

8
27



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ZARAGOZA"

Estudio Técnico Comparativo de los Materiales de Construcción para Torres de Enfriamiento de Proceso

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:

Ingeniero Químico

P R E S E N T A N:

HUGO MARX BRACHO

ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ

México D.F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1989



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

Pág.

CAPITULO I

I N T R O D U C C I O N	1
-------------------------------	---

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS DE TORRES DE EMPRIAMIENTO

2.1 Humidificaci3n	3
2.2 Cartas Psicrom3tricas	17

CAPITULO III

EQUIPO DE EMPRIAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE AIRE

3.1 Enfriamiento de agua por medio de aire	26
3.2 El estanque de enfriamiento	27
3.3 El estanque con aspersores	28
3.4 Torres con ventilaci3n por viento	29

	Pág.
3.5 Torres de tipo natural	31
3.6 Torres de tiro mecánico	35

CAPITULO IV

FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

4.1 Transferencia de calor por contacto directo e indirecto	42
4.2 Diseño de torres de enfriamiento	43
4.3 Aplicación del modelo matemático para el diseño de torres de enfriamiento	59
4.4 Metodología de diseño comúnmente usada por los fabricantes de torres de enfriamiento .	69
4.5 Selección de torres de enfriamiento	87
4.6 Especificaciones generales para torres de enfriamiento	89
4.7 Sistemas de control de torres de enfriamiento	94

CAPITULO V

MATERIALES DE CONSTRUCCION PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

5.1 La madera en las torres de enfriamiento ...	96
5.2 Metales para maquinaria y tubería	97

5.3 Plásticos y asbesto-cemento	105
5.4 El concreto en las torres de enfriamiento.	112
5.5 Equipo auxiliar de torres de enfriamiento y su material de construcción	116
5.6 Reductores y motores	116
5.7 Aspas de ventilador	117
5.8 Soportes de acero estructural	120
5.9 Factores a considerar para la selección de materiales de construcción de torres de en- friamiento	121
5.10 Clasificación de las torres de enfriamien- to y sus materiales de construcción	124
5.11 Relación entre mantenimiento y materiales de construcción de torres de enfriamiento	126
5.12 Análisis de costo en relación al manteni- miento químico y los materiales de cons- trucción en torres de enfriamiento.....	131
ANEXO "A"	134
ANEXO "B"	137
CONCLUSIONES	139
CITAS BIBLIOGRAFICAS	141
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	143

OBJETIVOS .-

1. Describir los principales aspectos en el diseño, selección y especificación de torres de enfriamiento.
2. Establecer una comparación técnica de los materiales de construcción en torres de enfriamiento.

CAPITULO

I

INTRODUCCION

C A P I T U L O I

I N T R O D U C C I O N

Es innegable que el uso de las torres de enfriamiento ha crecido en el Área de servicios auxiliares en los últimos veinte años.

En muchas plantas industriales, el agua fría es muy escasa de manera que no se permite su uso ilimitado como medio de enfriamiento.

El problema de suministrar suficiente agua superficial y de subsuelo con fines de enfriamiento, ha crecido al grado que las nuevas plantas a menudo se les requiere, desarrollar un uso continuo de las cantidades limitadas de agua que puedan obtener de fuentes públicas o privadas.

La escasez de agua y la contaminación térmica, tienden a hacer de las torres de enfriamiento, un equipo vital en muchas plantas de la industria química.

Estas y muchas razones, hacen necesario que el ingeniero químico, deba conocer los aspectos más importantes en el diseño, selección y especificación de este sistema de enfriamiento.

Paralelamente a este, y como un factor importante para la selección de torres de enfriamiento, la industria química ha desarrollado nuevos materiales, básicamente del tipo polimérico, los cuales han sustituido gradualmente a la made-

ra o al acero como materiales de construcción y/o relleno de estos equipos, y que debido a sus propiedades, los hacen también más eficientes que los otros, desde el punto de vista de -- mantenimiento, resistencia, operación y costo.

CAPITULO

2

FUNDAMENTOS TEORICOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

C A P I T U L O I I

FUNDAMENTOS TEORICOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

HUMIDIFICACION.-

La humidificación, constituye uno de los casos más sencillos, en los cuales se lleva a cabo la transferencia simultánea de calor y masa. En ella, solamente están involucradas dos fases, dos componentes, la fase líquida, que casi siempre es agua, la cual es un componente sencillo y la fase gaseosa, que consiste en gases no condensables (generalmente aire), y en los que la fase líquida se encuentra presente en estado de vapor.

Como vemos, en todas las operaciones que involucran transferencia simultánea de calor y masa, la dirección y amplitud de esta transferencia se encuentra controlada por las condiciones de equilibrio hacia las cuales les tiende la misma.

Las ecuaciones que relacionan las concentraciones de equilibrio de las dos fases, ya se han estudiado ampliamente y se encuentran en los textos de termodinámica.⁽¹⁾

Aplicando las leyes del gas ideal, tanto el aire como el vapor de agua, tal como en realidad sucede, tendremos en el equilibrio las siguientes relaciones:

$$P_{H_2O}^{\circ} = P_T \hat{Y}_{H_2O} = \hat{P}_{H_2O} \quad (2.1)$$

Ahora bien:

$$\frac{\hat{P}_{H_2O}}{P_{Aire}} = \frac{N_{H_2O}}{N_{Aire}} = \frac{P_{H_2O}^{\circ}}{(P_T - P_{H_2O}^{\circ})} = \hat{Y}_{SAT} \quad (2.2)$$

Donde:

\hat{Y}_{SAT} : Relación molar del componente volátil en el gas.

$P_{H_2O}^{\circ}$: Presión de vapor del componente volátil.

P_{Aire} : Presión parcial del gas.

P_T : Presión total ejercida por la mezcla.

\hat{Y}_{H_2O} : Fracción molar del componente volátil.

\hat{P}_{H_2O} : Presión parcial del componente volátil.

N_{H_2O} : Número de moles del componente volátil.

N_{Aire} : Número de moles del gas.

Hay pues un límite en la cantidad de vapor que puede pasar a la fase gaseosa y éste está dado por la presión de vapor del líquido puro.

Un gas en contacto con un líquido volátil que contiene menor cantidad de vapor por el correspondiente al equilibrio, se dice que está saturado parcialmente; - si la fase líquida sigue presente, al no estar en equilibrio hará que el líquido tienda a evaporarse.

Las condiciones de la fase en mezclas gas - vapor - se aprecian convenientemente en un diagrama concentración - v.s. temperatura, graficando para una sola presión constante, ver figura (2.1).

En este diagrama, la concentración del gas saturado, se grafica contra la temperatura, partiendo de datos que, en su mayor parte, han sido obtenidos experimentalmente. (2)

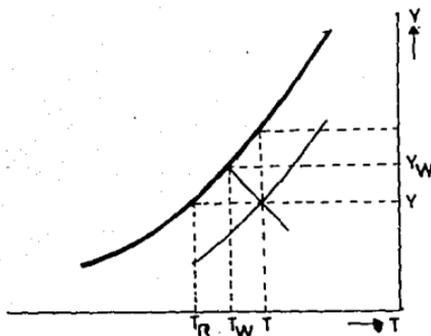


Fig. (2.1)

SATURACION PORCIENTO.-

La saturación por ciento, también conocida como humedad porcentual, es la relación entre humedad existente en la masa gaseosa y la que existiría si estuviera saturada:

$$\hat{Y}_P = \frac{100 \hat{Y} \frac{M_{H_2O}}{M_{Aire}}}{\hat{Y}_{SAT} \frac{M_{H_2O}}{M_{Aire}}} = 100 \frac{\hat{Y}}{\hat{Y}_{SAT}} \quad (2.3)$$

Donde:

\hat{Y}_P : Saturación por ciento.

\hat{Y} : Relación molar de vapor a gas presente.

\hat{Y}_{SAT} : Relación molar en la saturación.

M: Pesos moleculares de vapor y gas.

SATURACION RELATIVA:-

Una expresión de concentración optativa es la saturación o humedad relativa, que es el cociente entre la presión parcial del vapor y la presión de éste en la saturación:

$$\hat{V}_R = \frac{100 \hat{P}_{H_2O}}{(\hat{P}_{H_2O})_{SAT}} \quad (2.4)$$

Donde:

\hat{V}_R : Saturación o humedad relativa.

La saturación relativa, es la medida normalmente empleada para reportar los datos climatológicos.

Para la mayor parte de los sistemas de importancia industrial, la fase gaseosa está diluida,-

la presión es baja y sigue la ley de Raoult, entonces las ecuaciones (2.3) y (2.4) se ven modificadas y se pueden expresar en términos de presión de vapor y presiones parciales; así tenemos:

$$Y_P = \frac{\frac{\hat{P}_{H_2O}}{P_T - \hat{P}_{H_2O}}}{\frac{P_{H_2O}^o}{P_T - P_{H_2O}^o}} \quad (2.5)$$

$$Y_R = \frac{\hat{P}_{H_2O}}{P_{H_2O}^o} \quad (2.6)$$

En los cálculos de humidificación, es necesario conocer con frecuencia el calor húmedo y el volumen húmedo de la fase vapor-gas.

CALOR HUMEDO.-

El calor húmedo, no es más que las BTU necesarias para incrementar la temperatura de una libra de aire seco más el agua que éste pueda contener a 1° F.

Para el rango de temperatura que comúnmente se maneja en el proceso agua-aire, el calor específi-

ce del aire seco y el vapor de agua se pueden tomar como constantes e iguales a 0.24 y 0.46 BTU/lbF. - respectivamente, entonces por definición:

$$C_s = 0.24 + 0.46\bar{Y} \quad (2.7)$$

En donde:

C_s : Calor húmedo.

\bar{Y} : Humedad másica absoluta, que no es otra cosa que la relación de masa vapor y masa gas presente en el gas húmedo y que se expresa como:

$$\bar{Y} = \frac{\hat{P}_{H_2O}}{P_T - \hat{P}_{H_2O}} \left[\frac{18}{29} \right] \quad (2.8)$$

Donde:

18 y 29, son los pesos moleculares del agua en forma de vapor y del aire, respectivamente.

VOLUMEN HUMEDO.-

El volumen húmedo es otro dato importante en los cálculos de humidificación, y es el volumen de la unidad de masa del aire, más el volumen de todo

el vapor que contenga el gas a la presión y a la temperatura que se encuentre el sistema, se define matemáticamente como:

$$V_H = \left[\frac{1}{M_{\text{Aire}}} + \frac{\bar{Y}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \frac{RT}{P_T} \quad (2.9)$$

Donde:

V_H : Volumen húmedo.

R : Constante de los gases en unidades consistentes.

T : Temperatura del sistema.

P_T : Presión en el sistema.

Si analizamos esta ecuación, podemos observar lo siguiente:

Para el aire seco, $\bar{Y} = 0$ entonces V_H se transforma en el volumen específico del aire seco.

De la ecuación (2.3), tenemos que:

$$\bar{V} = \frac{\bar{V}_{\text{SAT}} \hat{V}_P}{100} \quad (2.10)$$

Si sustituimos esta ecuación en (2.9) obtenemos:

$$V_H = \left[\frac{1}{M_{\text{Aire}}} + \frac{Y_{\text{SAT}} Y_P}{100(M_{\text{H}_2\text{O}})} \right] \frac{RT}{P_T} \quad (2.11)$$

De aquí que para el aire saturado $Y_P=100$,
debido a que $Y = Y_{\text{SAT}}$ y V_H se convierte en el volu-
men saturado.

TEMPERATURA DE BULBO SECO.-

La temperatura del bulbo seco, es la tem-
peratura común que se utiliza para los gases. (3)

Para una operación de humidificación se de-
fine, más propiamente, como la temperatura que ten-
dría el aire antes del equilibrio dinámico obtenide-
por la transferencia simultánea de calor y masa.

TEMPERATURA DE ROCIO.-

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

TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.-

La temperatura de bulbo húmedo, es la temperatura de equilibrio dinámica obtenida por una superficie de agua, cuando la velocidad de transferencia de calor por convección a la misma superficie, igual a la velocidad de transferencia de masa que se aleja de la misma.

Estando en equilibrio y suponiendo un cambio despreciable en la temperatura del bulbo seco, el balance en la superficie es:

$$K_G \lambda (P_{H_2O}^o - \hat{P}_{H_2O}) = H_C (T_{BS} - T_{BH}) \quad (2.12)$$

Donde:

K_G : Coeficiente de transferencia de masa
(lb/hft² atm).

λ : Calor latente de evaporación (BTU/lb)

$P_{H_2O}^o$: Presión de vapor del agua a T_{BH} . (atm)

\hat{P}_{H_2O} : Presión parcial del agua en el ambiente (atm).

H_C : Coeficiente de transferencia de calor
(BTU/hft F)

T_{BS} : Temperatura de Bulbo seco. (F)

T_{BH} : Temperatura de bulbo húmedo (F).

En condiciones ordinarias, la presión parcial y la de vapor son pequeñas en compara--

sión con la presión total y la ecuación (2.12) se escribe expresándola como diferencia de humedades.

$$\bar{Y}_{SAT} - \bar{Y} = \frac{H C}{\lambda K'} (T_{BS} - T_{BH}) \quad (2.13)$$

En donde:

$K' = \text{lb/hft}^2$ (unidad de diferencia de humedades) y es igual a:

$$\frac{\text{Peso Mol de Aire}}{\text{Peso Mol de Agua}} \cdot K_G = 1.6 K_G$$

Uno de los métodos más antiguos y que permanece en la actualidad como el más usual para medir la humedad de una corriente gaseosa, es precisamente la determinación de la temperatura de bulbo húmedo de una corriente gaseosa conjuntamente con la temperatura del gas en sí (temperatura de bulbo seco).

Esto se hace obligando al gas a pasar rápidamente sobre el bulbo de un termómetro que se mantiene húmedo con el líquido que se forma por condensación del vapor presente en la corriente gaseosa. El dispositivo se presenta en la figura (2.2).

Durante este proceso, si el gas no está saturado, algo del líquido se evapora, de la cami-

sa saturada,, hacia la corriente gaseosa en movimiento, -
transportando con él, calor latente asociado.

