida que el agua se evapora en la torre de enfriamiento, los sólidos suspendidos y disueltos se quedan reza-

-gados. Después de la evaporación parcial, los sólidos tienden a concentrarse en el agua remanente.

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

5.2 Tipos y Efectos de las Impurezas.

5.2.1. Incrustación.

Las diferentes impurezas tienen diferentes efectos en el sistema y en el equipo. Cuando la concentración de los sólidos disueltos se hace muy alta, se saldrán de solución o se precipitarán. Los sólidos forman incrustaciones en las superficies del equipo de intercambio de calor. Incrustación es el nombre que se le da a los depósitos formados en las superficies de transferencia de calor por sólidos normalmente en solución. Hay dos clases principales de materiales que forman incrustación que pueden causar problemas en el sistema del agua de enfriamiento.

1. Estos incluyen algunos tipos de compuestos de calcio y sílice. Los compuestos de calcio y sílice están presentes en el agua de circulación y recuperación como sólidos disueltos.

Los compuestos de sílice y calcio tienen la propiedad inusual de transformarse en menos solubles a medida que la

temperatura del agua aumenta; esto quiere decir que cuando el agua se pone más caliente, puede contener menos compuestos de sílice y calcio que cuando está a menor temperatura.

Cuando el agua contiene sílice y calcio y se lleva a su punto de ebullición en un recipiente, la incrustación se forma en los lados y en el fondo del recipiente, esto mismo sucede cuando el agua de enfriamiento pasa a través de un intercambiador de calor. Los depósitos de incrustación formados en las paredes del tubo de un intercambiador de calor tiene un efecto aislante que reduce la transferencia de calor.

5.2.2. Ensuciamiento.

Los sólidos suspendidos en el agua de enfriamiento también pueden causar serios problemas al equipo utilizado.

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

Las partículas suspendidas son muy pequeñas y cada una está rodeada por una carga eléctrica negativa. Las negativas causan que las partículas se repelan una con otras y se resistan al asentamiento. Cuando el agua se pone en contacto con la superficie de un metal, el hierro en el me

-tal se va a la solución, creando una carga positiva en la superficie de transferencia de calor. Los sólidos suspendidos cargados negativamente son atraídos a las superficies cargadas positivamente, con el tiempo, las partículas se agrupan disminuyendo la transferencia de calor y ensuciando el intercambiador de calor y el equipo de la torre de enfriamiento.

5.2.3 Corrosión.

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

La corrosión ocurre cuando una corriente eléctrica fluye entre dos electrodos a través de una solución acondicionadora llamada electrolito, la corrosión fluye del ánodo al cátodo a través del electrolito; obsérvese la figura siguiente:

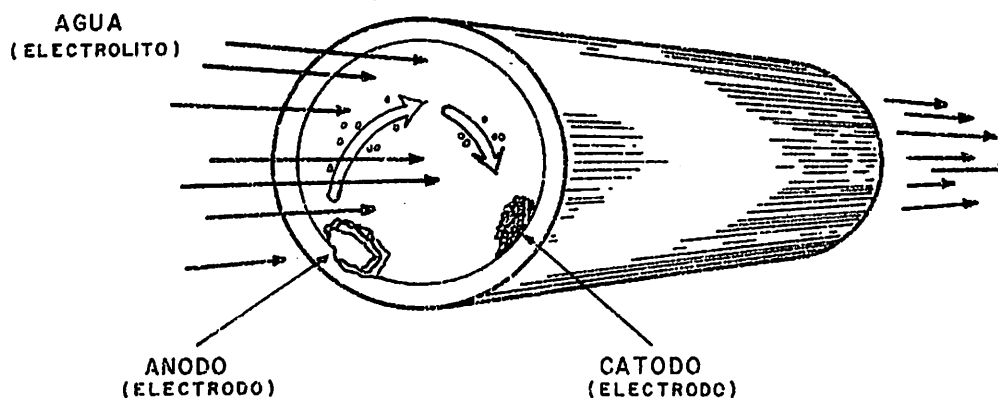


FIGURA 5.1

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

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

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

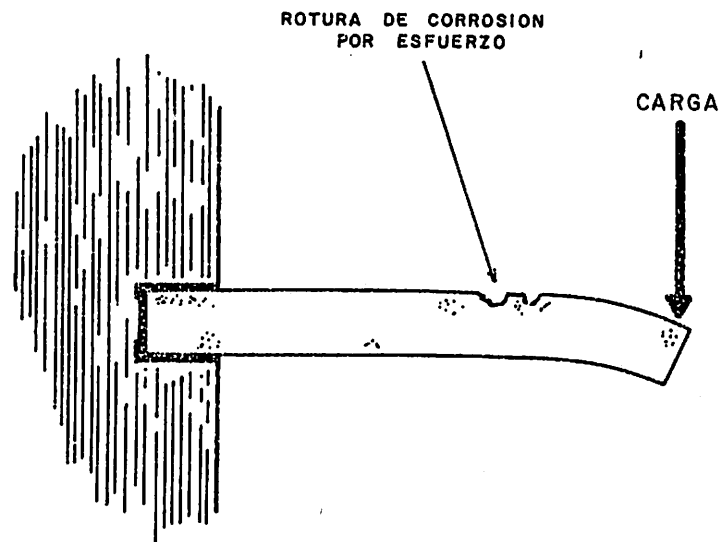


FIGURA 5.2

Las variaciones o diferencias en la concentración del electrolito pueden también causar corrosión en los metales.

5.2.4 Ataque Microbiológico.

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

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

En contraste con las algas, las bacterias son microorganismos unicelulares que viven principalmente en las áreas oscuras del sistema, como la puede ser la tubería del -

intercambiador de calor. La bacteria produce fango, - que es una masa orgánica pegajosa que se adhiere a casi todas las superficies en el sistema de enfriado. El fango atraparé otros microorganismos y otras partículas con los que se pone en contacto, dando como resultado un ensuciamiento biológico. Además de causar el ensuciamiento biológico, el fango causa corrosión, al crear variaciones en la superficie del metal y por lo tanto potenciales eléctricos diferentes.

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

5.3 Recuperación, Purga y Unidades de Medida.

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

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

El agua que se descarga deliberadamente del sistema para controlar la concentración de los sólidos disueltos en el agua de circulación, se llama purga intencional. La purga no intencional

es la cantidad de agua que se pierde del sistema debido a la brisa ó sea la cantidad de agua que no se logra retener en los eliminadores de gota, esto es , la cantidad de agua que sale por efecto de la evaporación, y purga no intencional también lo forman las purgas de agua en el equipo o tubería.

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

Aunque el agua de recuperación usualmente es fresca, el agua de desperdicio también puede usarse, el agua con calidad más pobre aumenta el potencial para depósitos, corrosión y ataque microbiológico, por lo que el agua de recuperación necesita de un tratamiento más adecuado que el agua fresca.

Para lograr determinar adecuadamente el volumen y frecuencia de la purga debe existir una forma de medir la concentración de sólidos en el agua de circulación y recuperación; esta forma de medición es la llamada relación de ciclos de concentración.

Para determinar los ciclos de concentración, la concentración de los sólidos disueltos en el agua de circulación se compara con la concentración de los sólidos disueltos en el agua de recuperación. Debido a que algunos sólidos pueden mantenerse a una concentración mayor que otros, la relación de los ciclos se toma para un valor específico.

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

Debido a que un ciclo de concentración más alto requiere menos

tratamiento para el agua, entre más alto se pueden mantener los ciclos, será más económico. A mayor concentración de los ciclos sin embargo, el agua se convierte en más dañina en términos de - formación de sólidos y la corrosividad del agua.

Las concentraciones de sólidos se expresan como partes por millón, ppm ó mg/litro, por ejemplo: Una medida de 150 ppm. de sílice en el agua de circulación significa que hay 150 libras de sílice - por cada millón de libras de agua, por lo tanto si un millón de libras de agua contienen 125 libras de sílice, la concentración se expresará como 125 ppm.

5.4 Tratamiento del Agua de Enfriamiento.

Se le dá tratamiento al agua de enfriamiento principalmente para proteger el equipo del sistema y así lograr prolongar su vida.

Un programa de tratamiento de agua completo debe dirigirse al - control de todos los problemas causados por las impurezas en el agua. Los sólidos disueltos y suspendidos en el agua de circulación pueden tener efectos dañinos en el sistema entero de enfriamiento.

Un objetivo del tratamiento de agua de enfriamiento es prevenir la formación de depósitos de incrustación y ensuciamiento en las superficies de transferencia de calor.

Las impurezas en el agua pueden corroer, o desgastar las partes de metal del sistema, por lo tanto, el programa de tratamiento de agua debe también proteger las superficies del metal de la corrosión. La descomposición de la madera que resulta del ataque de químicos y microorganismos en el agua de enfriamiento puede - prevenirse usando un tratamiento de agua adecuado. La deteriora-

-ción de la madera de la torre de enfriamiento debilita la resistencia estructural de la torre.

5.4.1 Control de Incrustación.

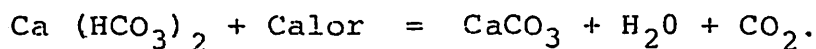
La incrustación es el resultado del depósito de sólidos disueltos en las superficies del equipo de la torre. Los materiales que forman incrustación entran al sistema por medio del agua de recuperación, estos materiales le dan al agua una cualidad, llamada dureza, cuando más alta es la concentración de los materiales que forman la incrustación más dura será el agua.

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

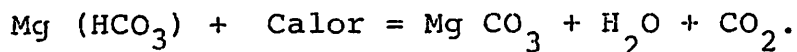
La cantidad de cualquier substancia productora de incrustaciones puede expresarse en partes por millón ppm., de carbonato cálcico equivalente (CaCO_3) contenido en el agua. En el caso de interesar expresarla en grains por galón, la conversión se efectúa dividiendo las partes por millón por 17.1. En aguas naturales la dureza puede ser desde menos de 10 ppm., la cual es baja, hasta más de 1800 ppm, la cual hace inutilizables las aguas que la poseen para fines industriales.

Las aguas con dureza temporal pueden ablandarse hirviéndolas ó calentándolas suficientemente, con este método de purificación el CO_2 es liberado, formándose precipitados

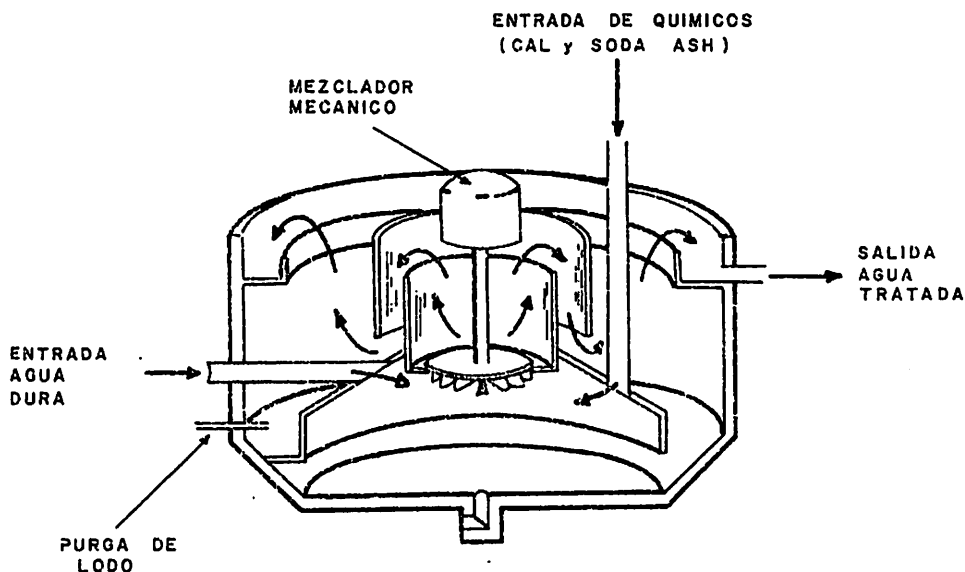
relativamente insolubles de calcio y magnesio, (CaCO_3 , MgCO_3). Puede escribirse la reacción siguiente.



y también.

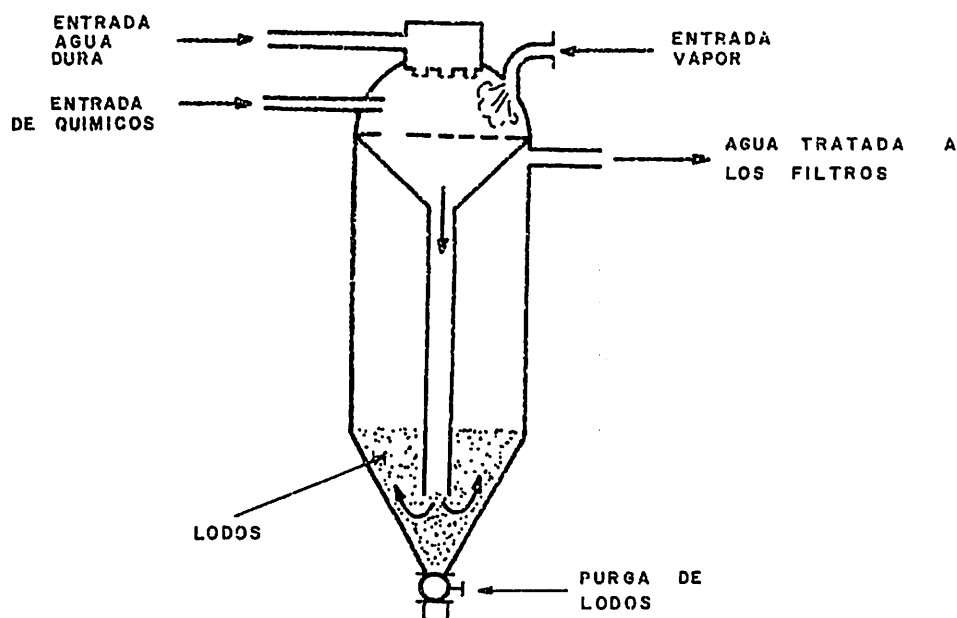


El ablandamiento o suavización del agua también se realiza agregando cal y Soda Ash al agua mezclarse en un suavizador mecánico en un proceso frío, como se ve en la figura 5.3.



Otro tipo de suavizador es el que utiliza calor y químicos, en éste el agua de recuperación y los químicos se calientan por el vapor, en este caso no tenemos una mezcla mecánica, el calor aligera la reacción de suavizador, así en una cierta cantidad de tiempo dado, un suavizador de proceso caliente puede tratar más agua que un suavizador

de proceso frío. Un suavizador que utiliza calor se muestra en la siguiente Figura 5.4.



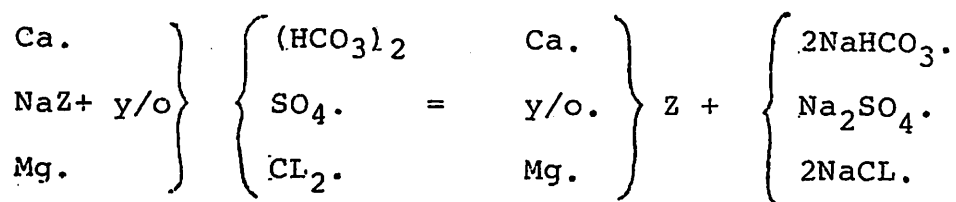
Además de la suavización con Cal-Soda, hay otra forma para remover la dureza del agua. Se conoce con el nombre de Intercambio Iónico.

Las impurezas en el agua se separan para formar partículas cargadas positiva y negativamente, estas partículas se les llama iones; estos iones existen en la solución y actúan casi independientemente. Una unidad de intercambio ionico tiene la habilidad de intercambiar un tipo de ion por otro tipo de ion; para suavizar agua debemos intercambiar iones de calcio por iones de sodio.

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

De esta manera, en el proceso del ablandamiento o rectificación, el sodio de la Zeolita pasa a la solución en forma de carbonato, sulfato o cloruro, debido a que el calcio y magnesio del agua son absorbidos por la Zeolita.

Los cambios de bases son los siguientes:



No formándose precipitado. El tratamiento con Zeolita produce aguas con contenidos muy bajos de calcio y magnesio. Cuando la Zeolita se vuelve inerte se regenera mediante un lavado con salmuera (una solución de NaCL), para restituir el sodio por intercambio.

Las Zeolitas naturales (arenas verdes) están indicadas para tratar agua fría exenta de ácidos y se utilizan con éxito en ciertos casos, pero en muchos otros han sido desplazados por productos resinosos artificiales especiales fabricados para el rectificado de aguas. Estos productos pueden soportar altas temperaturas, ácidos y álcalis, y

en determinadas condiciones pueden cambiar los aniones y cationes de las impurezas contenidas en el agua. En cualquier caso el agua que atraviesa el lecho de Zeolita debe estar libre de detritus, lodo, cieno y precipitados finamente divididos, los cuales recubren y tapan las partículas de los materiales empleados para la rectificación, haciéndolos menos eficientes.

En la Figura 5.5

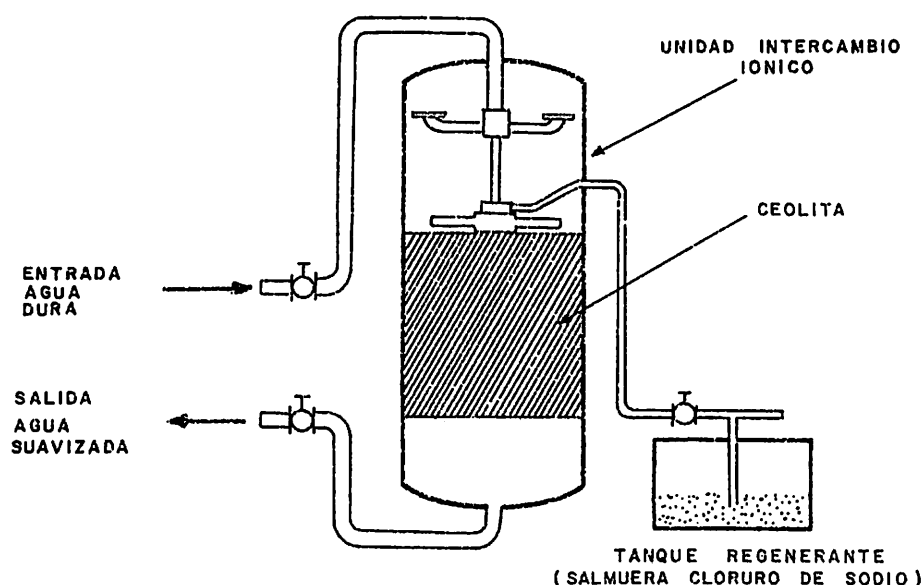


FIGURA 5.5

En la figura aparece una vista en corte de un rectificador de agua a base de Zeolita y corriente descendente. El agua entra por un distribuidor de tubos situado en la parte alta del aparato. La circulación es de arriba abajo a través de un lecho de Zeolita y de gránulos de cuarzo de tamaño creciente, que sirven de soporte al medio cambiador de iones. Este lecho de Zeolita sirve para quitar las materias mantenidas en suspensión en el agua, si bien no es esta su misión, ya que dichas materias deben quitarse del agua antes de entrar en el rectificador de Zeolita. El agua rectificada se saca por el haz de tubos situado en la parte inferior del aparato. Durante su regeneración el lecho de Zeolita se lava para quitarle las materias sedimentadas en él, mediante el agua de lavado, la cual atraviesa el lecho en sentido contrario al de funcionamiento, quedando de esta forma acondicionado. A continuación la solución de cloruro sódico (NaCl) procedente del depósito de salmuera se distribuye mediante un inyector o bomba sobre la Zeolita, circulando a su través para efectuar el cambio de base. La etapa final de la regeneración consiste en el enjuague con agua para quitar el exceso de sal junto con los cloruros de calcio y magnesio formados. Los caudales de agua a través del rectificador se controlan mediante una sola llave de varios pasos.

Una segunda manera de controlar la formación de incrustación es prevenir que los sólidos disueltos salgan de solución y formen incrustaciones en las superficies de trans-

-ferencia de calor, en este caso, no es el agua de recuperación, sino el agua de circulación la que se trata. Al agregar un ácido al agua de circulación podemos mantener la dureza disuelta, agregar ácido significa bajar el pH del agua. El pH se utiliza para expresar la acidez ó alcalinidad del agua, cuyo valor es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno. Para el agua pura el logaritmo del recíproco de la concentración de iones H es 7, que es el valor de su pH. Cuando aumenta la concentración de iones Hidrógeno, su recíproco se hace más pequeño, por consiguiente, el logaritmo es más pequeño, como así mismo el valor de su pH. Las aguas cuyo pH es menor de 7 son ácidas, y las que sobrepasan de 7, alcalinas. Por ejemplo: $\text{pH} = 9$ indica alcalinidad. Con el fin de reducir la corrosión, las aguas se deben de mantener ligeramente alcalinas.

Al disminuir el pH; podemos hacer que el agua sea menos formadora de incrustación. El ácido sulfúrico se usa comúnmente para eliminar las tendencias del agua para formar incrustación, pero el ácido sulfúrico es extremadamente corrosivo. Por lo tanto, la cantidad de ácido que se agrega al agua debe ser controlada adecuadamente.

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

Con este método debemos de agregar químicos al agua de recuperación que harán que los materiales que causan incrusta

-tación formen un lodo no pegajoso. El lodo entonces se asentará en la base de la torre, o el lodo puede descargarse de la torre; junto con otros materiales indeseables como parte de la purga.

5.4.2 Control de Ensuciamiento.

La clarificación es un proceso que remueve los sólidos suspendidos del agua, haciendo que éstos se asienten. En la Figura 5.6 se muestra un clarificador mecánico, en éste, el agua que contiene los sólidos suspendidos y los químicos de tratamiento se alimentan por diferentes entradas.

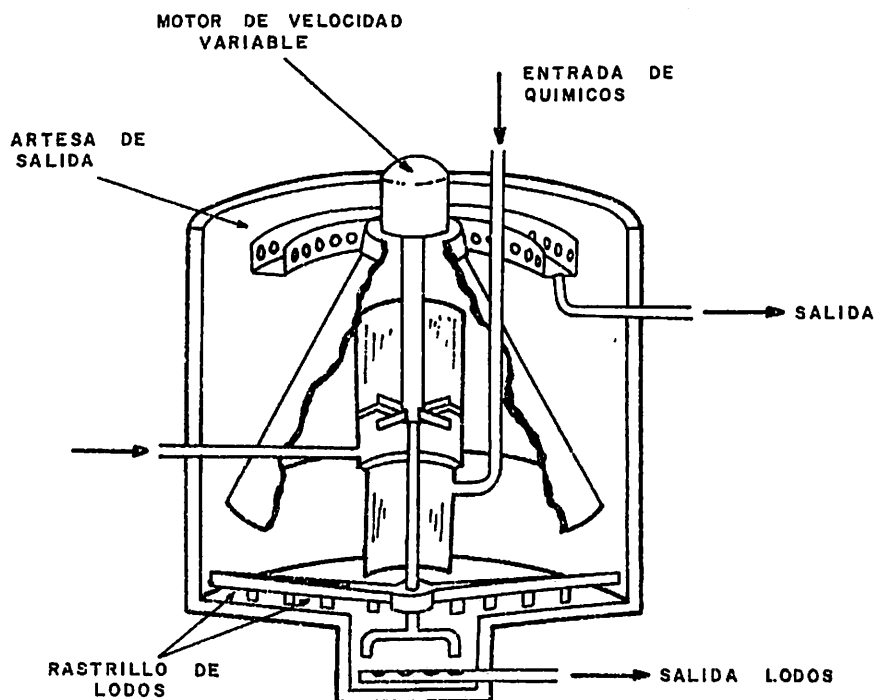


FIGURA 5.6

El diseño del clarificador causa que los químicos se mezclen completamente con el agua. Los químicos de tratamiento, llamados coagulantes, causan que los sólidos suspendidos formen una masa que se asiente rápidamente. Los químicos coagulan los sólidos suspendidos de manera que se pongan lo suficientemente pesados para sedimentar rápidamente en el fondo del tanque de clarificación. Los sólidos se agrupan como lodo en el fondo del tanque de clarificación. Una pala rotatoria mueve el lodo hacia el centro donde entra a la salida de lodos.

Otra forma de eliminar los depósitos de ensuciamiento es por la filtración del agua, pero filtrar toda el agua de circulación no es práctico, por lo tanto, o toda el agua de recuperación que entra o una porción del agua de circulación se filtra. Los filtros funcionan por gravedad o a presión.

En la Figura 5.7 se muestra un filtro que funciona por gravedad.

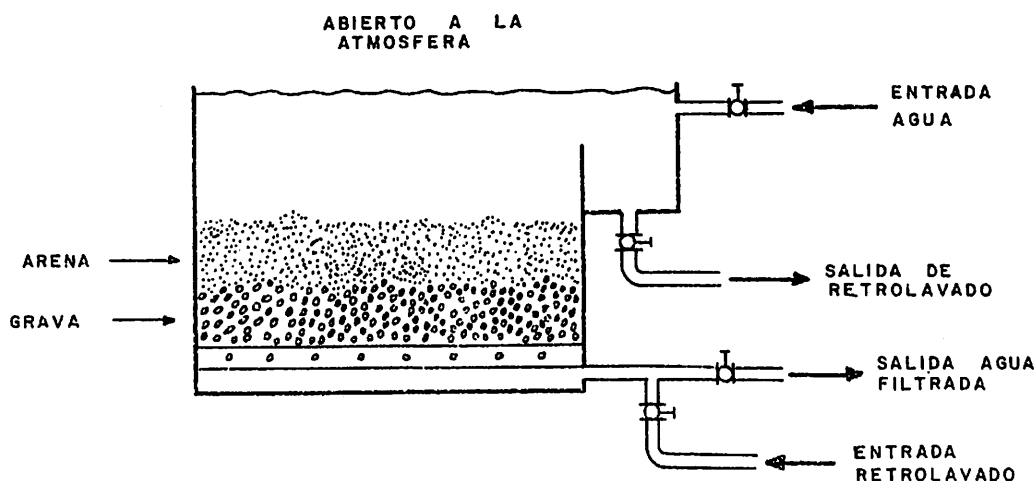


FIGURA 5.7

Y, en la Figura 5.8 se muestra un tanque que trabaja con presión.

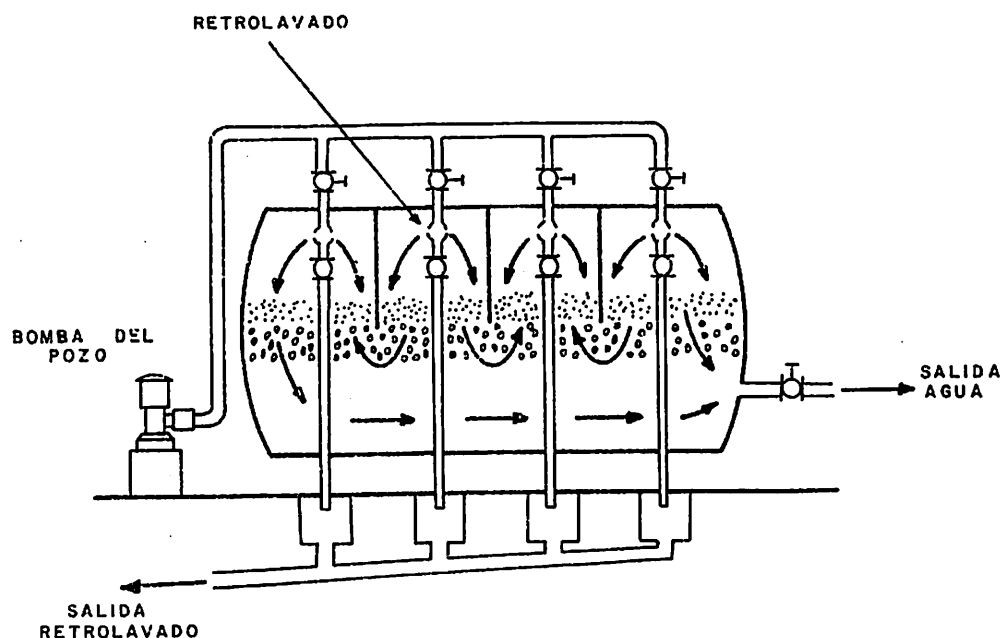


FIGURA 5.8

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

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

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

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

5.4.3 Control de Corrosión.

Corrosión es un desgaste anormal en el equipo mecánico de una torre, con una disminución de su resistencia mecánica. Las causas pueden ser: Acción electrolítica, acidez ó alcalinidad del agua, o la presencia de oxígeno.