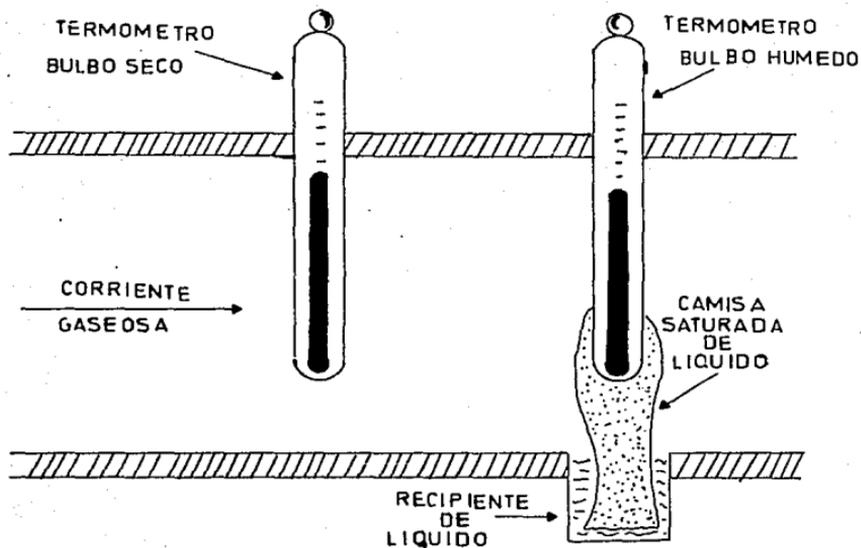


Fig. (2.2) Determinación de la temperatura de bulbo Húmedo.

El retiro del calor latente da como resultado un descenso en la temperatura del bulbo del termómetro y en su camisa, por lo que se transferirá calor sensible hacia la superficie de la camisa, por convección precedente de la corriente gaseosa. En el estado estable, el flujo neto de calor hacia la camisa será cero y la temperatura permanecerá constante.

La temperatura del bulbo húmedo, es la temperatura a la que se puede llegar en el estado estable, por el termómetro expuesto a un gas que se mueve rápidamente, de modo que las lecturas del termómetro no se ven afectadas por la radiación ni la conducción del calor a lo largo de las varillas del mismo, pero no demasiado elevada para que el calentamiento por fricción sea insignificante. (4)

Por consiguiente, la temperatura del bulbo seco, es igual a la temperatura del gas que se acerca y la temperatura del bulbo húmedo es igual a la temperatura de la parte exterior de la camisa.

De esta forma la preparación de transferencia de calor hasta la camisa es:

$$Q = H C A (T_{BS} - T_{BH})$$

(2.14)

Y la proporción de transferencia de masa desde la camisa es:

$$N_A = K_G A (P_{H_2O}^o - \hat{P}_{H_2O}) \quad (2.15)$$

En el estado estable, todo el calor transferido hacia la camisa se utiliza para vaporizar N_A moles de agua, o sea:

$$Q = N_A \lambda \quad (2.16)$$

Lo cual expresa, la condición de que la proporción de transferencia de calor sensible hacia la camisa, es exactamente igual a aquella del calor latente transportado desde la camisa mediante la masa N_A , combinando las ecuaciones (2.14), (2.15) y (2.16), tenemos:

$$H_C A (T_{BS} - T_{BH}) = K_G A (P_{H_2O}^o - \hat{P}_{H_2O}) \lambda \quad (2.17)$$

Dividiendo entre el área y reorganizando:

$$K_G \lambda (P_{H_2O}^o - \hat{P}_{H_2O}) = H_C (T_{BS} - T_{BH}) \quad (2.12)$$

TEMPERATURA DE SATURACION ADIABATICA.-

Otro término que se maneja en los procesos de humidificación es la temperatura de saturación adiabática e líneas de entalpía constante.

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

$$\hat{V}_{SAT} - \hat{V} = -\frac{C_s}{\lambda} (T_{BS} - T_{SAT}) \quad (2.18)$$

Si dividimos la ecuación (2.13) por la (2.18), tenemos:

$$1 = \frac{H_C}{K' C_s} \left[\frac{T_{BS} - T_{BH}}{T_{BS} - T_{SAT}} \right] \quad (2.19)$$

La razón $\frac{H_C}{K' C_s}$ es la razón de Lewis,

también llamada razón de psicrometría, de la cual se ha demostrado experimentalmente que para sistemas aire-agua su valor es aproximadamente igual a la unidad. (5)

En estas condiciones, las temperaturas de bulbo húmedo y la de saturación adiabática son más o menos iguales y se utilizan de igual manera.

De la ecuación (2.19), si $\frac{H_c}{K^*C_s} = 1$,

tenemos:

$$T_{BS} - T_{BH} = T_{BS} - T_{SAT} \quad (2.20)$$

De donde:

$$T_{BH} = T_{SAT}$$

La diferencia entre la temperatura de saturación adiabática y la de bulbo húmedo aumenta al incrementarse la humedad pero este efecto no es de importancia para la mayoría de los cálculos de ingeniería. (5)

CARTAS PSICROMÉTRICAS.-

(CARTAS DE HUMEDAD)

Un diagrama conveniente, que muestra las propiedades de mezclas de un gas insoluble y un vapor condensable es la llamada carta de humedad. En-

las figuras (2.3), (2.4) y (2.5), se presentan gráficas para el sistema aire-vapor de agua correspondientes a las gamas de temperaturas bajas, intermedias y altas respectivamente, para presión de una atmósfera, y en la figura (2.6), se muestra una carta de Grosvenor, que es la más famosa para el ingeniero químico.

Estas cartas están calculadas para presiones absolutas. En ellas, las temperaturas están graficadas sobre el eje de las abscisas y las humedades en el de las ordenadas.

Cualquier punto sobre la carta representa una mezcla definida de aire-vapor.

La línea curva marcada con el 100%, da la humedad del aire saturado como función de la temperatura del aire. Mediante los datos de presión de vapor del agua, las coordenadas de los puntos sobre esta línea se encuentran por la aplicación de la ecuación (2.8).

Cualquier punto arriba y a la izquierda de la línea de saturación, representa una mezcla de aire saturado y agua líquida. Esta región es importante únicamente para determinar la formación de la niebla. Cualquier punto abajo de la línea de saturación, representa un aire insaturado y un punto sobre el eje de las temperaturas representa aire seco.

Las líneas curvas entre la línea de saturación y el eje de las temperaturas, marcadas en porcentaje, representan mezclas de aire y agua de humedad relativa definida.

Como lo muestra la ecuación (2.4), la interpolación -

lineal entre la línea de saturación y el eje de temperaturas - puede ser usado para localizar las líneas constantes de humedad relativa.

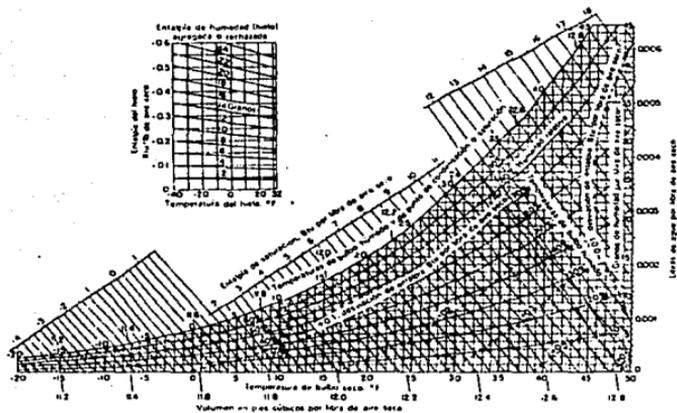


Fig. (2.5) Carta psicrométrica de temperaturas bajas.

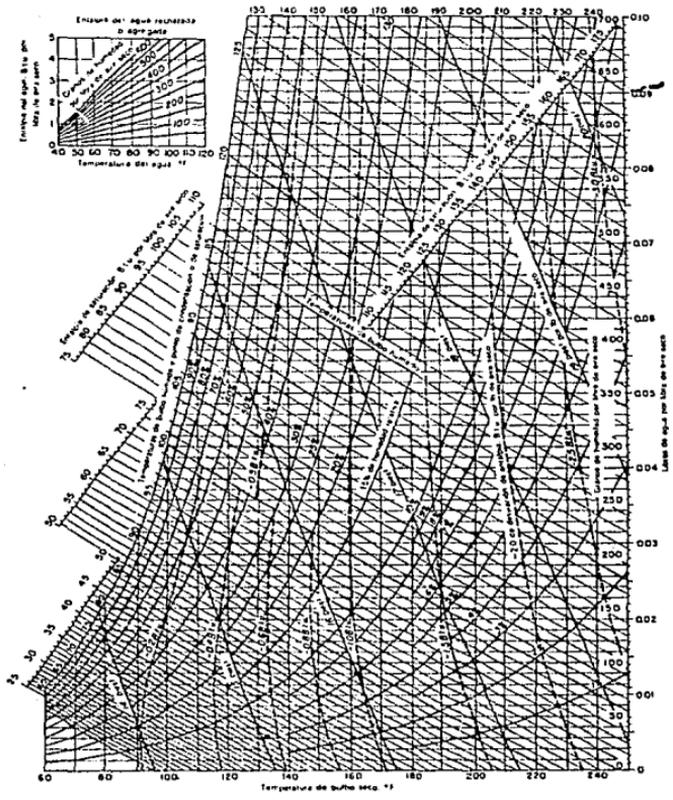


Fig.(2.5) Carta psicrométrica de temperaturas elevadas.

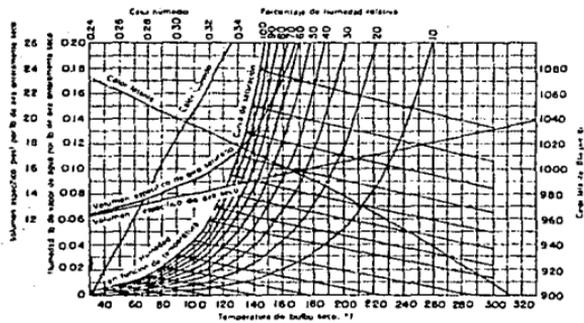


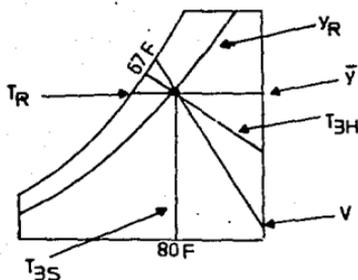
Fig.(2.6) Carta de humedad de Grosvenor.

USO DE CARTAS PSICROMÉTRICAS.-

Para ilustrar el uso de las cartas psicrométricas se presentan a continuación algunos ejemplos:

Ejemplo 1. Encontrar las propiedades de un aire húmedo cuando la temperatura de bulbo seco es 80°F ., y la de bulbo húmedo es de 67°F .

Solución. La carta de temperaturas intermedias es la más útil en este caso, refiriéndonos a la figura (2.4):



Contenido de humedad = $Y = 0.011 \text{ lb H}_2\text{O}/\text{lb Aire seco}$.

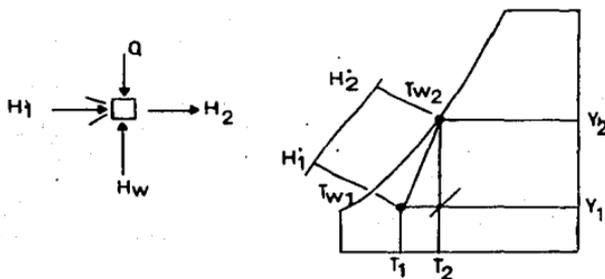
Volumen específico = $v = 13.8 \text{ ft}^3/\text{lb Aire seco}$.

Humedad relativa = $Y_R = 51\%$.

Punto de rocío = $T_R = 60.3^{\circ}\text{F}$.

Ejemplo 2. Determinar el consumo de agua y la cantidad de calor disipado por 1000 ft³/min. de aire de entrada a 90°F. de temperatura de bulbo seco y 70°F. de bulbo húmedo cuando el aire sale saturado a 110°F., y el agua de reemplazo tiene una temperatura de 75°F.

Solución. La trayectoria seguida es la siguiente:



Humedad de salida = $Y_2 = 0.059$ lbH₂O/lb Aire seco.

Humedad de entrada = $Y_1 = 0.011$ lbH₂O/lb Aire seco.

Humedad agregada = $Y = 0.048$ lbH₂O/lb Aire seco.

Entalpía de la humedad agregada:

$$H_w = (0.048)(1)(75-32) = 2.08 \text{ BTU/lb Aire seco.}$$

Entalpía del aire de salida:

$$H_2 = 92.33 \text{ BTU/lb Aire seco.}$$

Entonces el calor disipado:

$$Q_D = H_2 - H_1 - H_w = 56.34 \text{ BTU/lb Aire seco.}$$

El volumen específico del aire de entrada es:

$$v = 14.1 \text{ ft}^3/\text{lb Aire seco}$$

Por lo tanto el calor total disipado es:

$$Q_{TD} = 1000 \cdot 56.34 / 14.1 = 3990 \text{ BTU/min.}$$

Para la solución de este ejemplo se utilizó también la carta de la figura (2.4).

Los términos D , significan la desviación de entalpía con respecto a la entalpía de saturación y que debe de considerarse cuando el punto (en este caso el punto 1), no se encuentra localizado en la línea de saturación, este término está denotado por líneas punteadas sobre las cartas.

Debido a que el sistema aire-agua es una de las mezclas gas-vapor más estudiadas y de las que existe mayor información, se han obtenido tablas muy completas con las propiedades termodinámicas del aire húmedo, entre otras, aquí presentamos las tablas (A-1) y (A-2), que aparecen en el anexo A. Así como la tabla (A-3) que contiene las correcciones aditivas para humedad, entalpía y volumen específico, cuando la presión barométrica difiere del barómetro estandar.