Un método común de tratamiento de agua de enfriamiento es hacer deliberadamente el agua de circulación corrosiva para prevenir la incrustación, luego se agregan químicos para controlar la corrosión. Podemos controlar la corrosión en varias formas.

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

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

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

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

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

5.4.4 Crecimiento Microbiológico.

El crecimiento de algas, hongos y bacterias pueden controlarse usando biocidas. Son químicos que destruyen el crecimiento de microorganismos en el sistema de enfriamiento. Los biocidas oxidantes son químicos que matan organismos por medio de una combustión húmeda. Una combustión húmeda es una oxidación que ocurre en presencia del agua. Los biocidas oxidantes, en efecto, queman los microorganismos en el agua de enfriamiento en circulación. El biocida oxidante más común es el cloro. En la Figura 5.9 se muestra

un sistema de clorinación.

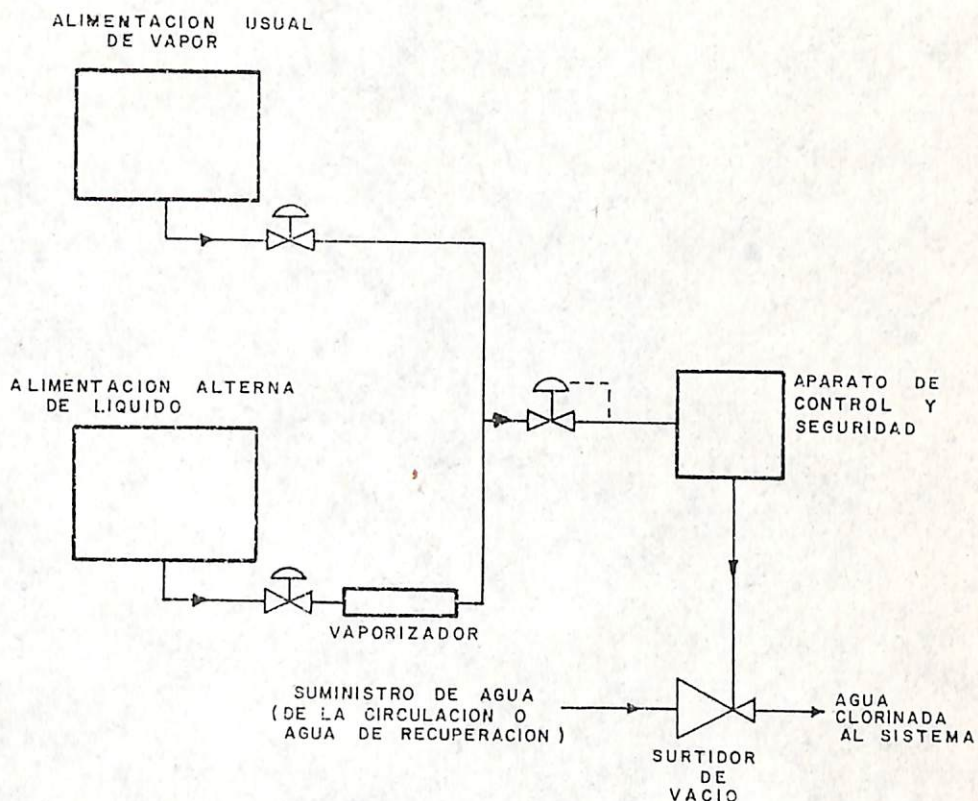


FIGURA 5.9

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

Por el contrario, de los biocidas oxidantes, los biocidas no oxidantes son aditivos químicos que destruyen los microorganismos por envenenamiento. Hay muchas clases de biocidas no oxidantes, dependiendo del tipo y proceso porcentaje del ingrediente activo en el compuesto, la concentración recomendada variará.

Los biocidas no-oxidantes usualmente se usan para complementar la clorinación cuando no ha sido completamente efectiva.

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

5.4.5 Protección de la Madera de la Torre de Enfriamiento.

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

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

El óxido de hierro es una reacción química que destruye la madera en las áreas donde está en contacto directo con el hierro.

El ataque biológico reduce la resistencia de la madera y la resistencia estructural de la torre. Este ataque biológico es causado por microorganismos en el agua. Hay dos tipos de ataque biológico. Ataque biológico a la superficie, es el desgaste de las superficies de madera en las áreas inundadas de la torre. Ataque interno es la descomposición interna de los miembros de madera en las áreas no inundadas de la torre.

Podemos controlar el ataque químico y biológico en varias formas. Manteniendo los niveles de ph. y cloro se minimi-

-zará el ataque químico. Usando preservativos y tratamientos de atomización se reducirá el ataque biológico.

5.4.6 Tratamiento de Purga.

Las regulaciones ambientales requieren que la descarga a las aguas públicas de la purga de la torre de enfriamiento no contengan químicos en concentraciones tóxicas. El tratamiento de la purga es necesario debido a que algunos químicos del agua de enfriamiento son tóxicos. Generalmente se usan dos métodos de tratamiento de purga. Los químicos pueden removerse y desecharse, pero esto es un desperdicio de químicos valiosos, lo cual representa pérdida por el costo de los químicos, o los químicos para tratamiento pueden recuperarse y reusarse. Algunos de los métodos que se usan para remover impurezas del agua, tales como suavización e intercambio iónico, - también se usan para remover los químicos para tratamiento de la purga de la torre.

6. OPERACION Y MANTENIMIENTO,

6.1 Componentes mecánicos de una Torre de Enfriamiento.

El corazón de una torre de enfriamiento es su equipo mecánico. Este debe tener un diseño robusto para poder resistir el ambiente corrosivo en el cuál opera. Debe prestar un servicio libre de problemas. Algunos de los fabricantes de torres de enfriamiento producen su propio equipo; otros obtienen los componentes mecánicos de diversos fabricantes, los cuáles pueden estar diseñados para un servicio específico o no.

1. Generalidades:

El equipo mecánico suministrado con las torres de enfriamiento (excluyendo los motores) está compuesto por ventiladores, cajas reductoras, ejes de accionamiento, cojinetes ó chumace-ras, fajas de accionamiento en V y válvulas para el control del agua. La única función del ventilador y su equipo asociado es la de suministrar un flujo de aire predeterminado a través de la torre para llevar a cabo el comportamiento térmico para el cuál fué diseñada la torre. Las válvulas controlan el flujo del agua y, por medio de una válvula de flote, mantienen un volumen específico de agua dentro del sistema.

Las condiciones de servicio son severas, éste normalmente es de tipo contínuo y se realiza en una atmósfera húmeda y corrosiva. Esto requiere de un diseño especial, construído con componentes muy resistentes para que funcionen efectivamente bajo esas condiciones. Algunos de los fabricantes de torres de enfriamiento diseñan, fabrican y prueban todo su equipo mecánico. Esto significa una sola responsabilidad la cual

resulta muy importante cuando el equipo envejece.

6.1.1 Los ventiladores de la Torre de Enfriamiento.

Los ventiladores de la torre de enfriamiento mueven grandes volúmenes de aire. Deben hacerlo en forma económica, operando suavemente. La vibración y las pulsaciones del aire pueden deteriorar el equipo mecánico y la estructura de la torre. Los materiales con que están contruidos los ventiladores, deben ser compatibles con el diseño y ser capaces de soportar los efectos corrosivos del medio ambiente.

a) Tipos de Ventiladores para Torres de Enfriamiento.

En las torres de enfriamiento se utiliza ventiladores de dos tipos: Centrífugos y de flujo axial de propela, dominando el empleo de estos últimos. Los ventiladores de propela tienen la capacidad de suministrar grandes volúmenes de aire a presiones estáticas muy bajas (valores nominales de $\frac{3}{4}$ de pulgadas de columna de agua, o menos) y se emplean casi exclusivamente en torres instaladas en el exterior. Son relativamente económicos, se pueden emplear en torres de todo tamaño y están conformados particularmente para usarse donde predominan diseños de pérdidas bajas. En cilindros diseñados apropiadamente, los ventiladores de propela operan con una eficiencia superior al 80%. Son producidos en gran cantidad en tamaños arriba de 30 pies de diámetro.

Los ventiladores centrífugos operan eficientemente contra presiones estáticas muy grandes y se emplean en la mayoría de instalaciones interiores. Son producidos en tamaños arriba de 36 pulgadas de diámetro.

b) Características de operación de los Ventiladores de Propela.

Una característica importante de los ventiladores de propela es que la suavidad en la operación es proporcional al número de paletas. Esto es debido a que las hojas se cargan y se descargan cuando pasan sobre los soportes del equipo mecánico y la estructura de la torre y por la carga básica de la paleta. Como un requerimiento de diseño, para un flujo de aire y velocidad del extremo de la paleta determinados, con pocas paletas requiere un ancho de paleta mayor que un ventilador con mayor número de paletas. La gran carga resultante sobre el ventilador de paleta ancha produce una pulsación mucho más grande del flujo de aire con el incremento proporcional de la vibración en el cilindro del ventilador y en la torre. Esto puede reducir definitivamente la vida útil de la torre.

Ordinariamente se considera que seis es el número mínimo de paletas deseable en ventiladores de tamaño mediano y ocho, es el mínimo para diámetros mayores. Doce paletas es máximo práctico. El diámetro de un ventilador está determinado básicamente por el volu-

-men de aire que tiene que manejar. Las velocidades del aire a través del ventilador varían desde 1200 hasta 2500 pies/min. El valor de diseño más económico se considera 1800 pies/min.

Las velocidades aceptables del extremo de la paleta, con la intensidad de ruido como criterio de diseño, varían con el tipo de torre, el tipo del cilindro del ventilador y la libranza del extremo de la paleta.

El diseño ideal que permite la mayor velocidad del extremo de la paleta es el mayor ajuste del cilindro y la menor libranza del extremo de la paleta. En las instalaciones industriales, donde el ruido no tiene mayor importancia, las velocidades aceptables del extremo de la paleta pueden alcanzar hasta 15000 pies/min., en ventiladores de 10 pies de diámetro, o mayores. Sin embargo, raras veces exceden de 12000 piés/min. Los diseños de instalaciones para edificios de oficinas contemplan velocidades que oscilan entre - 8000 y 12000 pies/min. con diámetros que varían desde 3 hasta 8 piés. Las torres pequeñas, tipo paquete, para servicio en aire acondicionado tipo residencial, usualmente utilizan paletas de hojas metálicas de diámetros que oscilan entre 10 y 24 pulgadas, con velocidades que raras veces exceden los 5000 pies/min.

c) Construcción de las paletas del ventilador tipo Propela.

En la construcción de la propela de los ventiladores de mayor diámetro se debe contar con un diseño apro-

-piado de modo que se produzca la velocidad del aire uniformemente desde el cubo (o centro) hasta el extremo de la paleta. La forma de paleta más efectiva para llevar a cabo esto es aquella que tiene forma cónica y está alabeada por torsión. Las aleaciones de aluminio proporcionan excelentes materiales para la producción de este tipo de paletas.

Las paletas de aluminio producidas por medio de fundición son relativamente baratas, tienen propiedades amortiguadoras de vibraciones internas y son altamente resistentes a la corrosión en la mayoría de las aplicaciones. Si el vástago de la paleta y el cubo del ventilador son de metales diferentes, deberán aislarse entre sí a fin de evitar la corrosión electrolítica.

Otro material que tiene gran demanda para la fabricación de paletas es la resina plástica termo fraguable, reforzada. Las paletas de mayor éxito producidas son los diseños de polyester, reforzadas con fibra de vidrio y moldeadas a compresión. Este material es comparativamente liviano, a prueba de corrosión y es compatible con la producción eficiente de paletas cónicas y alabeadas para ventiladores.

La fundición de paletas también se puede hacer con bronce, acero inoxidable y otros materiales. Sin embargo, su uso es generalmente limitado a causa de su alto costo y excesivo peso.

Otro tipo de diseño de paletas para ventiladores de

gran diámetro es el que emplea un marco estructural, recubierto con hojas metálicas. Sin embargo, es muy difícil producir hojas cónicas, alabeadas en este caso. La superficie también está sujeta a fatiga causada por la vibración. Por razones económicas, los ventiladores de este tipo deben tener pocas paletas lo que nos lleva a que haya pulsación de aire, reduciendo la vida útil de los componentes de la torre. Las paletas de diámetros pequeños pueden ser de lámina metálica, fundida o moldeada. Las paletas fundidas usualmente se construyen de aluminio y las de metal laminado pueden ser de aluminio o de acero galvanizado. Con ambos tipos se obtiene servicio satisfactorio. Las paletas moldeadas son más económicas que las fundidas.

d) Ventiladores Centrífugos.

Los ventiladores centrífugos del tipo de doble entrada se emplean predominantemente en torres de enfriamiento instaladas en el interior. La característica inherente de alta capacidad estática y de operación silenciosa los hacen particularmente apropiados para este tipo de instalación.

Los ventiladores centrífugos están disponibles en tres tipos: Paletas curvadas hacia adelante, paletas radiales y paletas curvadas hacia atrás. Las características de las paletas curvadas hacia adelante las hacen el tipo más apropiado para su aplicación en to-

-rres de enfriamiento. En virtud de la dirección y de la velocidad del aire que se aleja de la rueda del ventilador, éste puede estar equipado con una carcasa comparativamente pequeña. Esto es deseable desde el punto de vista estructural. A causa de la relativamente alta velocidad del aire al abandonar la rueda del ventilador, las paletas de curva hacia adelante operan a una velocidad comparativamente baja y la velocidad de operación es un factor definitivo en la producción de ruido. Con los tamaños que se emplean en las torres de enfriamiento, las paletas de curva hacia adelante son, generalmente, más silenciosas - que los otros tipos, así como también más económicas.