CAPITULO

3

EQUIPO DE ENFRIAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE AIRE

C A P I T U L O I I I

EQUIPO DE ENFRIAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE AIRE

ENFRIAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE AIRE.-

En este tipo de enfriamiento, se emplean varios mecanismos, siendo el más importante el que emplea la evaporación del agua; la evaporación de un kilogramo de agua substraerá aproximadamente 560 kilocalorías (a las temperaturas que trabajan normalmente las torres); este principio tiene antecedentes de empleo muy antiguos pero es sólo en este siglo que ha tenido un uso en gran escala. Poniendo en contacto directo agua caliente con aire frío, aquella se enfriará por pérdida de calor sensible y por evaporación.

Simultáneamente, el aire se calentará y se humidificará.

Por lo tanto, la operación de enfriamiento de agua representa un caso de transferencia simultánea de calor y masa.

Como con todos los procesos de transferencia de materia y transferencia de calor por contacto directo, una de las

consideraciones primarias al diseñar la instalación es la creación de una gran área interfacial.

EQUIPO DE ENFRIAMIENTO DE AGUA POR AIRE.-

Durante los últimos 40 años los progresos en el empleo del enfriamiento por evaporación han llevado a los siguientes desarrollos:

A) El estanque de enfriamiento. Este es el más simple y en algunos casos, el más barato de los métodos para enfriar agua por evaporación, pero también el menos eficiente (Fig. 3.1).

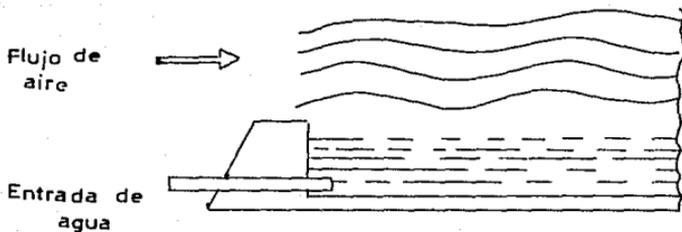


Fig. 3.1 Estanque simple.

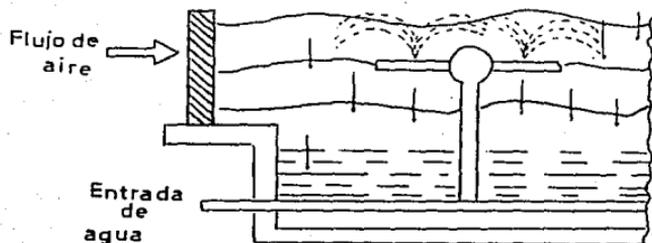


Fig. 3.2 Estanque con aspersores.

Su principal ventaja radica en poderse construir fácil y económicamente, levantando un dique de tierra de uno a 1.5m.

Pero tiene la desventaja de requerir una superficie - muy grande que, a igualdad de carga térmica, puede ser 20 veces mayor que la de un estanque con aspersores o de 500 a 1000 veces la de una torre con tiro mecánico.

B) El estanque con aspersores. Este consiste de un tanque al que se le han colocado a metro o metro y medio sobre la superficie del agua un sistema de toberas o aspersores cuyo objeto es producir una especie de lluvia (Fig. 3.2). Dicha lluvia aumenta notablemente la superficie de contacto entre el aire y el agua, en algunos casos puede agregarse al estanque una barda

con persianas para reducir la pérdida de agua por arrastre del viento.

Aún, cuando sea compacto el estanque con aspersores, tiene varios inconvenientes:

1.- Su rendimiento es limitado porque el tiempo ~~en~~ con tacto entre las gotas de agua y el aire es reducido.

2.- La pérdida de agua puede ser considerable especialmente durante ciertas épocas del año en que prevalecen vientos fuertes.

3.- Requieren a igualdad de carga térmica aproximadamente 50 veces más superficie que una torre de enfriamiento.

C) Torres con ventilación por viento. Como su nombre lo indica son aquellas en que la circulación del aire depende-- principalmente del viento, en estas torres el flujo de aire es cruzado con respecto al flujo del agua ya que esta última cae verticalmente por gravedad, mientras que el movimiento del aire es producido por vientos que generalmente corren horizontalmente.

Se distinguen dos modalidades de torre de este tipo:

1.- Sin relleno dispersor o llenos de lluvia (fig. 3.3).

2.- Con relleno dispersor (Fig. 3.4).

En las primeras, la dispersión para aumentar la superficie de contacto entre el agua y el aire se logra a base de tobas, colocadas en la parte superior de la torre; esta torre es muy similar a un estanque con aspersores, pero de forma alargada.

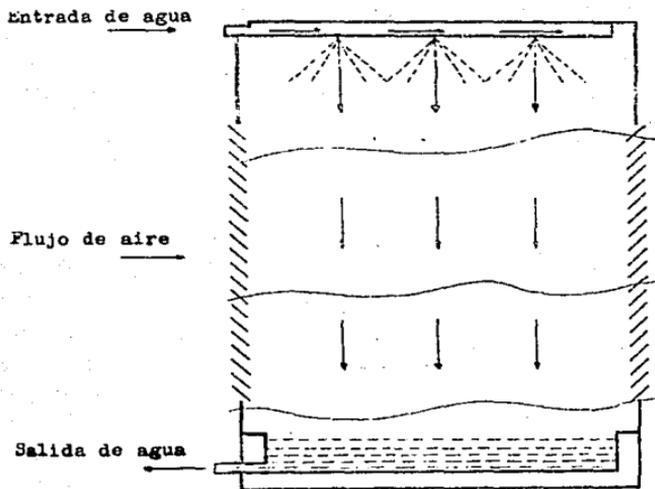


Fig. 3.3 Torre de ventilación natural sin relleno dispersor.

da colocada perpendicularmente a la dirección prevaleciente del viento y con las paredes de persianas con altura considerable.

Las segundas contienen en su interior una serie de g lementos generalmente de madera, que dispersan el agua al ir cayendo y aumentan el tiempo de contacto entre el aire y el agua.

Las ventajas comunes son:

- 1.- Ausencia de partes mecánicas.
- 2.- Bajo costo de mantenimiento.
- 3.- No hay recirculación del aire empleado.

Las desventajas comunes son:

- 1.- Costo inicial elevado
- 2.- Costo de bombeo elevado
- 3.- Deben localizarse en lugares despejados
- 4.- Deben colocarse normales a la dirección prevaleciente del viento.
- 5.- La temperatura del aire fluctúa con los cambios de dirección y velocidad del viento.
- 6.- La torre debe de estar perfectamente anclada para evitar - que se derrumbe en caso de vientos fuertes.

D) Torres de tipo natural. En este caso, el flujo de aire es inducido por una chimenea de grandes dimensiones colocada encima del relleno de la torre, (Fig. 3.5), el tiro resul

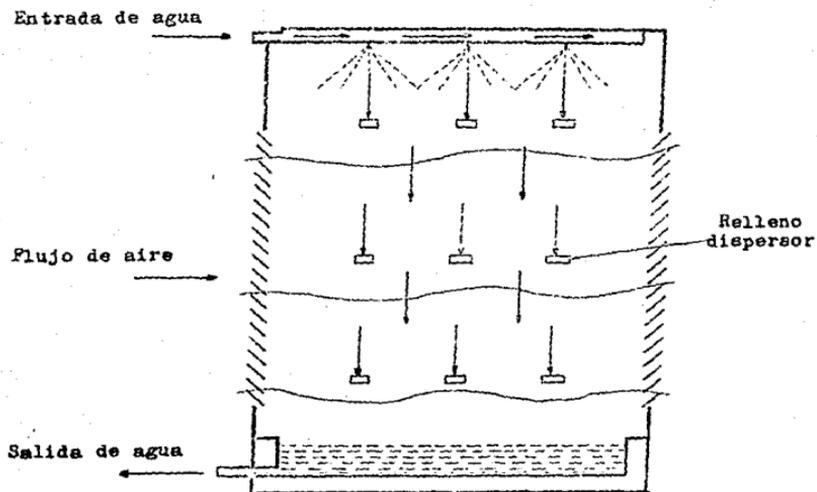


Fig. 3.4 Torre de ventilación natural con relleno dispersor.

ta de varios efectos combinados, siendo el principal, la diferencia de densidades entre el aire saturado de humedad saliendo de la torre y el aire entrante a la torre ya que mientras más humedad tiene el aire, menor es su densidad.

Sus principales ventajas son:

- 1.- Producen enfriamiento similar al obtenido con torres de tiro mecánico sin tener partes en movimiento y sin tener el gasto de energía causado por los ventiladores
- 2.- Costo de mantenimiento muy bajo
- 3.- Operación prácticamente libre en fallas.
- 4.- Comparadas con las torres de ventilación natural, tienen la ventaja de una operación independiente del viento.
- 5.- Requieren de una superficie de terreno relativamente pequeña.
- 6.- El aire fluye en dirección opuesta al agua, lo que garantiza una buena eficiencia.

Sus principales desventajas son:

- 1.- La resistencia al flujo del aire debe mantenerse al mínimo, por lo que el relleno debe diseñarse cuidadosamente.
- 2.- La gran altura requerida por la chimenea para mantener el flujo necesario.
- 3.- La temperatura del agua caliente entrando a la torre debe de ser superior a la temperatura del bulbo seco del aire.
- 4.- El control exacto de la temperatura del agua fría es difícil de lograr.

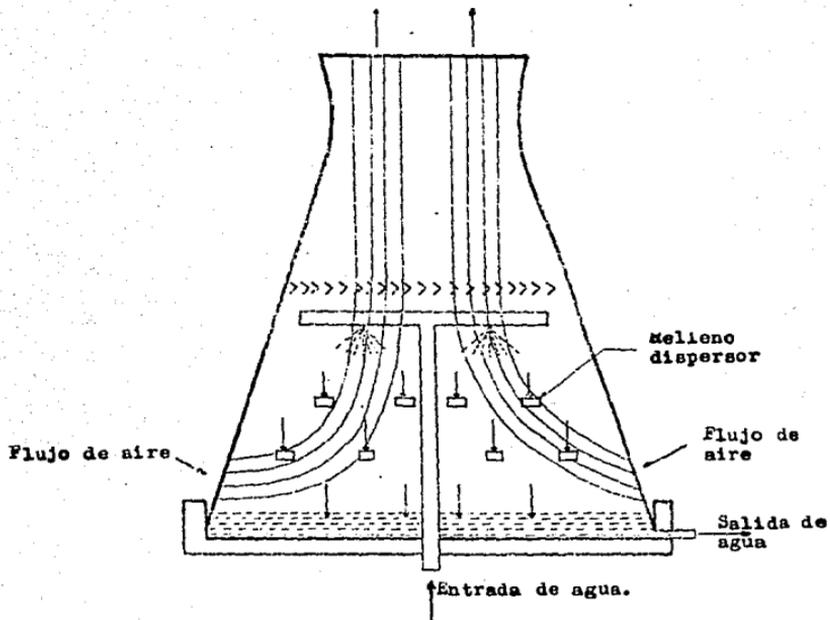


Fig. 3.5 Torre de tiro natural.

- 5.- El costo inicial es bastante superior al de las torres de tiro mecánico.
- 6.- Su uso está limitado a ciertas regiones geográficas.

E) Torres de tiro mecánico. Estas torres se clasifican en: torres de tiro inducido y torres de tiro forzado.

Las torres de tiro forzado, son aquellas que tienen uno o varios ventiladores localizados en la entrada del aire, que lo impulsan a través de la misma (Fig. 3.6)

Sus ventajas son:

- 1.- El ruido y la vibración son mínimos ya que el equipo mecánico se encuentra cerca de la base y está bien cimentado.
- 2.- Los ventiladores manejan aire seco por lo que la erosión de las aspas es mínimo y no se tienen problemas de condensación de humedad en la caja del reductor de velocidad.
- 3.- La operación de los ventiladores es ligeramente más eficiente que en el caso de los ventiladores de tiro inducido. Esto porque parte de la energía de presión dinámica del aire se convierte en presión estática y se recupera en forma de trabajo útil.

Sus desventajas son:

- 1.- El aire caliente y húmedo que sale por la parte superior de la torre, tiende a recircular y en caso de vientos desfavorables, puede reducirse la capacidad hasta un 20%.
- 2.- El diseño de estas torres limita el diámetro del ventilador a un máximo de 4 metros y si la carga térmica es grande se-

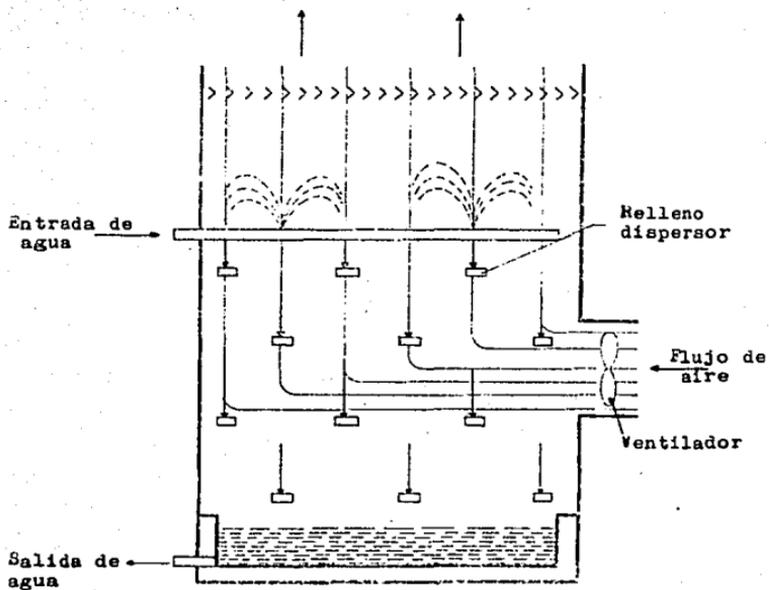


Fig. 3.6 Torre de Tiro forzado.

requiere un número considerable de motores, ventiladores y --
arrancadores (en el caso de tiro inducido, se pueden usar venti-
ladores hasta de 20 metros de diámetro).

Las torres de tipo inducido, tienen los ventiladores--
colocados a la salida del aire de la torre; pueden ser de contru-
flujo o de flujo cruzado.

En las de contraflujo, el aire se desplaza verticalm^eg
te (Fig. 3.7), su principal ventaja es que el agua más fría está
en contacto con el aire más húmedo, lo que garantiza eficiencia-
en el proceso de enfriamiento.