6.1.2 Reductores de Velocidad.

Los requerimientos principales para las cajas reductoras (Reductores de Velocidad) de las torres de enfriamiento son: Una vida larga y mantenimiento mínimo. Para conseguir esto, deben tener una construcción robusta a fin de poder soportar el servicio continuo y el medio ambiente severo en el cual operan. Algunas compañías diseñan y construyen este tipo de unidades específicamente para este tipo de servicio. Otras las obtienen de los suministradores, quienes simplemente modifican sus unidades corrientes.

a) Generalidades.

Las cajas reductoras están disponibles en varios diseños. Los engranajes componentes pueden ser de dife

-rentes tipos aceptables: de bisel en espiral, helicoidal y de tornillo sinfín, son los tipos más comunes. Dependiendo del tamaño y de la razón de reducción requerida, una caja reductora puede utilizar engranajes simples o una combinación de cualesquiera de los dos tipos. En general, una unidad de dos etapas es deseable cuando se tiene ventiladores con diámetros de 20 piés o mayores.

b) Factores de Servicio.

La vida de servicio de una caja reductora está relacionada directamente con la durabilidad de la superficie del engranaje. La American Gear Manufacturer Association a través de la Asociación de Fabricantes de Reductores de Velocidad para Torres de Enfriamiento, ha establecido factores de servicio que se aplican en forma específica a las instalaciones de torres de enfriamiento. Este factor es la relación que hay entre el cálculo básico de la potencia y la potencia aplicada, ambas expresadas en HP. Dicha relación varía con el tipo de fuente de energía y la clase de servicio (intermitente ó continuo). Con accionamientos por medio de motores eléctricos se puede aceptar satisfactoriamente un factor de servicio de 2.0 para reductores de velocidad tipo bisel en espiral y de 1.5 para reductores de velocidad tipo helicoidal, en servicio continuo. Factores de servicio menores, de 1.67 y 1.25 se aceptan para unidades de

bisel en espiral y helicoidales, respectivamente, para servicio intermitente, tal como ocurre en instalaciones de aire acondicionado. Para reductores tipo tornillo sin fin, con potencias superiores a 30 HP. y servicio continuo, es aceptable un factor de servicio de 1.5 y para un sistema de doble envolvimiento y potencia abajo de 30 HP. se acepta un factor de 1.2.-

c) Cojinetes.

La vida de la caja reductora también depende de la vida de los cojinetes. Estos normalmente se seleccionan para una vida calculada, compatible con el tipo de servicio. Los cojinetes para cajas reductoras de torres de enfriamiento de tipo industrial, en servicio continuo son seleccionadas por los fabricantes en la base de una vida de 100,000 horas, B-10. La vida B-10 se define como la expectativa de vida en horas, durante la cuál el 90% ó más de un grupo dado de cojinetes, bajo una condición específica de carga, podrán permanecer prestando servicio. Para aplicaciones de servicio intermitente, se puede tener una vida útil satisfactoria con un valor menor de B-10; para un servicio de 8 a 10 horas diarias, una vida de 35,000 horas B-10 es satisfactoria y es equivalente a un servicio continuo de 100,000 horas B-10. Además de la calidad del diseño y de la confiabilidad,

los aspectos de lubricación de una caja reductora son altamente importantes para conseguir una vida larga, libre de problemas. El sistema de lubricación deberá tener un diseño simple y ser capaz de proporcionar lubricación durante períodos cortos de operación inversa. Un sistema suspendido o de salpicado satisface adecuadamente estas condiciones en la mayoría de unidades. El nivel estático del aceite también es importante, particularmente en unidades que prestan servicio intermitente. Dicho nivel debe ser lo suficientemente alto como para cubrir los engranajes a fin de protegerlos contra la corrosión cuando la unidad se encuentra fuera de servicio. Indicadores de nivel remotos y puntos para llenado y drenaje localizados convenientemente permiten que se pueda llevar a cabo el mantenimiento preventivo en forma fácil y eficiente. Se debe seguir rigurosamente los procedimientos de lubricación recomendados por el fabricante así como también el empleo de los lubricantes adecuados.

6.1.3 Ejes de Accionamiento.

La función del eje de accionamiento es la de transmitir la potencia del motor a la caja reductora. El eje opera dentro de la corriente de aire húmedo, por lo tanto, debe estar construido para alcanzar una larga vida. Trabaja a altas velocidades por lo que su diseño debe incluir fa

-cilidades para el balanceo. Debido a que la estructura de las torres no es completamente rígida, el eje debe tener capacidad para operar con un pequeño desalineamiento.

Los ejes de accionamiento están descritos como ejes flotantes, equipados con acoplamientos flexibles a ambos extremos. Deben estar contruidos con materiales resistentes a la corrosión debido al ambiente en que operan. El eje flotante usualmente se construye de tubería de acero al carbono, protegido con una capa galvanizada por inmersión en caliente. Frecuentemente se emplea tubo de acero inoxidable debido a su durabilidad, aunque es más caro. Las bridas del eje y las de montaje, que permiten la conexión al motor y a la caja reductora pueden ser fundidas o soldadas.

El tipo de los acoplamientos flexibles que permiten la operación con cierto grado de desalineamiento varían con los fabricantes. Las unidades más adecuadas para este tipo de operación son aquellas que no necesitan lubricación porque, prácticamente, no necesitan mantenimiento. Puede obtenerse placas fabricadas de hule o de metal. Se ha podido establecer que existen excelentes registros de servicio por unidades fabricadas de hule las cuáles pueden ser bujes en forma de empaquetadura o discos moldeados, inyectados con hule. Estos acoplamientos son prácticamente impenetrables por la corrosión y tienen características de flexibilidad excelentes.

Las placas metálicas también tienen buenos registros de

servicio. Sin embargo, las fallas por fatiga de los discos metálicos pueden reducir la vida útil de servicio.

Es muy importante que los ejes de accionamiento sean balanceados apropiadamente. La falta de balanceo además de ocasionar vibraciones en la torre, induce cargas más altas y desgaste excesivo en el equipo mecánico acoplado al eje. La mayoría de los ejes de acoplamiento en las torres de enfriamiento operan a velocidades próximas a 1800 RPM. A estas velocidades es necesaria que los ejes estén balanceados dinámicamente para reducir a un mínimo las fuerzas ocasionadas por la vibración.

6.1.4 Accionamientos por Medio de Fajas en "V".

- a) Los accionamientos por medio de fajas en V, son aceptados corrientemente en muchas torres de enfriamiento tipo paquete y en algunas de las más pequeñas de tipo convencional. Si los accionamientos están diseñados e instalados correctamente, pueden proporcionar servicio confiable con un mínimo de mantenimiento. El accionamiento está compuesto por el motor, la polea del ventilador, la carcasa del cojinete para soportar el ventilador, las fajas en V y un dispositivo para ajustar la tensión de las fajas.

Todo el montaje opera dentro del medio formado por el aire húmedo de la torre. Debe ser capaz de soportar el ambiente corrosivo para poder prestar un servicio eficaz. Las partes más vulnerables son: las poleas,

las fajas y los cojinetes. Es deseable proteger los canales de las poleas de la corrosión, especialmente en las unidades de alta velocidad. Cuando las poleas han sufrido picaduras y escoriaciones por acción de la humedad, hay un contacto menor y un mayor deslizamiento entre las poleas y las fajas, ocasionando que estas últimas se aflojen. Para evitar esta situación, se croman los canales de las poleas minimizando la acción oxidante del aire húmedo y logrando una mayor duración de las poleas.

a) Fajas:

Las fajas en V se usan casi universalmente en torres de enfriamiento equipadas con accionamientos por medio de fajas. Por la misma naturaleza de su agarre en forma de cuña, reduce el deslizamiento y permite que se entregue más potencia por unidad de anchura de la polea. Las fajas deben fabricarse de materiales que sean prácticamente impermeables por la atmósfera húmeda en la cuál operan. Si se incrementan los requerimientos de potencia, se puede obtener una mayor capacidad agregando más fajas. Los sistemas de fajas múltiples se pueden formar acoplando varios juegos de ellas, es decir, fajas del mismo tipo, sección y longitud.

b) Montaje de los Cojinetes.

Existen diversos tipos de cojinetes y de montajes

de los cojinetes disponibles para su empleo con accionamientos de fajas en V. Las unidades más pequeñas usan chumaceras lubricadas con aceite. Las unidades más grandes usan cojinetes sellados de bolas ó de rodillos, algunos requieren que ocasionalmente se cambie el lubricante, otros están sellados de por vida. En cualquier caso, se recomienda el empleo de sellos suspendidos de agua para evitar que la humedad entre en el cojinete. Se recomienda el uso de grasa a base de litio para inhibir la herrumbre y la oxidación de los cojinetes de rodillos y de bolas.

c) Ajuste de las Fajas.

El desgaste y el alargamiento, así como la tensión de las fajas debe controlarse y ajustarse periódicamente. El equipo para llevar a cabo esta operación forma parte integral del montaje original y debe contar con un control que tense la faja en forma manual o automática. El equipo debe ser robusto y bastante estable de forma que, después del alineamiento de las poleas, la tensión se pueda mantener sin cambios. Esto es esencial para una vida de servicio máximo en la cuál el desalineamiento es considerado una de las causas más comunes del excesivo desgaste de las fajas y las poleas. Es frecuente instalar poleas de paso variable en torres de interiores para permitir los cambios de velocidad de los ventiladores para ajustar el flujo de ai

-re a las diferentes presiones estáticas, Algunos de los montajes de poleas están equipados con bujes cónicos divididos para poder armarlos y desarmarlos fácilmente.

6.1.5 Válvulas.

Las válvulas se emplean para controlar el flujo de agua por medio de las líneas de agua del sistema de distribución de la torre. Las válvulas empleadas para este tipo de aplicación incluyen válvulas de tope, válvulas de control de flujo y válvulas de flotación. Los tipos, la cantidad y la complejidad de las válvulas requeridas están en relación con el tipo y el tamaño de la torre.

a) Válvulas de Tope:

Estas válvulas se usan en torres de contra flujo y de flujo cruzado para regular el flujo de agua. Particularmente entre las celdas o en torres de celdas múltiples y para cortar el agua para efectuar mantenimientos o con cualquier otro propósito. Las válvulas de compuerta (y, ocasionalmente, de mariposa) también se pueden usar para este fin. Estos dos tipos de válvulas son relativamente caros y raramente se incluyen en el costo de la torre. En las regiones donde no se congela el agua, se puede reemplazar las válvulas de tope convencionales, en las torres de flujo cruzado, por válvulas de control de flujo, que se adaptan para este propósito. En torres de celdas múltiples esto puede representar un gran ahorro en el costo.

b) Válvulas para control de Flujo:

Las válvulas para control del flujo se usan en torres de flujo cruzado para uniformizar el flujo del agua entre las celdas de la torre y los depósitos de la celda. Estas válvulas son usualmente producidas por el fabricante de la torre y, si están diseñadas apropiadamente, también se pueden emplear como válvulas de tope, bajo ciertas condiciones climáticas.

c) Válvulas de Flote:

Este tipo de válvulas es indispensable en todos los sistemas de torres de enfriamiento. Su propósito es suministrar el agua tratada que reemplaza la que se pierde por evaporación, purgas, arrastre y fugas. Están instaladas en el depósito de agua fría y su función es mantener un nivel de agua establecido previamente. Forman parte del equipo normal de la mayoría de las torres de enfriamiento, con excepción de las que están instaladas sobre depósitos hechos de concreto. Hay disponibilidad de válvulas de marcas comunes y de unidades especialmente diseñadas.

6.1.6 Manipuleo del Equipo Mecánico.

Una torre bien diseñada permite realizar fácilmente el mantenimiento del equipo mecánico. Esto significa primordialmente accesibilidad. Para el caso de las grandes torres de tipo industrial, también significa disponibilidad para el manejo del equipo especial que permite mover el equipo pesado. Estos son: elevadores especiales para -

desmontar de su sitio los ventiladores y las cajas reductoras. Debe tener disponible, en forma temporal o permanente, pasadizos para fijar las plataformas de trabajo. Una vez que el equipo mecánico está afuera de su sitio, - se puede transportar a través de la plataforma superior y bajarlo a tierra a fin de llevarlo al taller de reparaciones.

6.2 Principios de Operación.

El agua debe absorber calor para cambiar su estado de líquido a vapor, ocurriendo el fenómeno a presión constante. El calor se toma del agua que permanece en esta líquido. De esta manera, el calor de vaporización a la presión atmosférica es eliminado del agua que se encuentra en circulación y es transferido al flujo de aire.

6.2.1 Calor de Entrada igual a Calor de Salida.

La cantidad de calor transferida a la atmósfera por la torre de enfriamiento es siempre igual a la carga calorífica impuesta a la torre, mientras que el nivel de temperatura al cuál el calor es transferido está determinado por la capacidad térmica de la torre de enfriamiento.

La torre de enfriamiento no genera ni destruye el calor, ésta sólo mueve la masa de calor transferido de un medio a otro. Si a la torre se le impone un exceso de temperatura de 50° esto significa que si el agua de entrada está a 150° la torre enfriará la masa 50° teniendo una temperatura de descarga de 100° .

Sin embargo, la capacidad de la torre es una función de la aproximación a la temperatura de bulbo húmedo,

6.2.2 Conceptos de Funcionamiento.

Para definir lo qué está haciendo una torre de enfriamiento en términos del rango, el valor (HWT-CWT) es engañoso y no indica el nivel correcto del comportamiento de la torre.

La medida del comportamiento no la cantidad de calor que está siendo eliminada, más bien es el nivel al cuál está siendo eliminada. Por lo tanto, la medida del comportamiento de la torre es la temperatura del agua fría resultante o, más específicamente, la aproximación (CWT-WBT) bajo condiciones conocidas. La temperatura del agua fría es la variable dependiente primordial e indica vívidamente la capacidad de la torre de enfriamiento.