Sus desventajas son:

- 1.- El aire viaja en sentido contrario a las gotas de agua, lo -
que conduce a una pérdida de presión mayor y a la necesidad-
de consumir más potencia en los ventiladores que en el caso
del flujo cruzado.
- 2.- La distribución de flujo de aire es despareja, teniéndose -
poco movimiento cerca de las paredes de la torre.
- 3.- Las torres de este tipo son bastante altas, ya que la parte
inferior del relleno debe elevarse para permitir la entrada
libre del aire, por lo que requieren mayor potencia de bom-
beo.
- 4.- El sistema de distribución de agua colocada abajo de los e-
liminadores, no se presta a un mantenimiento fácil.

En las torres de tiro inducido, flujo cruzado, una --

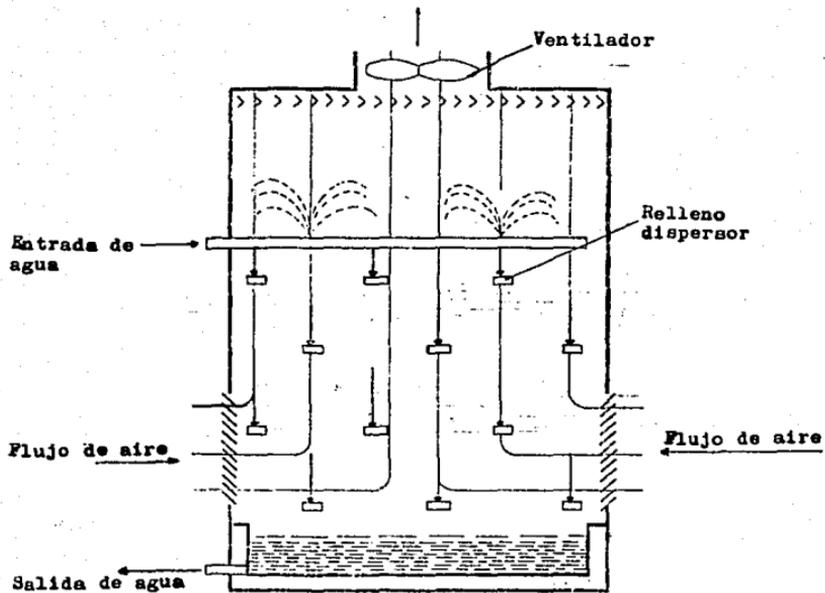


Fig. 3.7 Torre de tiro inducido y contraflujo.

parte de corriente viaja en forma horizontal, mientras que otra parte cae verticalmente como se muestra en la figura (3.8).

Sus ventajas son:

- 1.- Carga de bombeo reducida.
- 2.- Pérdida de presión baja en el aire.
- 3.- Permite un arreglo conveniente del sistema de distribución de agua, ya que sólo requiere un tirante de 15 a 20 cm., de agua en la parte superior de la torre.
- 4.- Es posible limpiar el sistema de distribución con la torre de servicio.
- 5.- La altura del relleno es, prácticamente, igual al de la torre misma.
- 6.- Se pueden utilizar ventiladores de gran diámetro por lo que se requieren menos celdas para una determinada carga.

Desventajas comunes para torres de enfriamiento a contraflujo y flujo cruzado:

- 1.- La poca presión en el distribuidor de agua hace que los orificios se tapen fácilmente con desperdicios acarreados por el viento o por las algas, por lo que se requiere un mantenimiento frecuente.
- 2.- Una superficie muy grande está expuesta al aire y al sol, - por lo que hay gran crecimiento de algas.

Cada uno de los equipos mencionados, encuentran aplicaciones en la práctica, dependiendo del análisis económico que

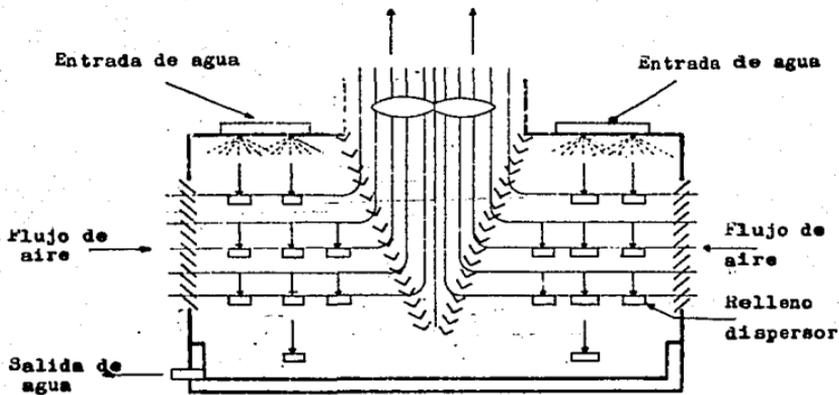


Fig. 3.8 Torre de tiro inducido y flujo cruzado.

se realice.

En cada caso particular, es necesario hacer una evaluación económica que considere costos de instalación, operación y mantenimiento para determinar cuál es la solución más conveniente.

En términos generales, se puede decir que los estanques simples o con aspersores y las torres de ventilación por viento, son adecuadas para cargas térmicas pequeñas y cuando el costo del terreno es bajo. Para cargas térmicas elevadas, como en el caso de muchas plantas térmicas y de proceso, o cuando se dispone de poco terreno, lo más conveniente son las torres, ya sea de tiro natural o de tiro mecánico.

CAPITULO

4

FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

C A P I T U L O I V

FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONTACTO DIRECTO E INDIRECTO.-

En los equipos de transferencia de calor por contacto indirecto, el fluido caliente y frío están separados por superficies impermeables. En equipo tubular, el tubo limita la intimidad de contacto entre los fluidos frío y caliente y también sirve como superficie sobre la que se acumulan resistencias como la obstrucción y la incrustación.

Para que un fluido turbulento pueda recibir calor en un tubo, las partículas que forman los remolinos en el cuerpo del fluido deben entrar en contacto con una película caliente en la pared del tubo, tomando calor por conducción y luego mezclarse con el resto del fluido.

En la coraza, tiene lugar un proceso semejante y el intercambio neto de calor ocurre a través de siete resistencias individuales. Una de las principales razones para emplear tubos es prevenir la contaminación de los fluidos.

Cuando uno de los fluidos es un gas y el otro un líquido, la superficie impermeable es a menudo innecesaria; puesto - que puede no haber problema por contaminación mutua, el gas y el líquido se separan fácilmente después de mezclarse e intercambiar calor. Las resistencias por obstrucción se eliminan automáticamente debido a la ausencia de superficies en las que puedan coleccionarse.

Los equipos en los cuales se lleva a cabo este tipo de transferencia de calor se denominan aparatos de contacto directo, los cuales operan casi indefinidamente con un rendimiento térmico uniforme.

La mayor intimidad de contacto directo, generalmente, - permite lograr coeficientes de transferencia de calor mayores que en los equipos tubulares usuales.

Posiblemente la aplicación más notable de un aparato - que opera con contacto directo entre un gas y un líquido, es la torre de enfriamiento.

DISEÑO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

En una torre de enfriamiento, existe transferencia - simultánea de masa y calor, como en todos los casos en los que se transfiere un componente de una fase gaseosa a una fase líquida debido a que se desprende el calor latente asociado con la - condensación.

El proceso es el siguiente:

En la torre de enfriamiento, el agua caliente es enfriada por aire frío, cuando el agua pasa a través de la torre, la temperatura de aquélla, puede descender por debajo de la temperatura del bulbo seco del aire, pero no más abajo que la del bulbo húmedo del mismo.

Frecuentemente, se encuentran diferencias entre la parte superior e inferior de la torre con respecto a la transferencia.

En la parte superior, tanto la masa como el calor, se transfieren hacia la fase gaseosa, como se observa en la figura (4.1).

Sin embargo, en la parte inferior tal como sucede en el experimento del bulbo húmedo, el calor sensible y el latente se transfieren en direcciones opuestas, esto ocurre debido a que el agua se enfría por debajo del gas total.

Este sobreenfriamiento, es posible gracias a que la transferencia de calor latente cubre con mucho la transferencia de calor sensible. Esto se puede observar en la figura (4.2).

Ambos potenciales en la parte superior de la torre, sirven para bajar la temperatura del agua por evaporación y transferencia de calor sensible al aire, aumentando por lo tanto, la entalpía del mismo.

En esta forma, dependiendo de la cantidad de aire y del modo de la evaporación, es posible, que la temperatura del agua descienda debajo de la temperatura de bulbo seco del aire

de entrada, antes de alcanzar el fondo de la torre, por el que entra el aire.

El hecho de que ambos potenciales puedan operar adiabáticamente en la misma dirección, mientras saturan el aire, hace posible que las torres de enfriamiento sean tan eficaces para enfriar el agua.

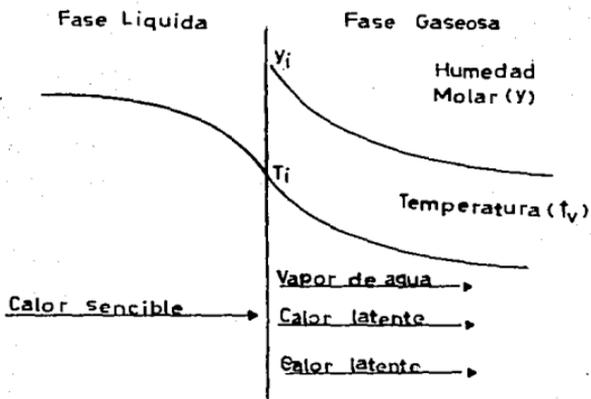


Fig. 4.1 Transferencia en la parte superior de la torre.

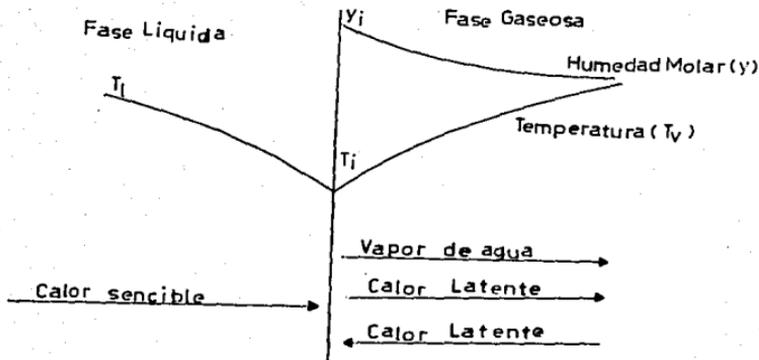


Fig. 4.2 Transferencia en la parte inferior de la torre.

En la parte inferior, el límite al que la temperatura del agua de salida puede llegar, es el que está adiabáticamente en equilibrio con el aire de entrada, es decir, el bulbo húmedo.

Aunque esta magnitud de acercamiento depende del diseño de la torre, entre otros factores está, el tiempo de contacto aire-agua, la cantidad de superficie de llenado y la separación del agua en gotitas.

En la práctica, las torres de enfriamiento rara vez se diseñan para acercamientos de 5°F .

La derivación del comportamiento de una torre de enfriamiento que daremos aquí, es esencialmente la de Merkel (6).

Empezaremos por establecer un balance de calor en un circuito cerrado como el mostrado en la figura (4.3).

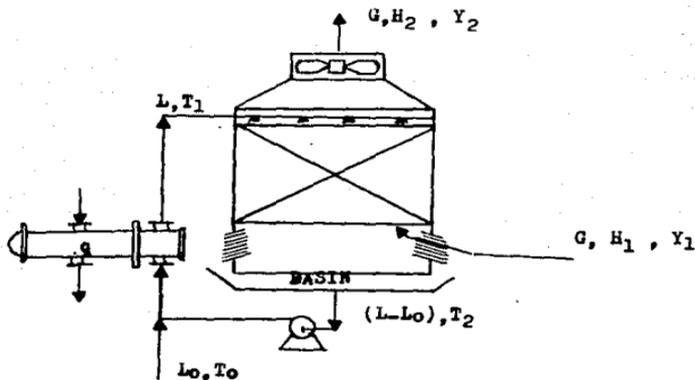


Fig. 4.3 Torre de enfriamiento operando con fuente de calor en circuito cerrado.

En este esquema, el agua del depósito se bombea a través de una batería de condensadores de superficie en el que se eleva la temperatura, el agua caliente regresa a la torre junto con agua de compensación, la que se usa para restituir -

la que se perdió por evaporación, debido a la saturación del aire al pasar por la torre.

Por conveniencia, analizaremos esto en la base de 1 pié cuadrado de área interna.

La carga de aire se toma como la velocidad del gas seco, por unidad de área G lb/h ft², la carga de agua en la parte superior de la torre es la velocidad de agua por unidad de superficie L lb/h ft² y el agua de reposición es L_0 lb/h ft².

La carga total de calor por hora por pié cuadrado, " q ", es la cantidad " q " por hora dividida por las dimensiones internas de la torre. Usando subíndice 1 para la entrada y 2 para la salida, el balance en la torre en función de gas para un plano de referencia de 0°C (32°F), es:

$$q + L_0 C T_0 = G (H_2 - H_1) \quad (4.1)$$

Donde:

C : es el calor específico del agua.

H : es la entalpía del agua por libra de aire seco, e incluyendo el calor de vapor asociado con la libra de aire seco.

En función de la carga de agua, en balan
se total de calor es:

$$q = LC(T_1 - T_2) + LoC(T_2 - T_0) \quad (4.2)$$

Combinando con (4.1) y (4.2):

$$G(H_2 - H_1) = LC(T_1 - T_2) + LoCT_2 \quad (4.3)$$

La cantidad de agua de reposición requerida
es:

$$Lo = G(Y_2 - Y_1) \quad (4.4)$$

Dividiendo la ecuación (4.3) por la ecuación
(4.4) tenemos:

$$\frac{G(H_2 - H_1)}{G(Y_2 - Y_1)} = \frac{LC(T_1 - T_2) + LoCT_2}{Lo} \quad (4.5)$$

Y entonces:

$$L_o \frac{H_2 - H_1}{Y_2 - Y_1} = LC(T_1 - T_2) + LoCT_2 \quad (4.6)$$

Combinando las ecuaciones (4.6) y (4.2) tenemos:

$$LC(T_1 - T_2) + LoCT_2 = q + LoCT_o \quad (4.7)$$

Entonces:

$$L_o = \frac{q}{(H_2 - H_1) / (Y_2 - Y_1) - CT_o} \quad (4.8)$$

La ecuación 4.8 anterior, nos determina la cantidad de agua de compensación correspondiente a cualesquiera condiciones terminales fijas.

Ahora bien, digamos que la transferencia total en una torre de enfriamiento es el paso de calor por difusión y convección de agua al aire, así tenemos:

$$q = q_D + q_C \quad (4.9)$$

En donde:

q : está definido por área transversal de la torre.

Si denominamos a λ como el calor latente promedio de vaporización de toda el agua que se vaporiza - en la torre tenemos que:

$$q_D = L_o \lambda \quad (4.10)$$

Si combinamos esta ecuación con la (4.2) tenemos:

$$q_C = LC(T_1 - T_2) + LoC(T_2 - T_o) - L_o \lambda \quad (4.11)$$

Y entonces:

$$\frac{q_C}{q_D} = \frac{LC(T_1 - T_2) + LoC(T_2 - T_o) - L_o \lambda}{L_o \lambda} = \frac{LC(T_1 - T_2) + LoC(T_2 - T_o)}{L_o \lambda} - 1 \quad (4.12)$$

Pero si recordamos las ecuaciones (4.4) y

(4.3):

$$L_o = G(Y_2 - Y_1) \quad (4.4)$$

$$G(H_2 - H_1) = LC(T_1 - T_2) + L_o(T_2 - T_o) \quad (4.5)$$

Y las combinamos con la (4.12) resulta:

$$\frac{q_c}{q_D} = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{(H_2 - H_1)}{(Y_2 - Y_1)} \right] - 1 \quad (4.13)$$

La razón entre los calores transferidos por convección y difusión, ambos en la misma dirección, se determina por las condiciones de entrada y salida del aire, las cuales pueden ser conocidas o calculadas.

Basándose en los coeficientes totales, en lugar del de las películas individuales, la transferencia de calor sensible del agua a una temperatura T al aire a una temperatura t está dada por:

$$dq_c = h(T-t)a \, dV \quad (4.14)$$

Donde:

h : coeficiente de transferencia de calor
 a : superficie del agua por pié cúbico de torre, tanto de gotas como de película.

dV : Volumen diferencial de la torre en el que existe la superficie.

De esto $adV = dA$ donde A es la superficie de transferencia de calor.

Si c_B es el calor húmedo del aire y que definimos en el capítulo II, como $c_B = 0.24 + 0.45Y$, -
entonces:

$$dq_C = GC dt \quad (4.15)$$

$$dq_D = \lambda dL \quad (4.16)$$

Ya que dL es la razón a la que el material se difunde, y para todos los propósitos prácticos, la humedad puede ser considerada proporcional a la presión parcial, tenemos que:

$$dL = K_Y(Y' - Y) a dV \quad (4.17)$$

Donde:

Y' : es la humedad a la temperatura del agua.

Y : es la humedad del aire.

Substituyendo en (4.16), tenemos:

$$dq_D = \lambda K_Y(Y' - Y) a dV \quad (4.18)$$

El agua evaporada dL aumenta la humedad del aire por sobre el valor a la entrada por:

$$dL = G dY \quad (4.19)$$

El dq combinado por transferencia de calor es entonces la suma de los dos modos de transferencia:

$$dq = dq_C + dq_D = h(T - t) a dV + K_Y \lambda (Y' - Y) a dV \quad (4.20)$$

Además:

$$dq = GdH \quad (4.21)$$

La ecuación (4.21), es útil si se puede combinar con la ecuación (4.20), ya que expresa la transferencia total de calor en el sistema de unidades de calor solamente.

Usando un valor promedio para el calor húmedo así como el calor latente, y despreciando el sobrecalentamiento, todo lo cual es permitido en los rangos de operación de las torres de enfriamiento, para una mezcla de aire-agua consistiendo en 1 libra de aire e Y libras de vapor de agua, tenemos entonces:

$$H = 1Ct + \lambda Y \quad (4.22)$$

$$GdH = G(Cdt + \lambda dY) \quad (4.23)$$

Si reagrupamos la ecuación (4.20) obtenemos:

$$dq = K_y a dV \left[\left(\frac{hT}{K_y} + \lambda Y' \right) - \left(\frac{ht}{K_y} + \lambda Y \right) \right] \quad (4.24)$$

Si sumamos y restamos $c(T - t)$, tenemos:

$$dq = K_y a dV \left[(CT + \lambda Y') - (Ct + \lambda Y) + C(T - t) \left(\frac{h}{K_y c_s} - 1 \right) \right] \quad (4.25)$$

Substituyendo la ecuación (4.22) en la -
(4.25) tenemos:

$$dq = K_y a dV \left[(H' - H) + C(T - t) \left(\frac{h}{K_y c} - 1 \right) \right] \quad (4.26)$$

Ahora bien, dq puede expresarse en términos de la disminución de la entalpía de la cantidad total de agua o el aumento de entalpía de la mezcla total de aire, ambas son iguales, es decir:

$$dq = d(LCT) = GdH \quad (4.27)$$

La carga de gas G permanece constante a través de la torre debido a que está basada únicamente en gas seco, sin embargo, la carga de líquido no es muy constante, pero debido a la evaporación del agua en el aire seco, las pérdidas de saturación del agua al aire ascienden a menos de 2% del agua circulada y pueden ser consideradas sin introducir error serio. (5)

Por lo tanto:

$$d(LCT) = LCdT \quad (4.28)$$

Entonces:

$$LCdT = GdH \quad (4.29)$$

Como se mencionó en el capítulo I, la relación de Lewis h/KyC_S es aproximadamente igual a la unidad para el sistema aire-agua por lo que el último término de la ecuación (4.26), se nulifica, entonces:

$$LCdT = GdH = Ky(H' - H)adV \quad (4.30)$$

Esta ecuación, es la clave para el cálculo del diseño y el análisis del comportamiento de las torres de enfriamiento. Como es conocido, en los equipos tubulares, (intercambiadores de calor, por ejemplo), la superficie de transferencia usualmente se conoce o puede calcularse.

Sin embargo, en las torres de enfriamiento no se puede determinar directamente el valor de "a" ya que está compuesta de disposiciones al azar de gotas y superficie de película.

La imposibilidad de calcular "a", se obvia determinando experimentalmente el producto $K_y a$, como un solo factor para un tipo particular de empaque.

Reacomodando la ecuación (4.30), tenemos:

$$\int \frac{dH}{H'-H} = K_y a \frac{V}{G} \quad (4.31)$$

Y entonces:

$$\eta_D = \int \frac{dT}{H'-H} = K_y a \frac{V}{L} \quad (4.32)$$

La ecuación (4.31), no es muy conveniente -

para usarse en el cálculo de torres de enfriamiento, donde el interés principal es en la temperatura de agua producida.

La ecuación (4.31), puede transformarse en la ecuación (4.32), multiplicándola por G/L y recordando que $c = 1.0$ para el agua.

γ_D , es llamada el número de unidades de difusión.

Si se conoce la altura de unidad de difusión (HDU), para un tipo de empaque dado, se puede calcular entonces la altura total requerida para la torre, para un servicio dado :

$$Z = \gamma_D \cdot HDU \quad (4.33)$$

APLICACION DEL MODELO.-

La ecuación (4.32), obtenida anteriormente, representa el modelo matemático de la torre de enfriamiento, la integral representa el número de unidades de difusión, γ_D , estas unidades de difusión, dependen únicamente de las condiciones impuestas por el proceso, éstas significan la capacidad de difusión que tiene la torre para la transferencia total de calor por eva

poración.

Esto es, si se pone en contacto una cantidad de agua a una temperatura de entrada y un flujo de aire a temperatura de bulbo húmedo, de tal manera que la temperatura del agua disminuya, para este enfriamiento se requeriría de cierto número de unidades de difusión, \int_0^1 , que son calculadas por la integral de la ecuación (4.32). Estas unidades de difusión son las requeridas independientemente del tipo de torre que se trate.

La solución de la ecuación (4.32), se hace por integración numérica, graficando las entalpías de saturación una libra de aire (H), contra la temperatura del agua, formándose la curva de saturación del aire a la temperatura del agua.

La ecuación que nos da la entalpía del aire en cualquier punto de la torre es la siguiente:

Si partimos de la ecuación (4.29), tenemos:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{L}{G} \quad (4.29)$$

Esto es, el cambio de la entalpía en la fase gas dH , al cambio de la temperatura del agua dt , que está en contacto con el gas es igual a la relación que existe entre la carga de agua en la parte superior de -

la torre y la carga de aire entrante en la parte lateral de la torre.

De forma puntual la ecuación (4.29) queda:

$$H_2 = H_1 + L_G(t_2 - t_1) \quad (4.34)$$

Donde:

H_2 : Entalpía del aire que sale de la torre.

H_1 : Entalpía del aire a la entrada.

t_1 : Temperatura del agua de alimentación.

t_2 : Temperatura del agua a la salida de la torre.

Esta ecuación se puede representar en un diagrama de entalpía contra temperatura como el mostrado en la figura (4.4), donde se grafica la línea de operación dada por la ecuación (4.34) en relación a la línea de saturación.

Se debe hacer notar que el área entre la línea de operación y de saturación representa el potencial que promueve la transferencia total de calor, siendo la misma área encontrada por la solución de la integral de la ecuación (4.32), o sea, el número de unidades de difusión.

A una temperatura dada de agua, la diferencia -

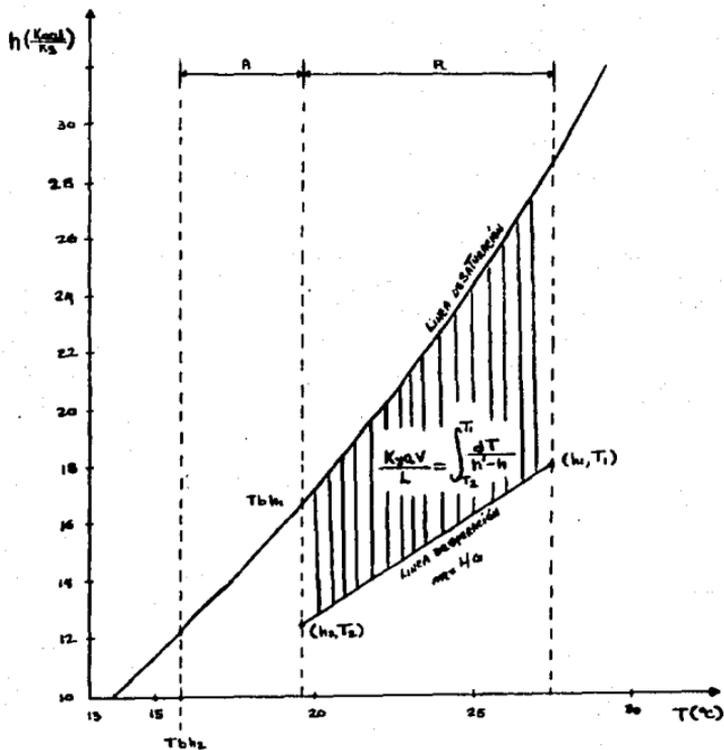


Fig.(4.4) Diagrama Entalpia v.s. Temperatura.

entre la entalpía del aire no saturado H, es el potencial que impulsa el calor fuera de la película saturada en la superficie de agua hacia el aire saturado.

La segunda parte de la ecuación (4.32) está relacionada con la altura de una unidad de transferencia o difusión:

$$HDU = \frac{Z}{K_{ya}} \frac{V}{L} \quad (4.35)$$

La HDU o la K_{ya} son función de las características del relleno o empaque de la torre, así como η_D es función de las condiciones de proceso.

En una torre de operación se puede determinar la HDU, el η_D , a partir de la temperatura de alimentación y descarga del agua, de las humedades y los flujos de agua y aire así, conociendo la altura total del relleno (z) puede calcularse el η_D , podemos obtener el HDU dividiendo (z) por η_D , de la ecuación (4.33).

En la operación de torres de enfriamiento, se presentan varias condiciones de proceso que deben de tomarse en cuenta, una de ellas se refiere a que la temperatura de alimentación no debe de exceder de 120°F, sin embargo, esta debe considerarse siempre menor. Otra condi

ción está relacionada con la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura del agua de salida donde la temperatura del agua de salida, nunca podrá ser menor que la correspondiente a la del bulbo húmedo del aire de entrada. La diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de salida de agua se llama aproximación. Por otro lado la diferencia entre la temperatura de entrada de agua a la torre y de salida de la misma recibe el nombre de rango.

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE PROCESO EN EL DISEÑO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.

El estudio del efecto de las condiciones de proceso en las torres de enfriamiento es útil, ya que refleja la capacidad de la torre de enfriamiento para asegurar su función de disminuir la temperatura del agua de entrada, lo que a su vez influye en el tamaño, altura, área de sección transversal así como de su costo.

A continuación se enumeran algunas de las principales influencias de las condiciones de proceso en el diseño de torres de enfriamiento:

a) El cambio de la presión de operación se ve influenciado por la elevación con respecto al nivel del mar, la línea de saturación es más alta, debido a que la presión atmosférica total ha disminuido, mientras que la presión parcial del agua -

es fija, esto hace que el potencial aumente, reduciendo el tamaño de la torre requerido, siempre y cuando las condiciones de proceso permanezcan constantes. Esto se puede ver claramente en la figura (4.5)

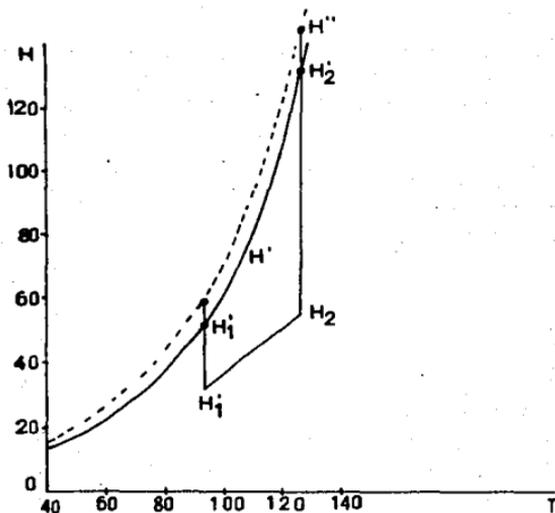


Fig. (4.5) Cambio de la presión de operación

b) El cambio del cociente L/G es otro caso que se presenta debido al aumento en el flujo o carga de agua.