Por ejemplo, una torre de enfriamiento puede estar diseñada para enfriar agua desde 110°F. hasta 85°F. a una temperatura de Bulbo húmedo de 78°F. lo cuál nos da un rango de diseño de $25 = (110-85)$ y una aproximación a la temperatura de bulbo húmedo de $7^{\circ}\text{F.} = (85-78)$. Si la torre en operación real está trabajando a esas temperaturas entonces está cumpliendo su cometido. Sin embargo, podría estar operando a 120°F. de agua caliente y 95°F. de agua fría y a 78°F de temperatura de bulbo húmedo. En este caso, el rango de enfriamiento sería el mismo, 25°F, de este modo, se podría decir que la torre enfría el agua 25°F

estrictamente de acuerdo con el diseño. Sin embargo, la aproximación se amplió de 7°F a 17°F y esta torre deberá operar a cerca de un 50% fuera del diseño original de comportamiento.

Una torre de enfriamiento deberá enfriar el agua en una forma natural y automáticamente a través de cualquier rango que le demande la unidad. Por lo tanto, cuando se requiere una capacidad adicional de carga calorífica, el requerimiento debe aumentarse por una estipulación posterior, nominalmente, la temperatura del agua fría, o más específicamente, la aproximación. Luego, el nivel de temperatura al cual se elimina el calor es la medida del comportamiento.

6.2.3 Aproximación.

La aproximación o eficiencia está definida como la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del aire: $(\text{CWT}-\text{WBT})$.

Muy a menudo, un operador establecerá que su torre, que fué diseñada para producir una aproximación de 10°F , no está trabajando de acuerdo con ese diseño, cuando en un día cualquiera tiene una aproximación de 15°F . Es obvio que si la temperatura de bulbo húmedo disminuye, también lo hace la temperatura de agua fría. Sin embargo, la relación de disminución de una temperatura a la otra no es de 1:1. su valor está más cercano a una relación de 2:1. Esto es, por cada dos grados de caída en la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura del agua fría caerá 1° , aproximadamente. Por lo tanto, si la temperatura de bul-

-bo húmedo está 10° por debajo de su valor de diseño, entonces, por definición, la aproximación se incrementará en 5° arriba del diseño especificado. Por supuesto, lo contrario también es verdad; si la temperatura de bulbo húmedo se incrementa arriba del valor de diseño, la temperatura del agua fría se incrementará, aproximadamente 1° por cada 2° de incremento en la temperatura de bulbo húmedo.

<u>TABLA No.</u>	<u>BULBO HUMEDO (W.B.)</u>	<u>AGUA FRÍA (CWT)</u>	<u>APROXIMACION</u>
Diseño	75°	85°	10°
WB Baja 10°	65°	80°	15°
WB Sube 5°	80°	95°	15°

Cantidad de Calor Q. (BTU) = $500 \times \text{GPM} \times \text{Rango}$.

Un decremento en la aproximación especificada es equivalente a un decremento en la fuerza de accionamiento disponible para la transferencia de la masa y el calor del agua a la corriente de aire. El porcentaje de reducción en la fuerza de accionamiento es mucho más grande para una aproximación baja que para una aproximación alta. Por ejemplo: Un decremento en la aproximación de 20° a 19° podría resultar en un incremento de los costos de cerca del 5%, mientras que un decremento de 5° a 4° en la aproximación requerirá cerca del 20% más de capacidad de torre de enfriamiento.

6.2.4 Consideraciones acerca de la Potencia.

¿Cuál es el efecto obtenido cuando se incrementa la potencia?

-cia de los ventiladores en el comportamiento térmico de una torre de enfriamiento?

Por ejemplo, a menudo se dice que un 10% de incremento en la potencia al incrementar el ángulo de inclinación de las paletas del ventilador se obtiene un incremento del 10% en la capacidad de la torre de enfriamiento. Si estamos cerca del valor de diseño de la potencia de los ventiladores y estamos operando esencialmente a una eficiencia del ventilador y a una razón de flujo constante y, - por lo tanto, a una capacidad constante de la torre de enfriamiento, el flujo de aire se incrementará en relación a la raíz cúbica del incremento de la potencia. Por ejemplo, si la potencia se incrementa al 110% de su valor original, el flujo de aire y la capacidad del comportamiento térmico de la torre se incrementará en aproximadamente - 3.2%

$$\left(\frac{110}{100}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{4.7964}{4.6416} = 1.032 \quad 3.2\%$$

Se tiene un efecto de enfriamiento considerablemente mayor instalando chimeneas de recuperación de velocidad a fin de reducir la presión total contra la que está trabajando el ventilador.

Como una consideración de la potencia total, cuando un motor de dos velocidades es conmutado para que trabaje a media velocidad luego de estar trabajando a toda velocidad, el flujo de aire se reduce a la mitad y la potencia a $\frac{1}{4}$ de la cantidad anterior. Sin embargo, al utilizar este método de ahorro, se debe tener cuidado de los cambios en

las características del comportamiento ocasionados en la torre, principalmente en la de tipo de flujo cruzado, una disminución en la velocidad del aire a través de la torre evita el escape del agua, con el resultado de causar algunos efectos detrimentes. Una velocidad mayor - causará una reducción en el volumen de alimentación que está siendo utilizado.

6.2.5 Manejo del Agua.

Un suceso muy común en la operación de una torre de enfriamiento es la situación en la que, debido al calor del verano, la temperatura empieza a subir en un intercambiador de calor de una refinería. El operador pide más agua para mantener la temperatura del proceso de enfriamiento; se bombea más agua hacia la torre y esto ocasiona un decremento en la capacidad de funcionamiento de la misma, elevando la temperatura del agua fría, la que a su vez - llega al intercambiador, en algunos casos, en mayor cantidad de la que puede compensar el efecto del incremento - del coeficiente de transferencia de calor en el intercambiador. Entonces, la situación empeora y, de nuevo, es necesario incrementar el caudal de agua. Esto permite a un operador bien entrenado encarar el hecho que cuando se presenta el problema se puede resolver disminuyendo la - cantidad de agua en lugar de aumentarla. En la mayoría de los casos, es más eficiente enfriar menos agua para el proceso que se pretende enfriar y no tratar de intentar

enfriar más agua que aquella cantidad para la cuál fué diseñada la torre.

Evaporación:

La regla de oro de la evaporación es: 0.1% del flujo - circulante para cualquier rango , por grado Fahrenheit. Por ejemplo, Una torre de enfriamiento de 10,000 GPM con un rango de 20°podría evaporar normalmente el 2% del caudal circulante, es decir, una pérdida de 200 GPM.

6.3 Funciones del Operador.

6.3.1 Puesta en Marcha.

Cuando se pone en marcha una torre de enfriamiento el operador de ésta, debe revisar con mucha atención ésta, - para comprobar que:

- a) El sistema de distribución de agua se encuentra limpio y los rociadores de agua perfectamente colocados y libres de suciedad.
- b) El depósito de agua fría se encuentre limpio y sin escombros.
- c) La rejilla de filtración está colocada ante la aspiración de las bombas y libre de residuos.
- d) Las válvulas funcionen libres y adecuadamente.
- e) Todos los pernos estan ajustados, fundamentalmente los de sujeción del equipo mecánico.
- f) Que la caja reductora de velocidad esté lleno de aceite limpio, del tipo y grado que le corresponde y al nivel adecuado, así como también que el orificio del respiradero no esté obstruído.

- g) El motor eléctrico esté bien lubricado y el sentido de giro debe ser el correcto.
- h) El ventilador gira libremente en el sentido de las agujas del reloj, visto desde arriba.
- i) Las conecciones eléctricas son las adecuadas para las condiciones de funcionamiento que se tiene.
- j) El motor trabaje sin ruido y sin calentamiento excesivo. Para realizar estas comprobaciones debe ponerse en marcha durante media hora por lo menos para poder observar su funcionamiento.
- k) Se han revisado cuidadosamente todos los equipos. Después de arrancada la unidad, se comprobará cada uno de los equipos, observando cuidadosamente su funcionamiento para proceder a pararlo, si éste no fuera el correcto.

Una vez revisadas todas estas partes y comprobado que el funcionamiento es satisfactorio, puede procederse a llenar de agua el depósito y a poner en marcha la torre.

6.3.2 Paradas de la Torre.

El procedimiento a seguir para parar una torre dependerá del tiempo que ésta haya estado funcionando y la duración de la parada. El programa de conservación y mantenimiento que se haya trazado se aplicará a todas las partes - que requieran atención y especialmente a los equipos mecánicos.

Independientemente del tiempo que dure la parada, se inspeccionarán siempre visualmente los motores y ventilado-

-res comprobando que el aceite en la caja reductora esté al nivel indicado y libre de agua. Si hubiese agua en el aceite, éste debe ser inmediatamente reemplazado para evitar la oxidación.

Cada celda que permanezca parada por periodos mayores a una semana se deberá poner en marcha y accionada por lo menos diez minutos todas las semanas para reducir el riesgo de oxidación de cojinetes y engranajes.

6.3.3 Recopilación de Datos:

Además de recopilar y anotar los datos de las pruebas un operador es también responsable de hacer los ajustes menores en el tratamiento de agua. Estos ajustes se basarán en los resultados de las pruebas propias del operador y en los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio.

En todos los casos el personal supervisor debe aprobar todas las decisiones del tratamiento y el operador debe asegurarse que se hagan los ajustes correctos. Las inspecciones diarias son otra parte de las responsabilidades del operador, toda la información de operación disponible debe recolectarse durante las inspecciones diarias y ser incluidas en el diario permanente. Esta información junto con los resultados de las pruebas, proporcionan un gran record de la operación y funcionamiento de la torre. Las inspecciones diarias deben incluir el instrumental de la torre, equipo no mecánico, tal como el sistema de

distribución de agua y el depósito de acumulación de agua fría, los niveles de los tanques químicos y las operaciones de las bombas y otros chequeos específicos de su planta.

Los operadores también deben ser capaces de responder por los trastornos en el sistema de enfriamiento, los valores altos o bajos de ph, los niveles bajos del inhibidor de corrosión y la contaminación con aceite son situaciones que requieren de acción correctiva inmediata.

6.4 Análisis del Agua de Enfriamiento.

El análisis es un procedimiento importante en la operación de la torre de enfriamiento. Además de las pruebas al agua, los operadores son responsables de hacer los ajustes menores en los niveles de los tratamientos químicos en el sistema. Por lo menos una vez por turno, un operador deberá correr las pruebas en el agua de circulación.

El ph del agua es una de las más importantes variables de prueba, si el agua tiene un ph alto, puede producir incrustaciones, y si tiene un ph bajo puede ser extremadamente corrosiva.

El ph se mide de dos maneras: Una manera es usar un potenciómetro, un electrodo o sonda unido al potenciómetro transmite el valor del ph a una escala de lectura. Una medida menos directa puede obtenerse usando soluciones indicadoras, cuando se agregan a una mezcla cambiará de color. Comparando el color de la muestra de agua con una tabla estandarizada el operador puede determinar el ph., siendo el más comunmente usado el sistema con potenciómetro para determinar el ph, por tener una mayor exactitud.

Una caída repentina en el ph indica un incremento en la acidéz del agua, un ph bajo puede ser causado por ácido excesivo o por razones de alimentación de cloro excesivos o por fuga del producto.

Se puede determinar la causa del transtorno al chequear los sistemas de alimentación de ácido y cloro. Demasiado ácido en el agua de circulación puede destruir las películas del inhibidor en las superficies del metal y pueden aumentar la velocidad de corrosión. Al eliminar la causa de la caída de ph y retratar el agua, podemos establecer la condición adecuada del agua.

Un ph. alto puede ser causado por fugas de producto alcalino ó por gas amonio que lleva el aire. Las aguas alcalinas también debilitan algunos inhibidores de corrosión.

Como en el caso del ph. bajo, la causa del transtorno debe eliminarse y el agua debe ser retratada.

El inhibidor de corrosión es debilitado usualmente como un resultado de la fuga de producto, los efectos son similares a aquellos del ph. bajo.

La película del inhibidor se destruye y a medida que el nivel del inhibidor cae, la velocidad de la corrosión aumenta. En este caso, debe alimentarse el inhibidor al sistema a una velocidad más rápida para reestablecer la película protectora.

La contaminación del agua de circulación es usualmente el resultado de fugas de un proceso o impurezas en el agua de recuperación, como un ejemplo podemos mencionar que en una refinería de aceite, la contaminación de aceite puede causar ensuciamiento en

Otro análisis efectuado por el operador es la prueba para TDS, ó sólidos totales disueltos, esta prueba determina la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua. Se puede determinar los TDS midiendo la conductividad del agua, esto es la habilidad del agua para transmitir corriente, el dispositivo usado para medir los TDS es el Miliamperímetro.

Se debe de anotar también el nivel del inhibidor de corrosión, en tanto algunos inhibidores son efectivos en amplios rangos, otros deben mantenerse a niveles precisos para que proporcionen una protección adecuada.

El cloro es otro químico para tratamiento que debe mantenerse dentro de un rango limitado, el análisis del cloro, sin embargo, involucra una consideración especial. El residual de cloro se deteriora rápidamente, así pues, la prueba debe realizarse inmediatamente después de obtener la muestra.

Los químicos en el laboratorio pueden realizar otras pruebas de mejor forma que los operadores, estas pruebas son usualmente de terminaciones más precisas o chequeos de las pruebas de campo. Todos los resultados de las pruebas deben anotarse en un diario permanente, esto permite que el curso de la operación de la torre sea controlado y se hagan las correcciones antes, de que se manifieste un paro costoso.

6.5 Condiciones anormales de Operación.

Bajo condiciones normales de operación no es difícil mantener la química del agua ajustada adecuadamente, pero cambios repentinos en las condiciones de operación o descomposturas en el equipo pueden alterar la química del agua.

las superficies de transferencia,

6.6

Mantenimiento de estructura y equipo Mecánico.

6.6.1 Mantenimiento de la Estructura y Cubierta:

La estructura de la torre está formada por piezas prefabricadas de hormigón armado, por lo que no requiere ningún mantenimiento especial.

Sólamamente deben observarse las siguientes precauciones - para conservar inalteradas las superficies:

A) Evitar que caiga sobre las crucetas aceite lubricante, petróleo o grasas empleadas en el mantenimiento de los equipos mecánicos o en otras manipulaciones.