Al aumentar la carga de líquido, la pendiente de la línea de operación aumenta, resultando una disminución del potencial o un mayor número de unidades de difusión, así como una mayor altura de la torre. Este caso es típico cuando el área disponible de la torre está restringida. Por simple que parezca -- este caso, el aumento de la pendiente sucede cuando L aumenta y G permanece constante y no sería válido el análisis cuando circula menos aire por libra de agua y el enfriamiento sea menor.

La gráfica de este caso se puede observar en la figura (4.6).

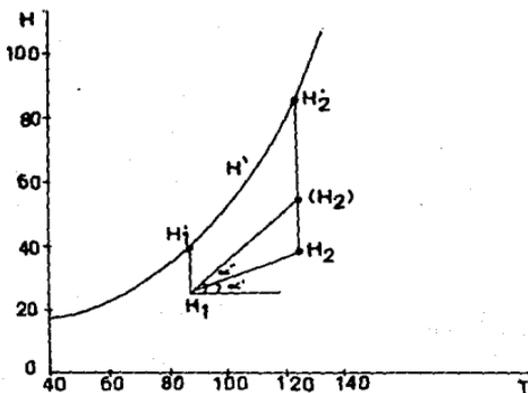


Fig. (4.6) Cambio de cociente L/G .

c) La localización del rango de operación de la torre de enfriamiento se realiza en función de diferentes condiciones de operación.

Como se observa en la gráfica de la figura (4.7), se tiene un rango de temperatura y una L/G, así como su línea de operación, ahora, se cambian las condiciones, o sea, se desea enfriar más con el mismo rango de temperatura utilizando el mismo aire de entrada; en este caso, la relación L/G, permanece constante pero la línea de operación corta la línea de saturación, ocasionando que la operación de enfriamiento desde ese punto no exista. Para este caso lo que se requiere es de L/G sea menor, lo que significa que G debe aumentarse para poder eliminar la misma carga térmica, así que el flujo de aire de entrada deberá de ser mayor.

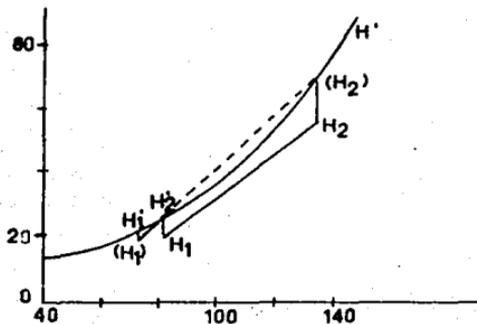


Fig. (4.7) Localización del rango de operación.

Otra alternativa para darle solución al caso (c), anterior, dado el reducido cociente L/G , es el uso de dos torres en serie, denominándose a esto empalme.

En la gráfica de la figura (4.8), se muestran dos líneas de operación, la primera de $H_1 - H_2$ con una temperatura de entrada de agua t_2 y una temperatura t_3 de salida que es la misma temperatura en la alimentación en la segunda torre con la línea de operación de $H_1 - H_3$, se observa que la segunda torre utiliza el mismo aire de entrada, por lo que con este arreglo tenemos dos líneas de operación de gran pendiente sin intersectar la línea de saturación.

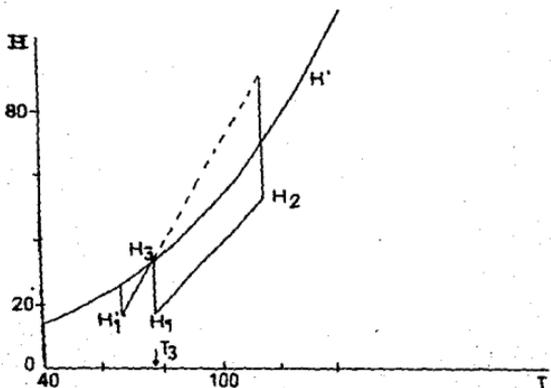


Fig. (4.8) Empalme.

METODOLOGIA DE DISEÑO COMUNEMENTE USADA POR LOS FABRICANTES DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

En la selección de una torre de enfriamiento y de acuerdo a la necesidad del proceso, se requiere de un diseño preliminar de éstas, basándose en sus diferentes características como: tamaño, materiales, formas, con el fin de evaluar sus diferencias y determinar así su selección.

Por lo regular todos los fabricantes cuentan con una metodología común para la selección y diseño de sus torres de enfriamiento, aquí se presenta el utilizado por uno de los fabricantes más importantes de torres de enfriamiento:

"The Marley Co.", (Torres Marmex, en México).

Método de diseño.

- A. Datos para el diseño. L, R y Q.
- B. Estimación de la temperatura de bulbo húmedo.
- C. Elección del tipo de torre (1ª aproximación).
- D. Estimación de la altura de la torre y tipo de relleno.
- E. Cálculo de las cantidades de aire y L/G para que las características del empaque cumplan con el funcionamiento deseado.
- F. Estimación del área transversal (1ª aproximación).
- G. Cálculo de la caída de presión de la torre.
- H. Cálculo de la potencia del ventilador.
- I. Segunda aproximación para determinar la torre con caract

terísticas comerciales.

- J. Estimación del costo anual.
- K. Estimación de agua de repuesto.
- L. Cálculo de funcionamiento de la torre para la variación con el gasto de agua en 10% del gasto de diseño.

La realización de cada una de las etapas de diseño requiere de la información adecuada, a continuación se presenta el detalle de cada etapa, así como la información mínima necesaria.

- A. Es necesario tener las siguientes condiciones tales como gasto de agua L, rango H, carga térmica Q y lugar de la planta.
- B. Para la estimación de la temperatura de bulbo húmedo, es necesario conocer el lugar donde se encuentra la planta. El fabricante informará cuál es la temperatura de bulbo húmedo a la que le conviene hacer el diseño. Se toma como base que la temperatura que sólo sea excedida por 150 horas en la época de verano que tiene un total de 2920 horas, es decir, la temperatura de bulbo húmedo del diseño que se utiliza es de 5% del total. También se considera el tamaño y la capacidad de la torre donde habrá un cierto porcentaje de recirculación que modifica la temperatura.
- C. En la selección de la torre, se cuenta con diferentes materiales de construcción, como maderas, plásticos

asbestos, así como diferentes formas.

Comúnmente cada fabricante tiene ya definido el tipo de torre para caos específicos y lo adapta a las condiciones - propuestas como el más económico.

D. La altura empacada determina la potencia de la bomba - alimenta el agua caliente a la torre. El tipo de arreglo y la altura determina la potencia del ventilador, - así como la cantidad de aire que se requiere, o sea, - la carga térmica y el gasto de agua.

El cálculo de la potencia de la bomba no sólo debe incluir la altura de la torre sino la caída de presión - que tiene el sistema de distribución que generalmente es del orden de 2.13 m. aunque hay torres que tienen - distribuidores por gravedad que no necesitan de esta - caída de presión.

E. Con las condiciones de operación, el arreglo y la altura de la torre se puede determinar la cantidad de aire de acuerdo con la ecuación (4.32) o con la gráfica de la línea de saturación de entalpía contra temperatura, en las condiciones de operación, calculándose entonces $K_y a V/L$, como se muestra en la figura (4.4). El fabricante, además, cuenta con gráficas para determinar la relación $K_y a V/L$, para diferentes valores de temperaturas de bulbo húmedo y rangos, utilizando como parámetro el acercamiento, ejemplos de este tipo de gráficas

kara: $T_{bh} = 12^{\circ}\text{C}$ y $R = 5^{\circ}\text{C}$

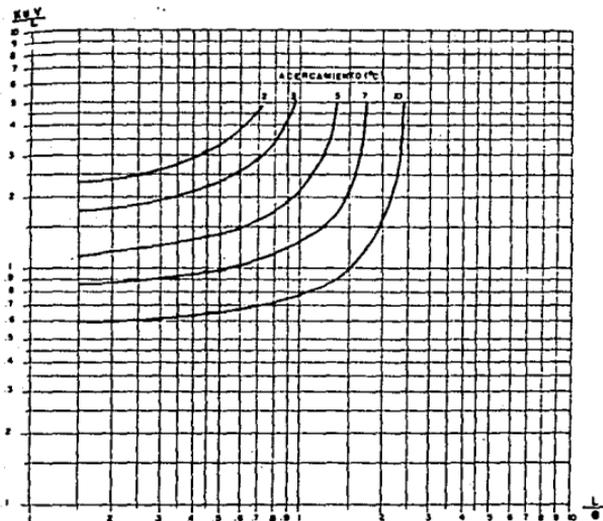


Fig.(4.9) Determinación de relación KaV/L .

Para: $T_{bh} = 12^{\circ}C$ y $R = 10^{\circ}C$.

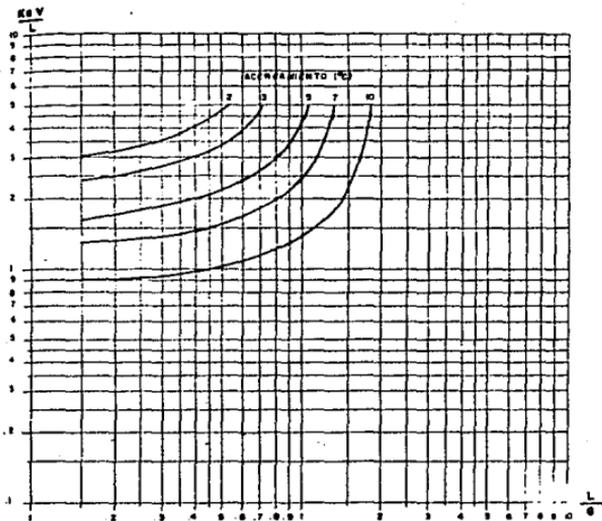


Fig.(4.10) Determinación de relación $K_a V/L$.

se muestran en las figuras (4.9) y (4.10).

F. La figura (4.11) representa la estimación de la masa - velocidad del aire para diferentes alturas de empaque - y nos permite conocer un valor de la masa-velocidad de aire con respecto a la altura que no provoque una caída de presión elevada y por lo tanto que la potencia - del ventilador no sea muy grande, con estos datos y conocida la relación L/G entonces se puede calcular el área transversal de la torre y en caso particular de diseño de torres comerciales, se estima el número de celdas a utilizar.

G. Las pérdidas de presión a través de la torre se presenta a través de varias formas.

G.1. A través del empaque, se considera que un valor de 1.525 cm. de agua es el límite para su caída de presión. El cálculo, en la práctica, se hace a través de gráficas de acuerdo al empaque que se selecciona, conocida - la masa-velocidad del aire y del agua, así como el número total de pisos o unidades (celdas).

G.2. A través de los eliminadores de rocío o niebla, la caída de presión se calcula por la figura (4.12), debido a que la mayoría de las torres existentes son del mismo tipo.

G.3. A la entrada de las persianas. En la actualidad se utilizan en ángulos de 30 grados o menor. El cálculo

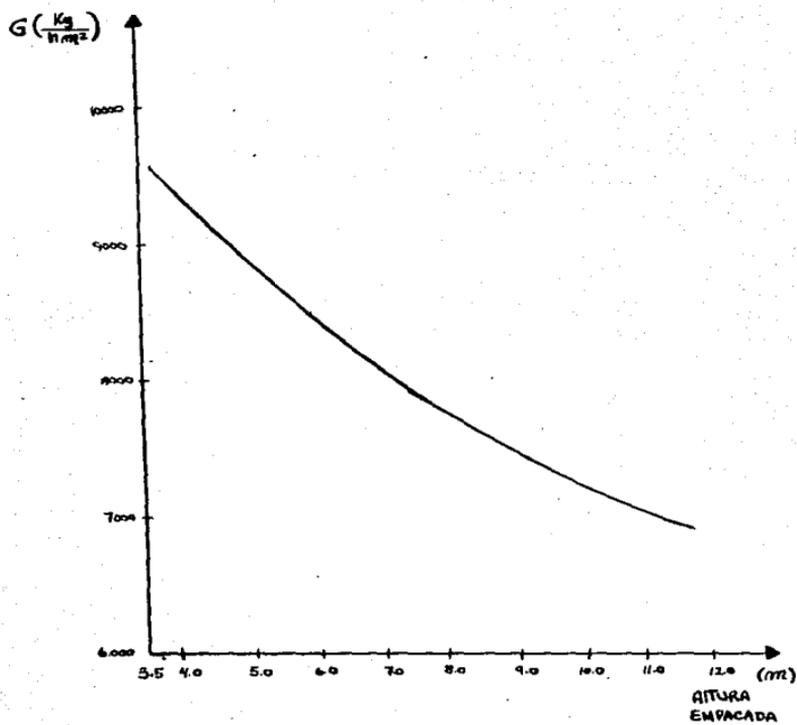


Fig.(4.11) Estimación de la masa velocidad del aire para diferentes alturas de empaque.