Si se produjera esta circunstancia, hay que LIMPIAR inmediata y completamente el producto derramado.

Estos productos y los agentes químicos en general - pueden perjudicar al hormigón, por lo cual debe evitarse todo contacto directo con la estructura de la torre.

B) El agua refrigerante no deberá contener ácidos agresivos o bases. A ser posible, hay que mantener el valor pH 7.

En particular, la concentración de compuestos sulfurosos (SO) se debe mantener siempre por debajo de las 600 ppm.

C) También deberán tomarse medidas de protección especiales cuando existan cerca de la torre de refrigeración instalaciones que generen vapores muy ácidos, gases o humos corrosivos (sulfurosos).

D) Se recomienda una inspección rutinaria de la estructura cada tres meses y una inspección más detenida - para comprobar la posible formación de grietas, fisuras superficiales, etc., a intervalos no superiores a doce meses,

6.6.2 Mantenimiento del Relleno.

Debido al material de que están contruidos los emparillados del material de relleno de una torre no es necesario un mantenimiento, puesto que éstas generalmente son resistentes a la acción de aguas contaminadas, incluso - por productos aromáticos e hidrocarburos, así como a sólidos disueltos procedentes de aguas naturales no depuradas o aguas tratadas con productos químicos.

Muchas también no requieren ningún tratamiento especial para preservarlas de la acción de microorganismos.

Podemos concluir que el material de relleno además de sus características térmicas, su alta eficiencia en el intercambio calorífico y su resistencia mecánica, poseen una total resistencia a los ácidos, sales, erosión y posible acción de organismos vivos (algas, hongos, etc.).

6.6.3 Mantenimiento de los Eliminadores de Gota.

Deberán mantenerse limpios y libres de obstrucciones que puedan dificultar el paso del aire.

Sólamante será necesario tener la precaución de transitar siempre sobre las pasarelas colocadas sobre ellos cuando se inspeccionen desde dentro de la celda los equipos mecánicos.

Además de facilitar el tránsito, las pasarelas distribuyen la carga uniformemente, evitando concentración del peso sobre las hojas que forman el deflector, evitándose con ello las posibles roturas de estos elementos.

Al quitar el eliminador para tener acceso al sistema de distribución debe tenerse la precaución de no golpearlo contra las crucetas de la estructura, lo que podría producir roturas, y al colocarlo nuevamente en su sitio, hacerlo con cuidado para impedir la rotura de las esquinas. Después de una revisión es importante cerciorarse de que se han retirado todos los andamiajes, tablones, escaleras, etc., utilizados en la operación y que son ajenos, al funcionamiento de la torre.

6.6.4 Mantenimiento del Sistema de Distribución de Agua.

Sólamamente requiere una inspección rutinaria, con el fin de mantenerlo limpio y sin obstrucciones, tanto en el colector principal como en los ramales lateriales y aspersores.

Es muy importante mantener los rociadores o aspersores, perfectamente limpios y libres de obstrucciones, que impedirían un reparto uniforme y homogéneo del agua; por ello, deben inspeccionarse atentamente, sustituyendo aquellas unidades que se hayan desgastado excesivamente por erosión, causada por una concentración anormal de sólidos disueltos en el agua de circulación.

6.6.5 Mantenimiento del Equipo Mecánico.

Para un eficaz mantenimiento de los equipos mecánicos de

-be prestarse la máxima atención a las normas e instrucciones de lubricación.

a) Motores

a.1) Control de Calentamiento:

El motor está construido para funcionar a unas condiciones óptimas de temperatura. Un calentamiento excesivo y prolongado puede dañar seriamente el motor.

La temperatura máxima a la que puede trabajar sin peligro se indica en la placa del fabricante unida a la carcasa.

Un motor funcionando en condiciones normales se calienta generalmente bastante, de manera que algunas partes pueden observarse calientes por simple contacto, aunque la unidad esté operando dentro de las condiciones normales y límites - garantizados. Sólomente deben revisarse las condiciones de funcionamiento si el total de la temperatura que indica el termómetro excede a la que corresponde al tipo de aislamiento del motor.

Las clases de aislamiento normalmente utilizadas en estos motores son "E", "B" y "F" siendo la más utilizada la clase "E".

Incremento máximo de temperatura para cada clase según norma V.D.E.

Clase "E" ; 75°C.

Clase "B" : 80°C.

Clase "F" : 100°C.

* VDE = Asociación de Electrotécnicos alemanes.

a.2) Lubricación.

La lubricación de los cojinetes de bolas se realiza con grasa saponificada a base de litio.

Los motores se suministran con grasa suficiente para un prolongado periodo de funcionamiento; - como el aceite de la grasa acaba por agotarse o descomponerse es por lo que se hace necesaria una relubricación a intervalos de un año normalmente. Al realizar el reengrase deben seguirse las siguientes normas:

- A) Limpiar el exterior del motor cuidadosamente.
- B) Quitar los tapones de la grasa y del respiradero.
- C) Hay que prestar particular atención a la eliminación de los restos de lubricantes, empleando para ello disolventes evaporizantes. A continuación se evacuarán los cojinetes - mediante aire comprimido.
- D) Reengrasar el motor con un inyector de baja presión, sin introducir demasiada grasa, ya que un exceso puede ocasionar más averías - que una falta de ella. Para un funcionamiento

-to óptimo, tres cuartas partes de la cámara de cojinetes deben estar llenas.

E) Poner en marcha el motor hasta que la grasa nueva fluya por el tapón de vaciado.

F) Volver a colocar los tapones del engrasador y del respiradero.

Para detalles concretos, ver la carta de lubricación anexa.

6.6.6 Ejes de Transmisión.

a) Conservación.

Los ejes de transmisión necesitan limpieza periódica y pintado de superficie después de varios meses de servicio.

b) Lubricación.

Instrucciones Generales:

Los ejes de transmisión poseen puntos de apoyo utilizando cojinetes, los cuáles tienen necesidad de lubricación periódica, para poder rotar sin producir desalineamiento en los acoplamientos; en la lubricación la grasa se suministra a los cojinetes por medio de boquillas de grasa (Nipple) a presión, esta presión no debe ser excesiva por lo que no debe utilizarse en engrasadores a presión accionados por pedal o pistola. Antes de lubricar los cojinetes de apoyo se deben de limpiar cuidadosamente las boquillas de engrase (NIPPLES).

Tipo de Lubrificantes.

Para lubricar las uniones y ranuras se ha de utilizar un

lubricante que cubra las condiciones de trabajo extremas del eje. El lubricante a utilizar no ha de ser demasiado fluído, lo cual daría periodos de relubricado muy cortos, puesto que habría pérdidas de cierta importancia durante el funcionamiento y las paradas.

Tampoco se deben utilizar lubricantes muy viscosos, puesto que obstruirían los largos y estrechos conductos por los que ha de circular y dañarían los cojinetes en poco tiempo.

Para todas las condiciones de trabajo, incluso las más extremas, se empleará una grasa a base de litio que posea un grado de penetración 2 (de 265 a 295 con cono de 150 grados) y un punto de goteo comprendido entre 175 y 185. Los ejes se suministran por el fabricante con grasa a base de litio, por lo cual no debe utilizarse ni mezclarse con grasa a base de sodio debido a la incompatibilidad entre ellas.

Período de Relubricado.

Los ejes deben ser lubricados a intervalos periódicos con el fin de reponer las reservas de grasa, para sustituir el lubricante deteriorado, limpiar la suciedad que haya entrado y mantener engrasadas las boquillas de cierre.

Los periodos de lubricación dependen de las condiciones de trabajo; por ejemplo, fuertes influencias de agua sucia de lluvia y calor ambiente pueden requerir periodos de lubricación más cortos.

Los ejes que hayan estado almacenados durante cierto tiempo

-po deben ser lubricados antes de su instalación,

6,6,7 Reductores.

Si la caja reductora opera en las condiciones adecuadas, no requiere un mantenimiento especial ni una conservación fuera de las indicadas en las instrucciones de lubricación del fabricante.

Para algunos tipos de cajas reductoras deberán seguirse las instrucciones especiales que señale el fabricante correspondiente; aquí se da una parte de las consideraciones a tomar en el mantenimiento.

a) Lubricación.

La unidad no debe trabajar durante mucho tiempo con el lubricante original, por lo cual es recomendable cambiar el aceite después de cinco (5) días de funcionamiento.

Después de vaciada se enjuaga con un aceite de lavar de buena calidad, vaciarla nuevamente y rellenar con el tipo de lubricante con las características adecuadas.

b) Zonas a Lubricar.

Engranajes: a) forzadamente.

Soportes de los ejes: b) por inmersión.

c) Calidad del Aceite.

Se emplearán aceites minerales puros o que lleven productos adicionales que aumenten la solidez de las películas lubricantes expuestas a grandes presiones - (aceites de extrema presión) y en cualquier caso deben

llevar aditivos que impidan la formación de espuma. La temperatura de congelación debe estar por debajo de la temperatura ambiente más baja que se pueda producir.

En función de la temperatura ambiente se dá a continuación las viscosidades en grados Engler:

<u>Temperatura ambiente</u>	<u>Viscosidad</u>
De -10°C. a +10°C.	5 a 6°E.
De +10°C. a +50°C.	9 a 12°E.

d) Control Periódico.

Se recomienda un control periódico del estado de los engranajes, el cual puede realizarse:

1. Superficial:

Examinando el dentado de las ruedas a través del hueco de la tapa.

2. Profundo:

Quitando la tapa principal, examinando el estado de todos los engranajes y soportes, y para ello - es necesario desacoplar el reductor y desmontar - el ventilador.

6.6.8 Ventiladores.

Las aspas del ventilador requieren inspecciones a intervalos de dos meses. Si el ambiente es muy corrosivo y el material de las aspas no es fibra de vidrio reforzada, es necesario realizar una limpieza cuidadosa y aplicar, si - fuese preciso, una doble mano de pintura protectora des-

-pues de un servicio prolongado,

La pintura debe aplicarse con la máxima precaución para conseguir una distribución uniforme y homogénea que no altere el equilibrado de las aspas.

Un problema que puede surgir es el de la formación de incrustaciones sobre las aspas. Si la acumulación de estos depósitos ocasiona una desnivelación en las aspas, puede causar vibraciones perjudiciales en el ventilador.

Para evitar este problema, se observará con especial atención todas las aspas de cada ventilador, una por una, en las revisiones de rutina.

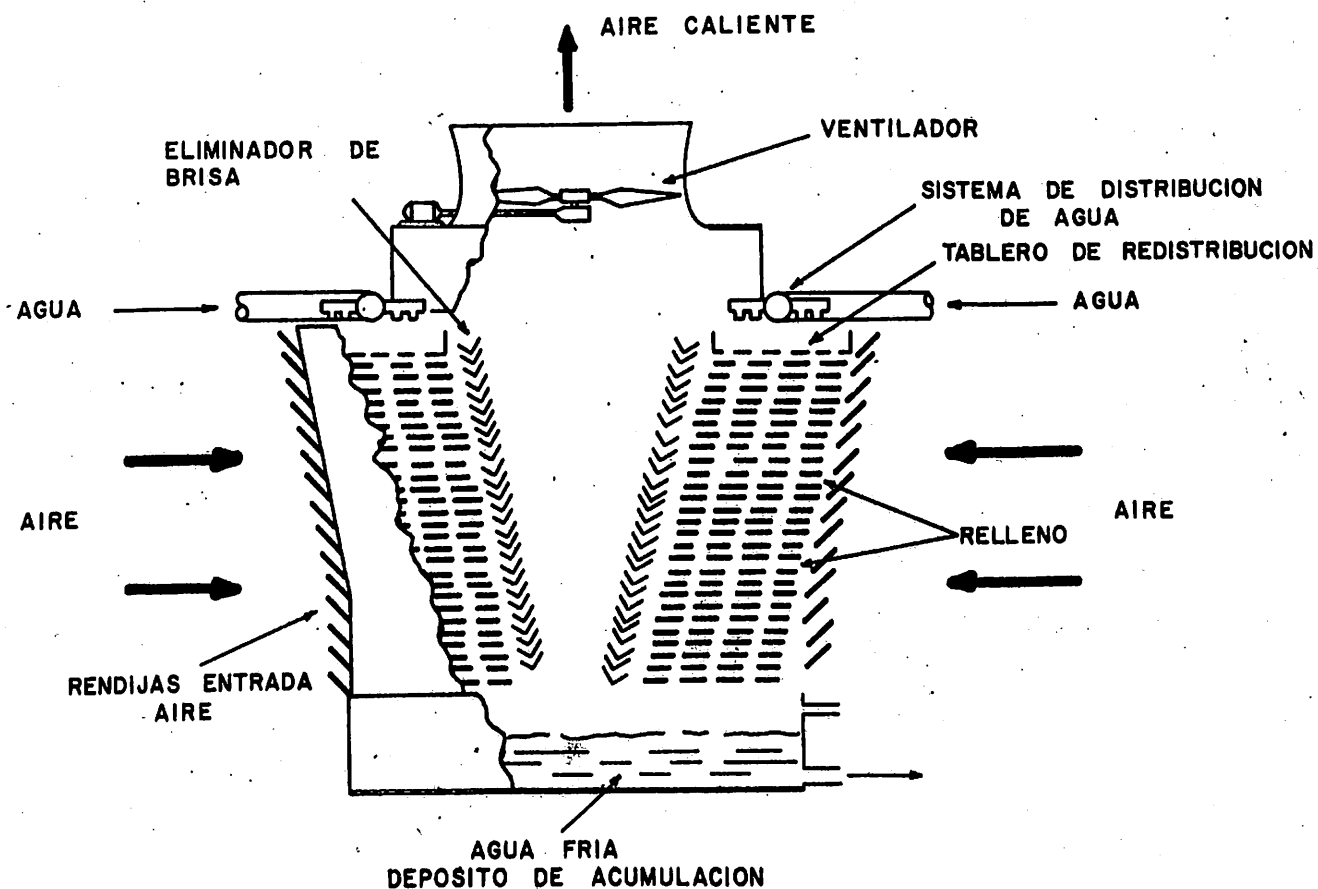
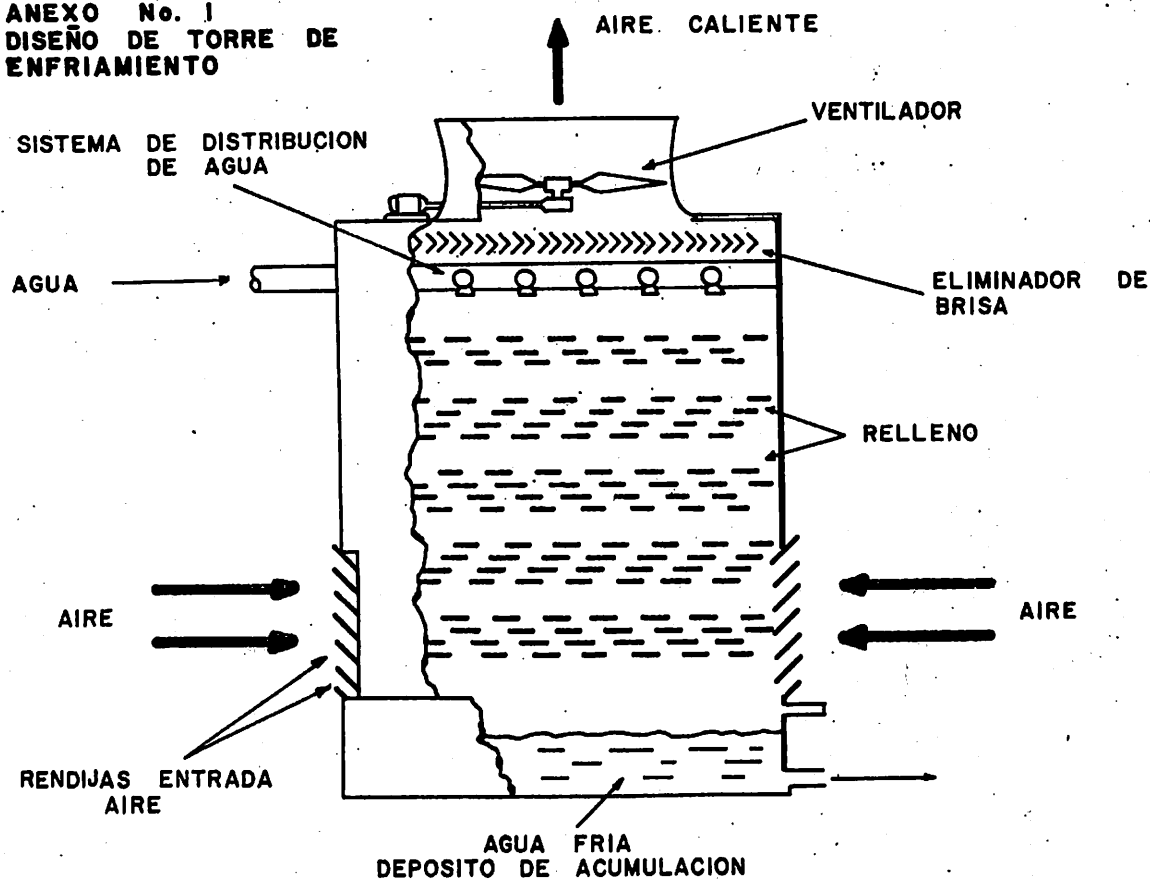
CONCLUSIONES