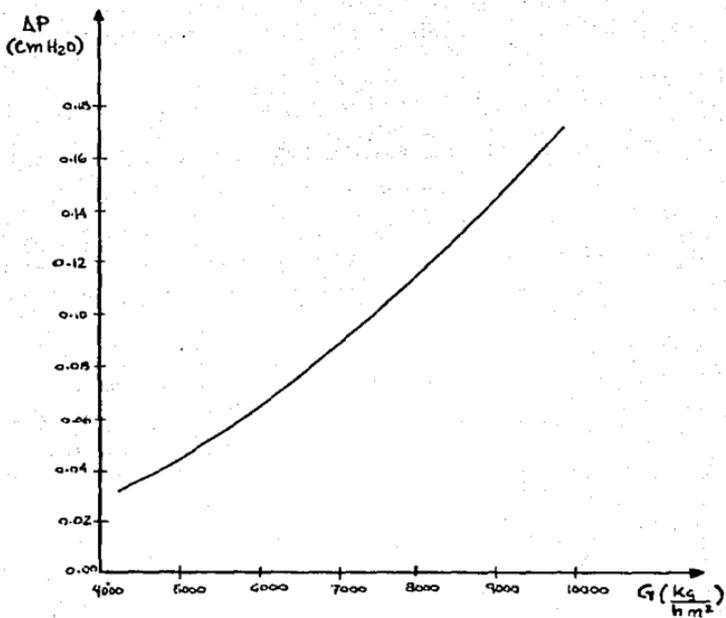


Fig. (4.12) Caída de presión en eliminadores de rocío. Base: cinco caras, densidad 1.08

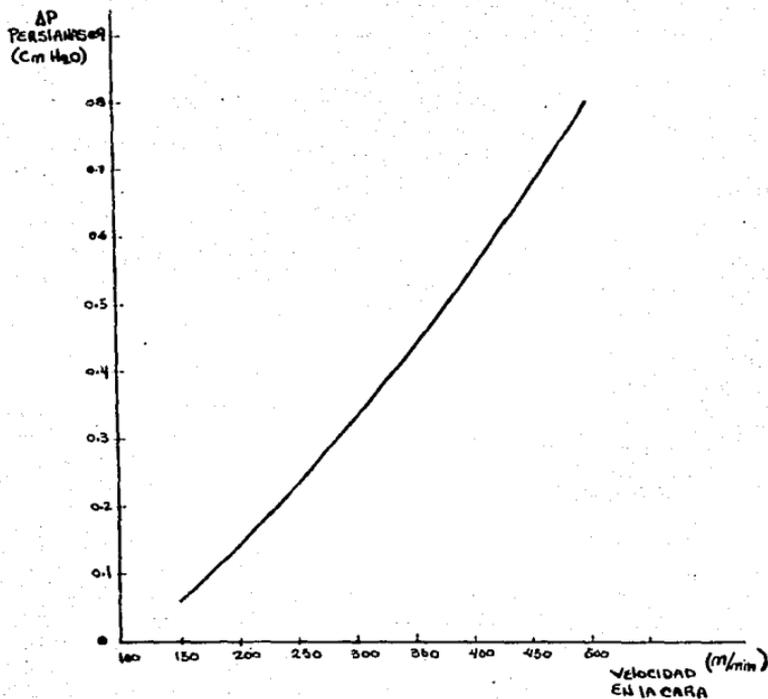


Fig.(4.13) Caída de presión en la entrada del aire en las persianas. Base del cálculo: dos caras y densidad de 1.2 kg/m³.

lo se hace por medio de la figura (4.13). Generalmente se tienen persianas a dos caras - de la torre. La entrada del aire por las persianas está en función de un gran número de factores como: ancho, altura, tipo de arreglo, el funcionamiento que se desea, la elevación del fondo del estanque.

Para determinar la velocidad del aire en las persianas es necesario conocer el área total en que se encuentran éstas.

Por lo que deberá conocerse para hacer el -- cálculo, longitud de la torre, ancho de la -- torre, altura total, 25% de la altura, G, Área de persiana = 2 (largo) (25% altura), -- todo esto nos da el área de la persiana y -- con la densidad del aire a condiciones estan-- dar así como el gasto másico, calculamos la -- velocidad del aire para poder entrar a la -- gráfica.

La caída total de la presión será:

$$P_t = P_{Emp} + P_{Elim} + P_{Persiana} \quad (4.36)$$

H. La caída de presión total, el volumen del

aire y la eficiencia de la torre son los datos necesarios para el cálculo de la potencia del ventilador, la eficiencia se maneja por lo general al 50%.

El gasto en volumen (V') se calcula con el gasto en masa y la densidad del aire a condiciones de saturación (1.08 Kg/m^3).

$$HP = \frac{V' P}{458(0.5)} \quad (4.37)$$

Donde, 458 es el factor de conversión de unidades.

I. Si la potencia del ventilador que se calcula no se tiene comercialmente, entonces se hace un ajuste para el tipo comercial, utilizando la siguiente relación:

$$HP = \frac{1}{(\text{Area})^{1.8}} \quad (4.38)$$

Si substituímos en la ecuación (4.38), los datos:

$$HP_{\text{conocido}} = \frac{1}{(\text{Area conocida})^{1.8}} \quad (4.39)$$

Si comercialmente existe un ventilador de tales HP:

$$HP_{\text{com.}} = \frac{1}{(X)1.8} \quad (4.40)$$

Como se tiene un juego de ecuaciones se despeja X, como el área; en síntesis, la nueva aproximación de la torre, puede hacerse de acuerdo a la potencia del ventilador que se dispone comercialmente.

J. El costo anual, es igual al costo de capital invertido anual (C_c) y es igual al costo anual de operación (C_v).

El costo anual de operación incluye:

- a) El costo de energía del ventilador, que calcula por la potencia del propio ventilador, tiempo de trabajo y costo de electricidad (\$/KWH). Así que:

$$HP = \frac{V \cdot P}{458(0.5)} \quad (4.41)$$

Y además:

$$1HP = 0.75KWH \quad (4.42)$$

b) Costo de energía por bombeo de agua (Cb), tomando como factor de conversión para - 360 días/año, para obtener el valor en - kWh, se tiene:

$$\frac{K_{WH}}{AÑO} = 2.285 \cdot 10^{-2} \frac{LZ}{n} \quad (4.43)$$

Entonces:

$$C_b = \frac{K_{WH}}{AÑO} \cdot \frac{\$}{K_{WH}} = \frac{\$}{AÑO} \quad (4.44)$$

El costo anual de capital invertido (Cc), depende del porcentaje de este capital considerando de acuerdo al lugar, para cualquiera de los siguientes elementos:

- Estructura del estanque.
- Equipo de instalación eléctrica.
- Distribuidores y soportes
- Ventiladores (motores) y motoreductores.
- Empaque de rejillas y su instalación.

El costo será diferente y dependerá del número de años en que se pretenda depreciar, así como el costo total de la inversión.

Finalmente, el costo total anual será:

$$C = C_c + C_v + C_b \quad (4.45)$$

K. El gasto del agua de repuesto (W_R) será estimado como:

$$W_R = W_E + W_P + W_A \quad (4.46)$$

Donde:

W_E = Gasto de agua evaporada.

W_P = Gasto de purga o fondos.

W_A = Gasto de agua arrastrada por el -
aire.

Así que en el sistema de enfriamiento, el gasto del agua de repuesto depende de tres factores:

- a) El agua de arrastre W_A . Esta es provocada - por la velocidad del aire, la cantidad de agua eliminada por este medio es de aproximadamente el 10% del agua de repuesto, es decir, $0.1 L = W_A$, sin embargo existen otros criterios en base al tipo de torre de que-

Las condiciones iniciales y finales nos da la cantidad de agua que absorbió el aire, - la cual es precisamente la cantidad que el recirculante eliminó por evaporación.

c) Agua de purga W_p . Este gasto permite al sistema, un control adecuado de todos los materiales contaminantes provocados por varias formas tales como:

- Tipo de agua utilizada en el enfriamiento.
- Análisis químico de la misma
- Concentración de gases corrosivos (CO_2 , - H_2S , SO_2 , etc.).
- Concentración de microorganismos.
- Material de construcción.

Estos factores, tienen una gran influencia sobre el gasto de purga, debido al hecho - de una evaporación en el sistema provoca - un aumento gradual de la concentración de materiales en el agua, así como por contacto en el aire.

El gasto de purga permitirá un mayor número de ciclos de concentración, calculándose mediante un análisis de agua y los valores máximos permitidos de concentración para -

se trate, por ejemplo, para una torre de doble flujo, es aproximadamente el 0.2% del total de agua recirculada, esto es $0.002L' = W_A$.

Aunque, comúnmente, las torres tienen los eliminadores de niebla, estos criterios deberán ser considerados.

- b) Agua evaporada W_E . Este gasto lo relaciona la teoría del funcionamiento de la torre y nos dice que esta cantidad eliminada, es el enfriamiento logrado por cada kilogramo de agua evaporada. El calor disipado del agua a enfriar en el sistema es de aproximadamente 553 K_{cal}. Para determinar el gasto de agua evaporada se utiliza la relación:

$$W_E = G \left(\frac{1}{1 + H_1} \right) (H_2 - H_1) \quad (4.47)$$

Donde:

G = Gasto o carga de aire.

H₁ = Entalpía del aire de entrada.

H₂ = Entalpía del aire de salida.

así prevenir la corrosión, incrustación y los problemas microbianos.

Los ciclos de concentración de acuerdo a las siguientes ecuaciones, para tres aspectos diferentes:

$$\text{Ca}(x) = \frac{800}{\text{PPmCa} + \text{PPmHCO}_3 + \text{PPmSO}_4} \quad (4.48)$$

$$\text{Si}(x) = \frac{150 \text{ PPm}(\text{max})}{\text{PPm Si}(\text{muestra})} \quad (4.49)$$

$$\text{Si y Mg}(x) = \frac{36000}{\text{PPm Si} + \text{PPm Mg}} \quad (4.50)$$

La selección de los ciclos de concentración (x), será aquél que tenga el mínimo valor de los calculados en las ecuaciones anteriores. Con esta información se determina el gasto de purga con la siguiente ecuación:

$$W_p = \frac{W_E}{x - 1} - W_A \quad (4.51)$$

También se puede calcular por:

$$\% \text{ PURGA} = \frac{\% \text{ EVAPORADO}}{x-1} \text{ } \% \text{ ARRASTRE}$$

(4.52)

Donde el % está referido a la recirculación total (L').

Como otro criterio, pero con menor aproximación, la purga se puede calcular por:

$$W_p = 0.54 \% L \quad @ 15^\circ F$$

(4.53)

L. En la práctica usual, resulta que el gasto real de agua en la torre no coincide con el gasto de diseño, por lo que toca al fabricante dar la especificación de la efectividad que puede tener la torre en un intervalo de enfriamiento, para cargas en exceso y en defecto en 10% más o menos de L.

Esto es, el gasto en exceso es aquél que corresponde al 10% arriba del de diseño y el gasto en defecto, es aquél que corresponde al 10% abajo del de diseño. Esto es, el valor de L/G de diseño cambiará a 1.1 L/G exceso o a 0.9 L/G defec-

to.

Si se trata de la misma localidad, es de esperarse que la humedad y la temperatura de bulbo húmedo permanezcan constantes, se puede pensar que el rango es el mismo, así también la variación en el gasto no provoca ningún cambio apreciable en la caída de presión, que tendrá el flujo de aire, por lo que el gasto de aire permanecerá constante.

Por todas estas consideraciones, se deduce que el comportamiento de la torre será aquél que fijen sus características.

SELECCION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

Para la selección de una torre de enfriamiento y obtener un diseño preliminar, el fabricante requiere de cierta información que debe ser proporcionada por el cliente, y cierta información que debe investigar él mismo.

Así, tenemos lo siguiente:

Información proporcionada por el cliente:

1. Capacidad de la planta, tipo de proceso y cantidad de calor que se desea disipar. Esta información permite determinar los materiales de construcción, como se verá más adelante.
2. Temperatura de agua caliente y fría más aceptable según el medio en que se enfriará el proceso.

3. Gasto de agua.
4. Tiempo de operación anual.
5. Limitación de espacio.
6. Elevación sobre el nivel del mar.

Información que debe investigar el fabricante:

Esta información se hace por lo regular con ayuda del cliente o de las instituciones donde se pueda obtener información meteorológica.

1. Programación de las variaciones de la carga térmica con las estaciones del año.
2. Obtener de información meteorológica:
 - a) Variación de la temperatura de bulbo húmedo, con las estaciones del año.
 - b) Frecuencia de la temperatura de bulbo húmedo con las estaciones del año.
 - c) Velocidad y dirección del aire.
 - d) Temperatura de bulbo seco promedio que se espera para los diferentes bulbos húmedos.
 - e) Distribución de las temperaturas de bulbo seco y húmedo - para las épocas sin viento.

Con la información mencionada y las "cartas de funcionamiento", para varios tipos de relleno, que ya tiene el fabricante, se hacen los cálculos aproximados para las dimensiones - de la torre de enfriamiento, así como de los equipos necesarios

para el servicio, con potencias y materiales determinados.

Finalmente conociendo:

1. Costo del terreno.
2. Costo de potencia.
3. Costo de agua de suministro.
4. Costo de construcción de estanques, cubierta y sistemas de distribución y recolección de agua.
5. Costo de la torre.
6. Factores de fricción de empaques.
7. Costo de instalación.

Será posible, de entre todas las torres evaluadas, la que resulte más económica. Se necesita el dimensionado de detalle para obtener la torre precisa que cumple con el proceso.

ESPECIFICACIONES GENERALES PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

Al diseñar y construir una torre de enfriamiento, deben especificarse las siguientes normas generales:

ARREGLOS.-

1. El sistema de distribución del agua puede ser del tipo por gravedad, del tipo de baja presión o del tipo de rociado hacia arriba o rociado hacia abajo y consistirá en tubos de distribución superiores, válvulas, boquillas de rociado y por gargantas diseñadas para la distribución del agua sobre el -

relleno de la torre.

2. La torre deberá proveerse con eliminadores de arrastre, diseñados para disminuir al mínimo estas pérdidas cuando esté operando a su máxima carga.
3. Se deberá suministrar un sistema completo de escaleras, pasillos y pasamanos colocados de tal manera que den un acceso completo y seguro al interior y al exterior de la torre.
4. En el caso de torres de enfriamiento con varias celdas, el recipiente de captación y el sistema de alimentación de agua deberán estar divididos o tener las preparaciones necesarias para dividirlos de acuerdo al número de celdas, para facilitar las maniobras de mantenimiento y reparación tanto de la torre como del mismo recipiente.

REQUISITOS DE PROCESO:

Los requisitos de proceso se darán en una hoja de datos por separado para cada torre de enfriamiento. La hoja de datos típica se muestra en la figura (4.14).