1. Cuando no se dispone de agua en abundancia con un costo reducido, o de una fuente natural, es preciso utilizar un sistema que la regenere para que nos permita rehusar el agua que ya ha cumplido su función y es por eso de la necesidad de las torres de enfriamiento.
2. El diseño de torres de enfriamiento debe considerar la ubicación en la cual se instalará, puesto que la dirección en la cual se mueve el viento es un factor importante en el buen resultado que se obtenga. Esto significa que debe de realizarse un estudio detallado de las condiciones meteorológicas del lugar dónde se instalará el sistema de enfriamiento evaporativo.
3. El material que se emplee en la construcción de una torre de enfriamiento, debe de poseer propiedades especiales que soporten la acción química corrosiva, a la cual se someten.
4. El método utilizado para el tratamiento del agua, debe de ser estudiado cuidadosamente para lograr que el equipo de transferencia de calor no sufra daños por la acción química, ya sea por corrosión, incrustación y ensuciamiento, y con esto obtener una mayor eficiencia en el sistema, además de mantener al equipo en buenas condiciones.
5. La realización del mantenimiento que se lleve a cabo en una torre de enfriamiento, debe de ser programado eficientemente, para lograr un buen funcionamiento del equipo y no interrumpir con la operación de éste, eliminando las posibilidades de avería.

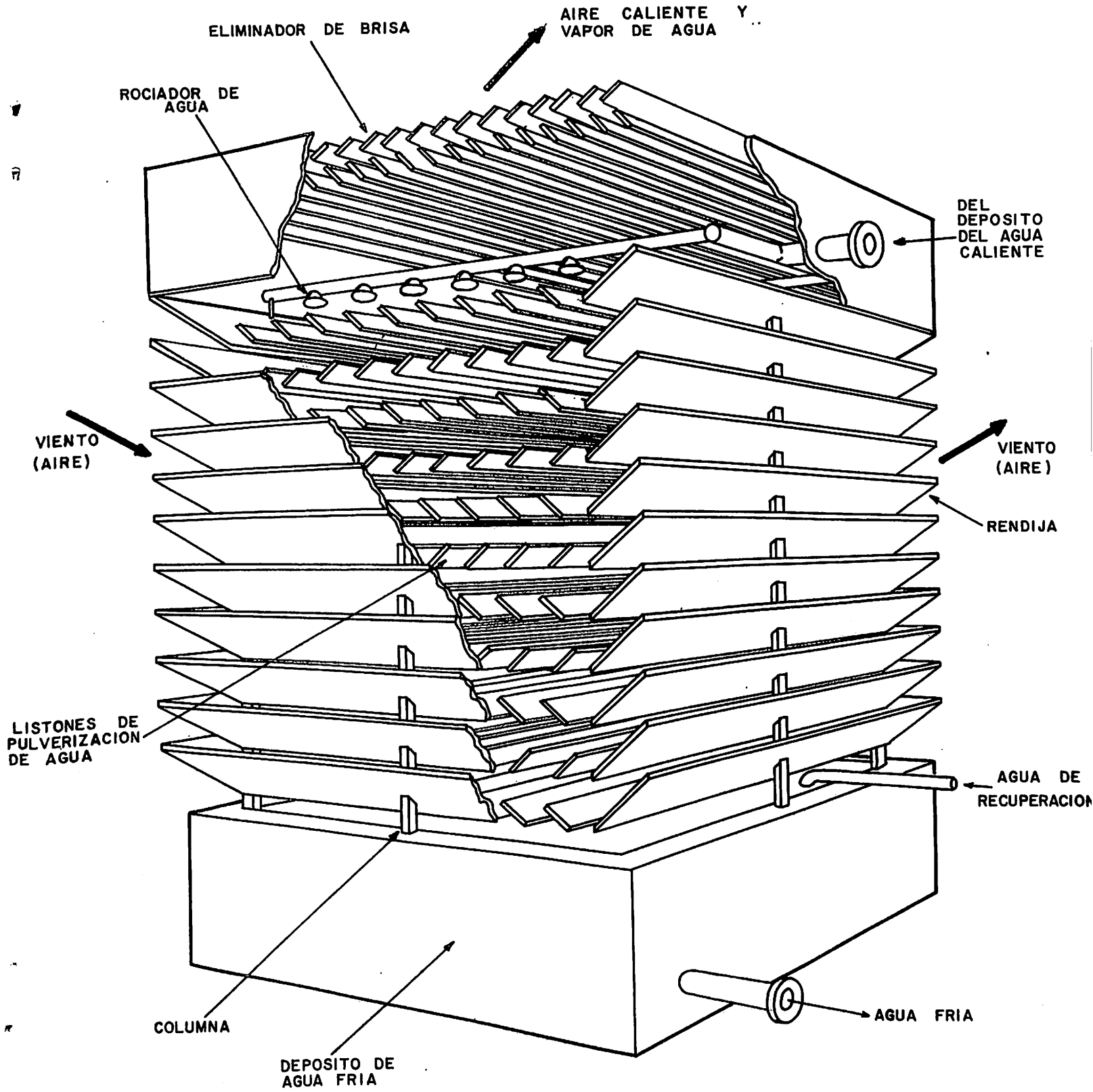
RECOMENDACIONES

1. La persona que se encargue de la realización del diseño de una torre de enfriamiento, debe de poseer conocimientos teóricos y - prácticos de estos, además de tener estudios de termodinámica, para lograr visualizar de mejor forma lo que se está realizando.
2. Cuando se diseñe una torre, hay que considerar las condiciones - climatológicas del lugar donde se coloque ésta, para obtener una mayor eficiencia.
3. La persona que se encargue de la operación de una torre de enfriamiento, debe ser convenientemente entrenada siguiendo el periodo de la instalación así como la puesta en servicio.
4. El personal de mantenimiento que estará a cargo, deberá seguir acuciosamente los manuales de operación y mantenimiento, del fabricante de cada parte de la torre.

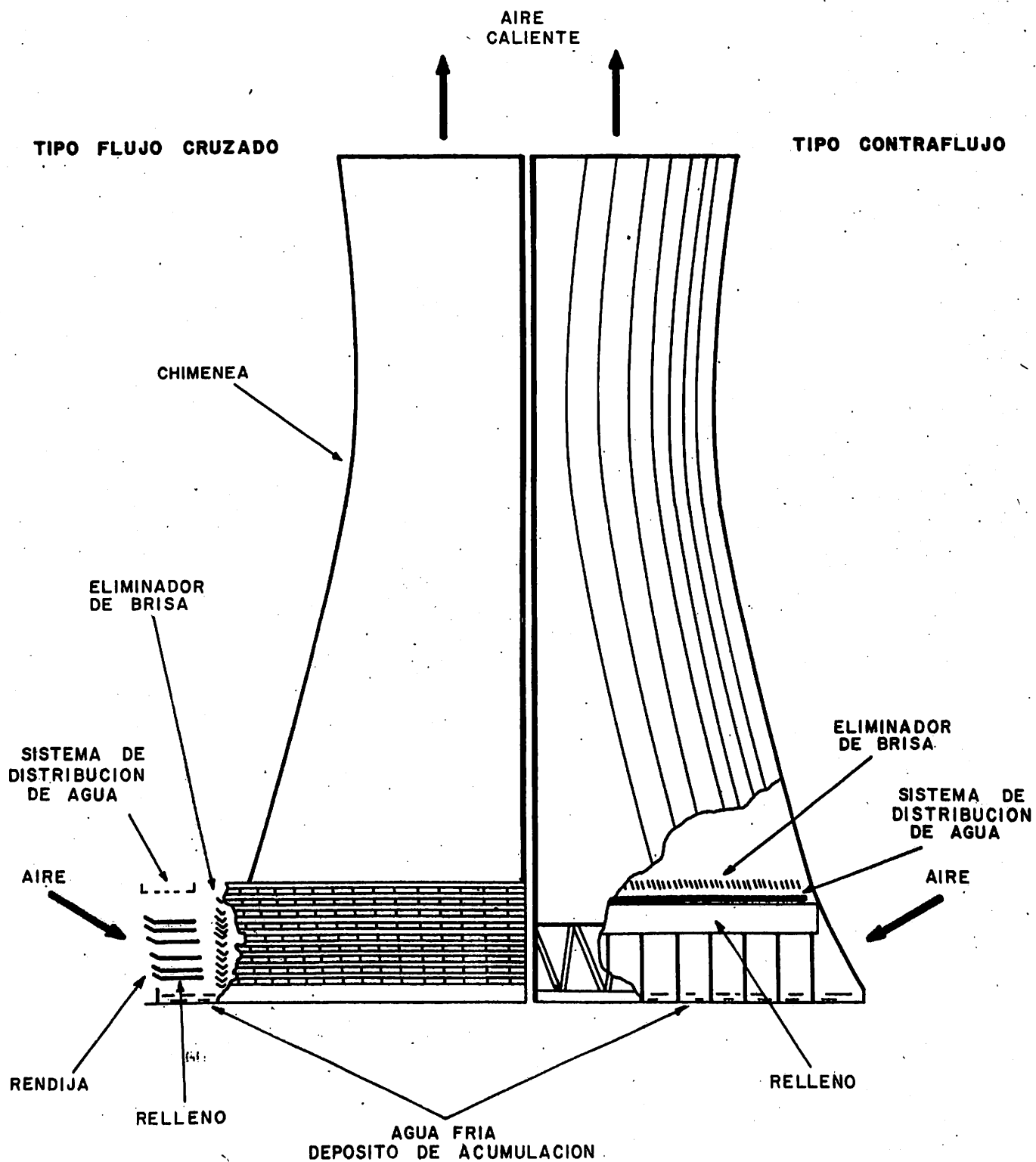
**ANEXO No. 1
DISEÑO DE TORRE DE
ENFRIAMIENTO**



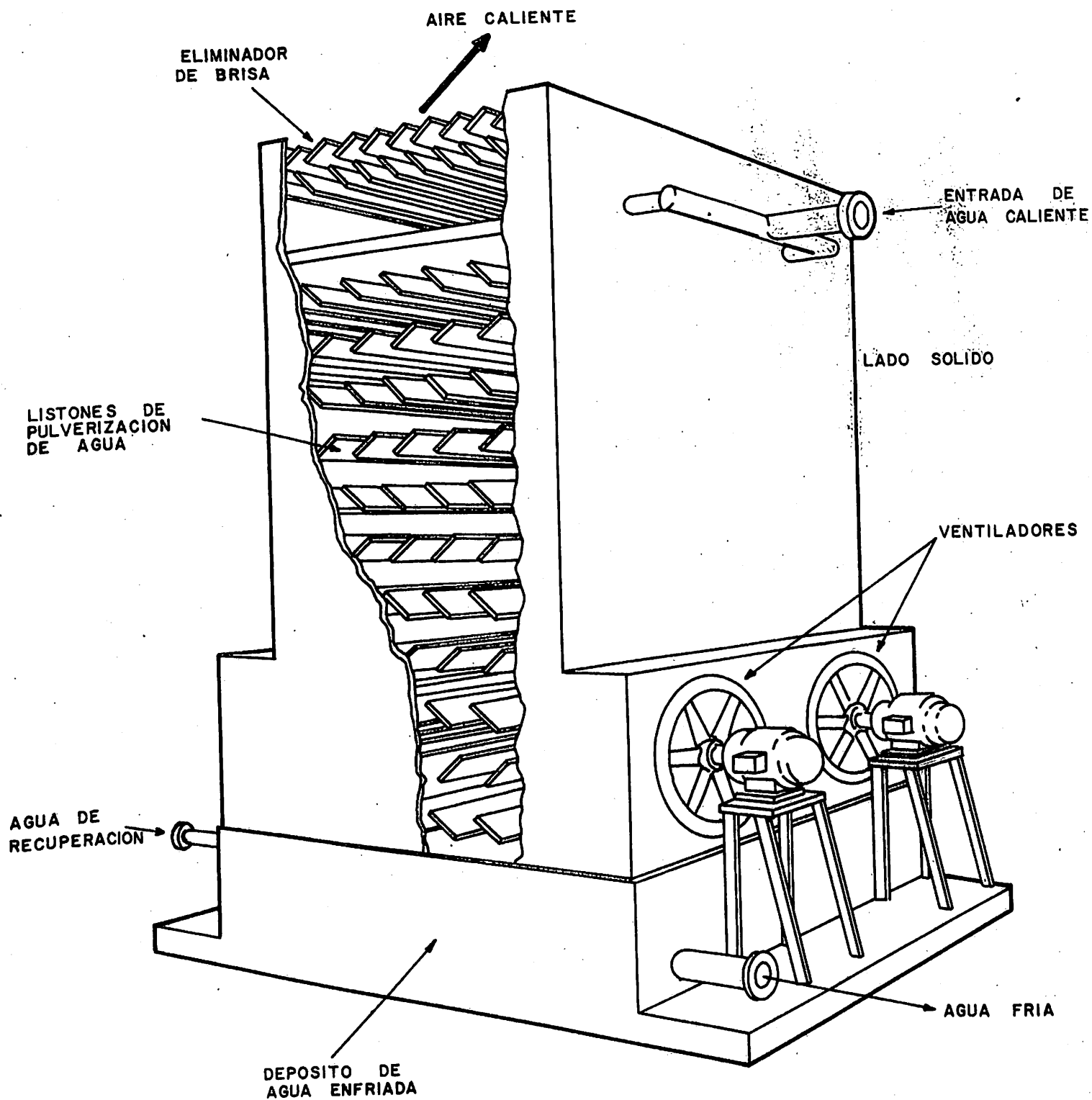
ANEXO No. 2
TORRE DE ENFRIAMIENTO ATMOSFERICA



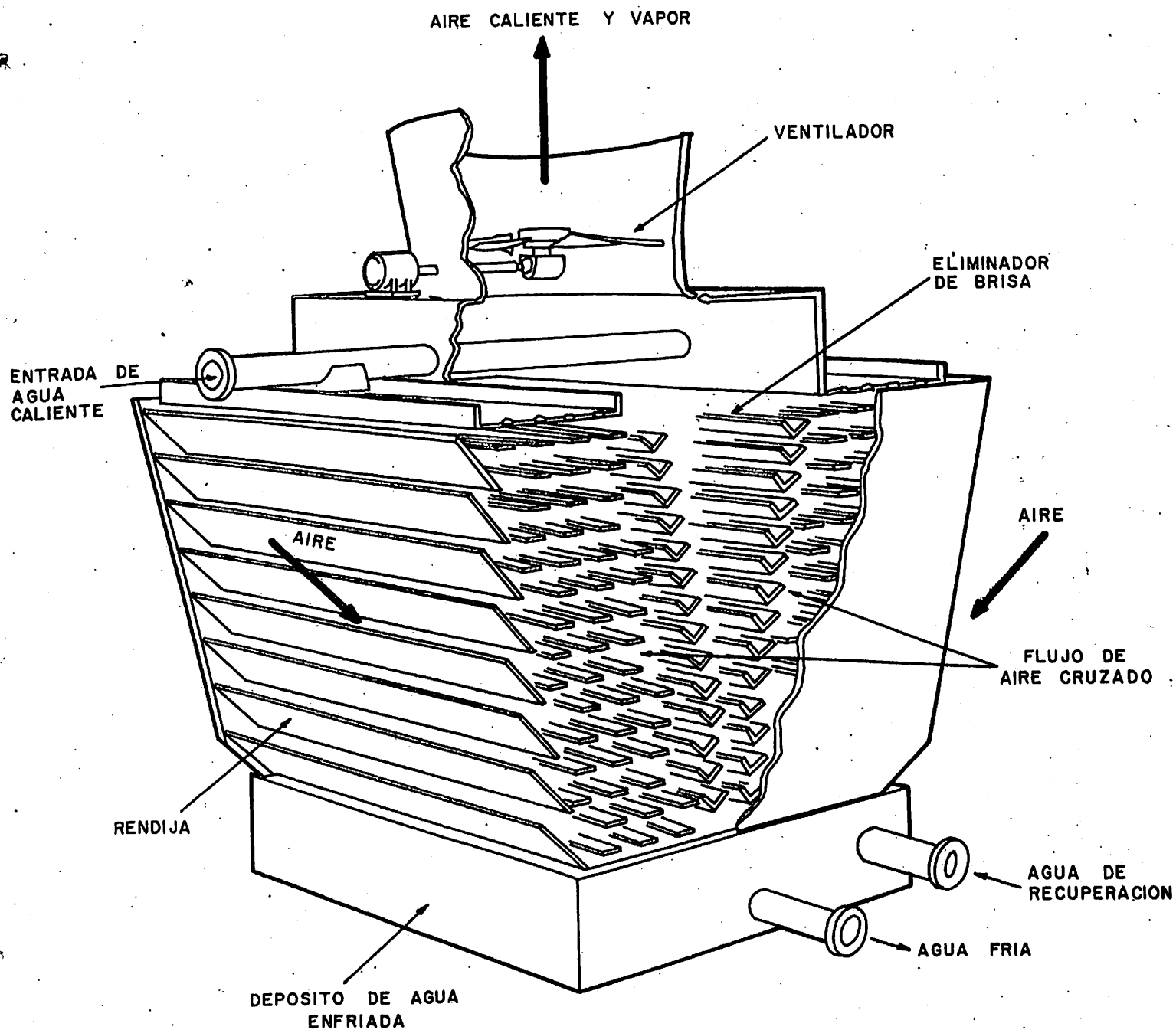
ANEXO No. 3
TORRE DE ENFRIAMIENTO HIPERBOLICA

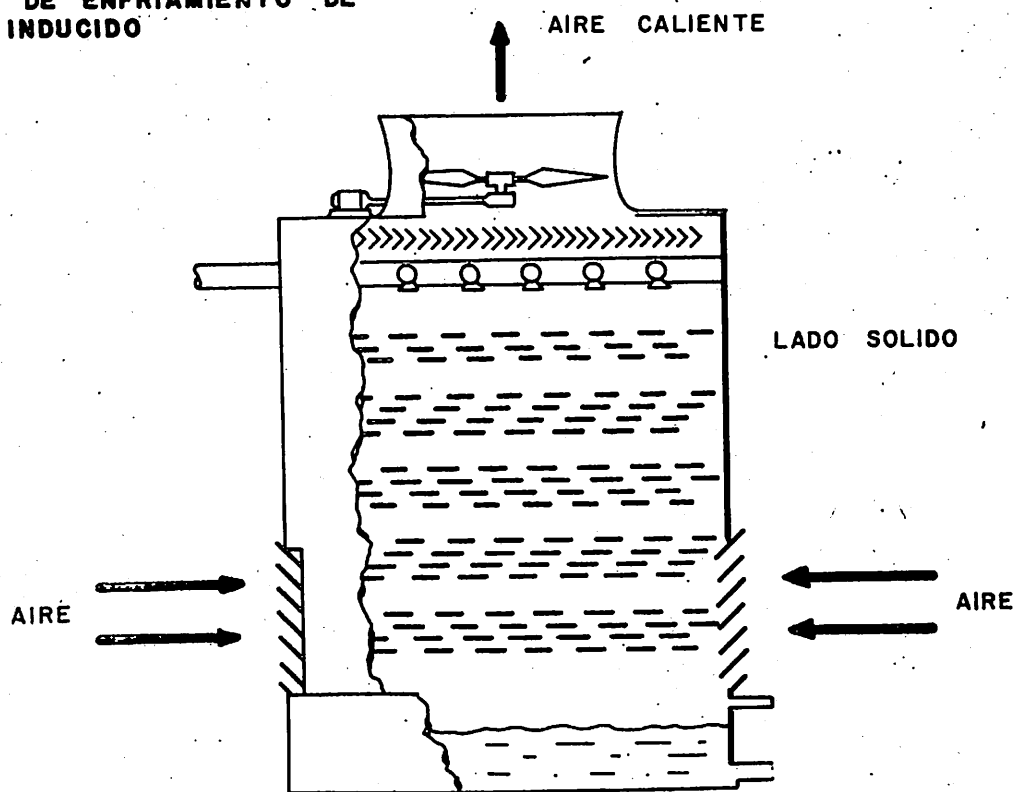


ANEXO No. 4
TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO

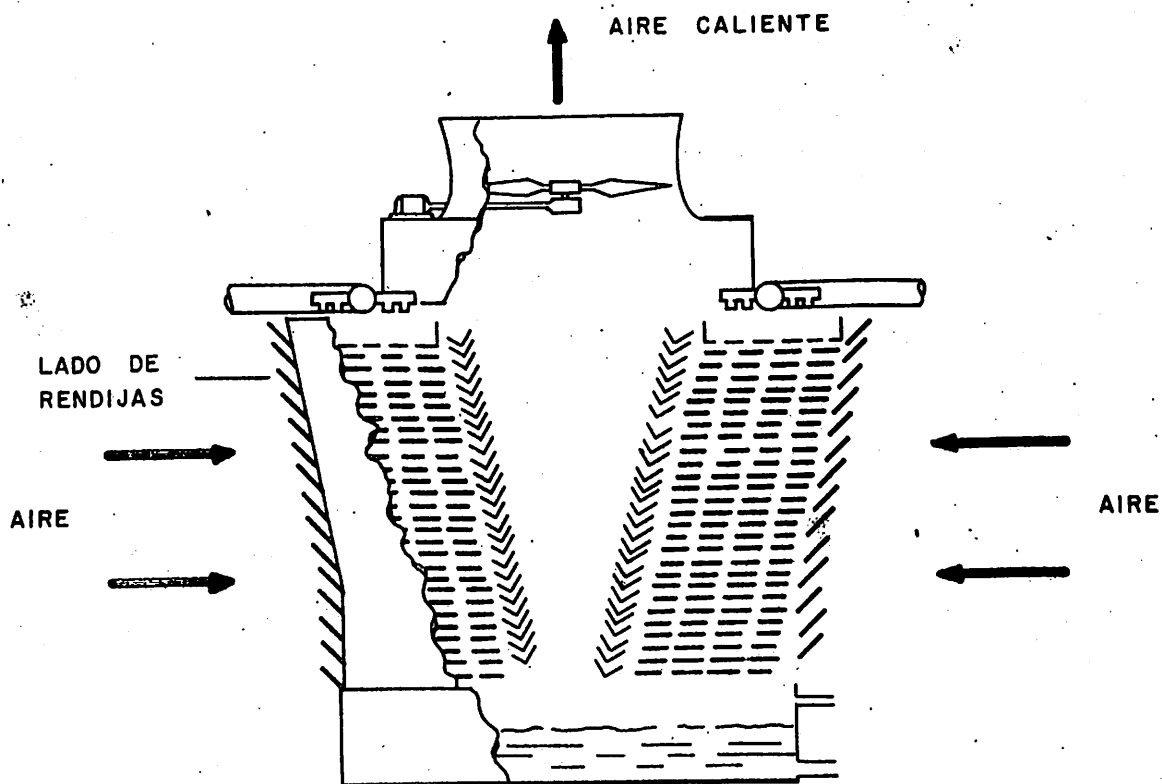


ANEXO No. 5
TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO





A. CONTRAFLUJO



B. FLUJO CRUZADO

REFERENCIAS

- Revista, National Engineer, oct. 1975,
Cooling Towers.
- Revista, Chemical Engineering, oct. 1978,
Materials Engineering Forum.
- Revista, Chemical Engineering, january 1978,
Operation & Maintenance.
- Revista, Power, Special Report, march 1973,
Cooling Towers.
- Revista, Chemical Engineering Progress
Vol 71 No.7, july 1975,
Cooling Tower Drift Elimination.
- Revista, Energie.
Vol 23, oct. and nov. 1971,
Dry Cooling Eliminates Thermal Pollution.
- Revista, Heating, Piping, Air Conditioning,
Vol 53 No. 10, oct. 1981,
Cooling Tower Energy.

BIBLOGRAFIA

- Aire Acondicionado y Refrigeración.
Jennings Lewis.
Editorial CECSA.
- Transferencia de Calor.
José Manrique.
Editorial LIMUSA.
- Termodinámica.
Manrique & Cárdenas.
Editorial HARLA.
- Introducción a la Termodinámica.
Sontag Van Wylen.
Editorial LIMUSA.
- La Producción de Energía mediante vapor de agua, el aire y los gases.
W.H. Servens; H.E. Degler; J.C. Miles.
Editorial REVERTE, S.A.
- Manual de Mantenimiento Industrial.
L.C. Morrow.
Editorial CECSA.
- Manual del Ingeniero Químico.
John H. Perry.
Editorial UTEHA.
- Procesos de Transferencia de calor.
Donald Q. Kern.
Editorial CECSA.
- Centrales de Vapor.
G.A. Gaffert.
Editorial REVERTE, S.A.
- Steam Plant Operation.
Everett Woodruff & Herbert Lammers.
Editorial McGraw Hill.

BIBLIOTECA CENTRAL
USAC



4701116502