DISEÑO:

Diseño Térmico:

1. La torre de enfriamiento deberá diseñarse con las condiciones específicas establecidas en las hojas de datos.
2. El diseño y la capacidad de la torre deberá efectuarse con-

HOJA DE DATOS PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

Fig. (4.14)

Proy.No. _____ No.de Reg. _____
 Planta. _____ Fecha. _____
 Localización. _____ Cotizac. () _____
 _____ Compra. () _____

FABRICANTE _____ MODELO _____

CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACION

Gasto de agua _____ m ³ /h.	Carga por viento _____ Kg/m
Temp. agua salida _____ °C	Factor sismico _____
Temp. agua entrada _____ °C	Perdida arrastre max. _____ %
Temp. bulb. hum. _____ °C	Perd. evap. max. _____ %
Temp. bulb. seco _____ °C	Alt. estat. bombeo _____ m
Presión bar. _____	Potencia en venti- ladores _____ H.P.P.

Velocidad viento _____

DETALLES ESTRUCTURALES

No. celdas _____	Dimensiones int. basin. _____ m
No. ventiladores/celdas _____	Tipo de anclaje. _____
No. total vent. _____	Peso de embarque torre _____ Kg
Dis. dec/celda _____ m.	No. entradas agua. _____
Altura torre _____ m.	Diametro nominal. _____
Alt. chimenea _____ m.	Alt. total de torre _____ m
Dimen. torre lianch. _____ m.	Peso en operación. _____ Kg

MATERIALES DE CONSTRUCCION

Miembros estruc. _____	Cubiertas _____
Espaque _____	Soporteria _____
Elm. de arrastre _____	Espaciadores _____
Chimeneas _____	Lumbreras _____
Sist. dist. agua _____	Boquillas _____
Escaleras y barandales _____	Conex. estruct. _____
Soprt. equipo mec. _____	Fernos de anclaje _____
Fosa _____	Pretratam. madera _____
Tipo de tratam. _____	Partes tratadas. _____

**EQUIPO AUXILIAR
VENTILADORES**

Cantidad _____	Tipo _____
Fabricante _____	Diametro _____
No. aspas _____	Velocidad giro _____ RPM
Presión estat. _____ cm H ₂ O	Presión de vel. _____ cm agua
Gasto aire/vent. _____ PCM ^c	Eficiencia est. _____ %

REDUCTORES DE VELOCIDAD

Cantidad _____	Tipo _____
Modelo _____	Fabricante _____
Relación de reduc. _____	Clasif. mec. AGMA _____
Factor de servicio. _____	No. de reduc. _____

TRANSMISIONES DE POTENCIA

Cantidad _____	Modelo _____
Potencia nom. _____ H.P.	Fabricante _____
Material de acoplam. _____	Material de transm. _____

UNIDADES MOTRICES

Cantidad _____	Clase _____
Tipo _____	Fabricante _____
Velocidad giro _____ R.P.M.	Tensión/Fases/Frecuen. _____
Potencia Nominal _____ H.P.	

diciones psicrométricas específicas que se encuentran en el lugar de instalación de la planta.

1. Ventiladores:

- a) Los ventiladores deberán de operarse para operar a una velocidad baja en el extremo del aspa y estar balanceado dinámica y estáticamente. El nivel de ruido deberá limitarse a 75 decibeles máximo, a 15 m. del ventilador.
- b) Las aspas del ventilador serán de aleación de aluminio o de acero inoxidable y diseñadas para permitir variaciones de su paso en el campo. El paso de los ventiladores se fija en inclinaciones de las aspas entre 10 y 16 grados.

El máximo diámetro del ventilador será de 6 m. (cuando se empleen ventiladores mayores de 3 m. de diámetro, éstos deberán tener ocho o más aspas por ventilador con objeto de eliminar pulsaciones).

- c) Los ventiladores deberán balancearse en fábrica y sus aspas deberán marcarse de tal manera que se identifiquen fácilmente con los cubos y cajas del ventilador.
- d) Las chimeneas de los ventiladores deberán diseñarse para minimizar las pérdidas de entrada y la recirculación de aire caliente a la torre. La altura de las chimeneas deberá cumplir con los requisitos mínimos de seguridad.
- e) Las aspas, cubos y cajas del ventilador deberán diseñarse para prevenir la formación de hielo en cualquiera de di-

chas partes, en época de frío.

2. Unidades de transmisión de potencia:

- a) Los engranes serán diseñados de acuerdo con AGMA. Se deberá instalar un interruptor de vibración que abrirá cuando ésta sea excesiva. El voltaje para el interruptor deberá ser el mismo que para el motor, hasta 440 V., arriba de esta tensión deberá usarse un circuito auxiliar a tensión reducida.
- b) La línea de aceite deberá estar por el lado de afuera del anillo del ventilador con un indicador de nivel. El tubo usado deberá ser de acero inoxidable tipo AISI 304. Cada unidad motriz y reductor de engranes deberá suministrarse con el cople flexible.
- c) La transmisión por banda podrá usarse en los límites máximos señalados a continuación, para la potencia transmitida y diámetro de las aspas del ventilador.
- Las bandas V, serán del tipo de conducción estática. Deberán usarse unidades de engrane cuando se excedan los siguientes valores:

Tipo de montaje	Transmisión de potencia máxima (HP)	Máximo diámetro del aspa. (m)
Suspendido	25	3.65
Superior o de anillo	20	3.05

3. Unidades motrices:

- a) Las unidades motrices pueden ser: motores eléctricos, turbinas de vapor, gas o algún otro tipo.

Los motores eléctricos deberán ser a prueba de humedad.

4. Estructuras:

- a) Los ventiladores, unidades de transmisión de potencia y unidades motrices deberán montarse sobre una base metálica para así asegurar la conservación de la alineación y el mínimo de vibración.

Se deberá proveer las instalaciones necesarias para las chumaceras, engranes y motores puedan lubricarse con el equipo en operación y sin riesgo para el personal.

- b) No deberán existir fugas o derrames por los lados o extremos de la torre.

SISTEMAS DE CONTROL.-

El tipo de sistema de control deberá especificarse de acuerdo con una serie de reglas fijas, dependiendo del siguiente criterio:

1. No se requiere control del proceso:

- a) Los ventiladores deberán ser manualmente ajustables
b) Los motores deberán ser de una velocidad.

2. Control de proceso limitado:

- a) Los ventiladores deberán ser manualmente ajustables.

b) Por lo menos un motor deberá ser de dos velocidades.

3. Se requiere cuidadoso control de procesos:

- a) Pueden usarse ventiladores autovariantes, del tipo baja histeresis.
- b) Como alternativa, se podría usar lumbreras en los lados de la torre para controlar el flujo de aire de enfriamiento a través de la torre. Las lumbreras pueden ser operadas manual o automáticamente.

Una vez que la torre ha sido diseñada, construida e instalada, es necesario comprobar que su funcionamiento es el mismo que el fabricante garantiza. En la actualidad no se tiene ningún lineamiento nacional sobre las normas que debe cumplir dicha prueba, por lo que se utilizan las que presenta el Instituto de Torres de Enfriamiento.

CAPITULO

5

MATERIALES DE CONSTRUCCION PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

C A P I T U L O V

MATERIALES DE CONSTRUCCION PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

LA MADERA EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

La madera roja ha sido la especie más comúnmente utilizada porque es resistente a la descomposición y porque mantiene su configuración estructural, cuando es sujeta a grandes cantidades de agua a bajas y moderadamente altas temperaturas.

Originalmente, se utilizaba la madera roja, sin tratar y se le daba poca atención a la composición del agua.

Como resultado de esto, la madera tendía a la descomposición y a debilitarse. Por lo cual el agua empezó a ser tratada para retardar esto, así como para controlar el crecimiento micro biológico.

Pero el agua sin tratar, no es el único causante de -- debilitamiento de la madera, algunos metales en contacto con ésta, también la hacen susceptible. Los tratamientos preservativos de presión, fueron adaptados no únicamente para la madera roja, -- sino para otras especies tales como; abeto Douglas, pino, ciprés y abeto amarillo.

El abeto de Douglas, tratado, tiene un buen record de-

servicio. La madera contrachapada, grado mariño, ha encontrado muchos usos para los componentes de algunas torres, tales como; el cilindro del ventilador, barras de salpiqueo, eliminadores de rocío, con un excepcional servicio.

Las tablas (5.1) y (5.2), describen las condiciones de ocho variaciones de madera utilizadas en torres de enfriamiento y se basan en experiencias y estudios realizados por un fabricante⁽⁷⁾.

Así mismo las figuras (5.1), (5.2) y (5.3), muestran algunas torres con componentes de madera, como tolvas, soportes de láminas de entrada de aire (persianas), eliminadores de rocío, etc.

METALES PARA MAQUINARIA Y TUBERIA.-

El acero galvanizado, así como el revestido con cadmio, son los más caros en maquinaria para torres de enfriamiento.

Los componentes del acero revestido con cadmio se pueden encontrar en los sistemas de líneas eléctricas, estación de control del ventilador y coples de la flecha del mismo.

La experiencia ha demostrado que debido a la excesiva corrosión de estos materiales, son muy sensibles en la atmósfera de la torre, y se comenta⁽⁸⁾, que este tipo de maquinaria -- construida con este tipo de acero, es reemplazada en el momento

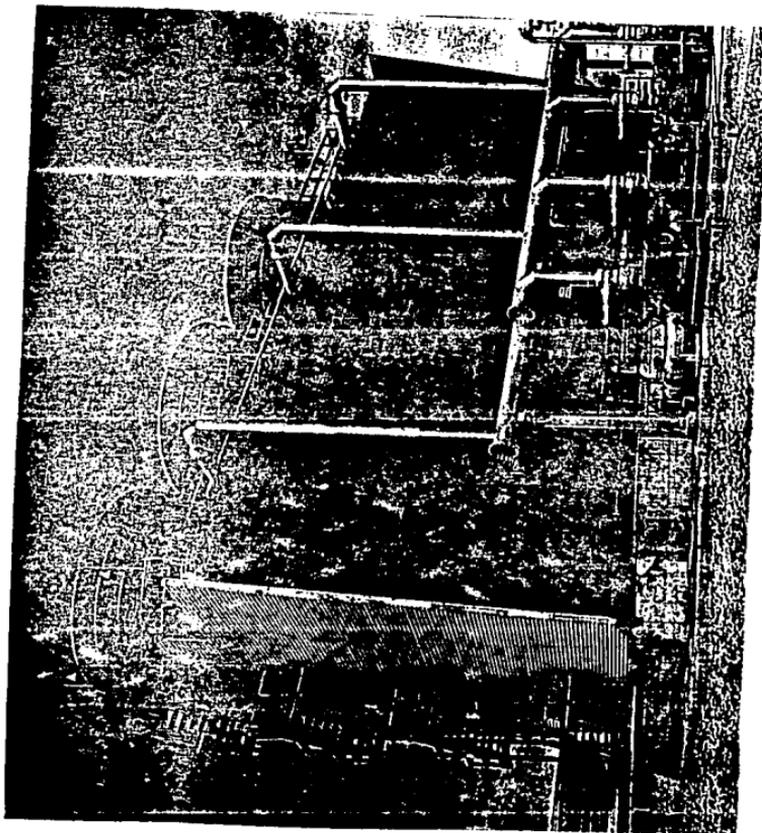
MATERIAL	COMPORTAMIENTO
Fresno	Sin cambio aparente
Madera roja	Sin cambio aparente
Pino de oregon	Sin cambio aparente
Pino amarillo	Sin cambio aparente
Abeto	Sin cambio aparente
Arce	Sin cambio aparente
Secoya	Sin cambio aparente
Ciprés	Sin cambio aparente

Tabla (5.1) Condiciones de madera después de 31 días de inmersión en agua fría. Examinada después de siete días de desecación.

MATERIAL	COMPORTAMIENTO
Fresno	Sin cambio aparente
Madera roja	Sin cambio aparente
Pino de oregon	Sin cambio aparente
Pino amarillo	Ligeramente quebradizo
Abeto	Sin cambio aparente
Arce	Sin cambio aparente
Secoya	Sin cambio aparente
Ciprés	Sin cambio aparente

Tabla (5.2) Condiciones de maderas después de ocho horas de ebullición en agua fría. Examinadas después de siete días de desecación.

Fig. 5.1 Torre con componente de madera.



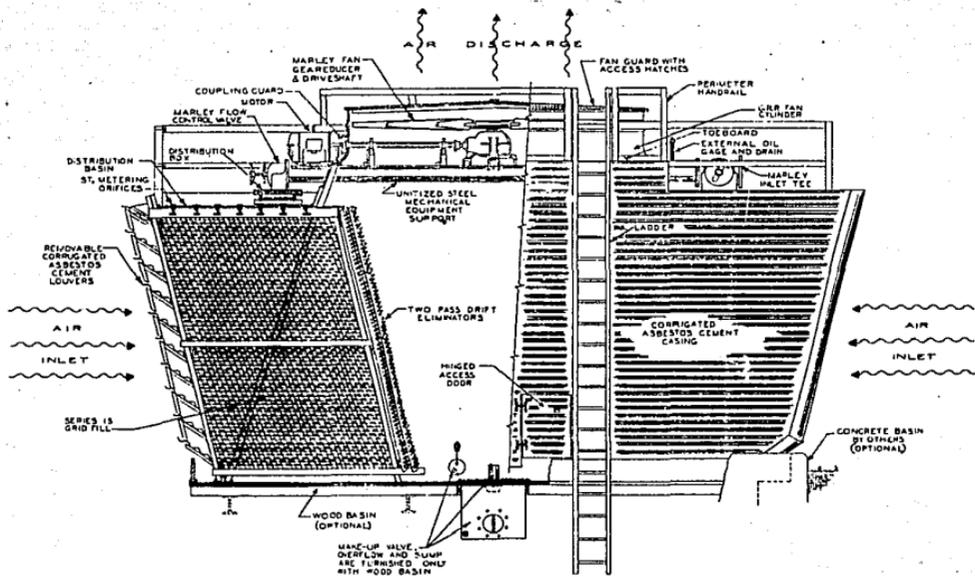


Fig. 5.2 Torre con componentes de madera.

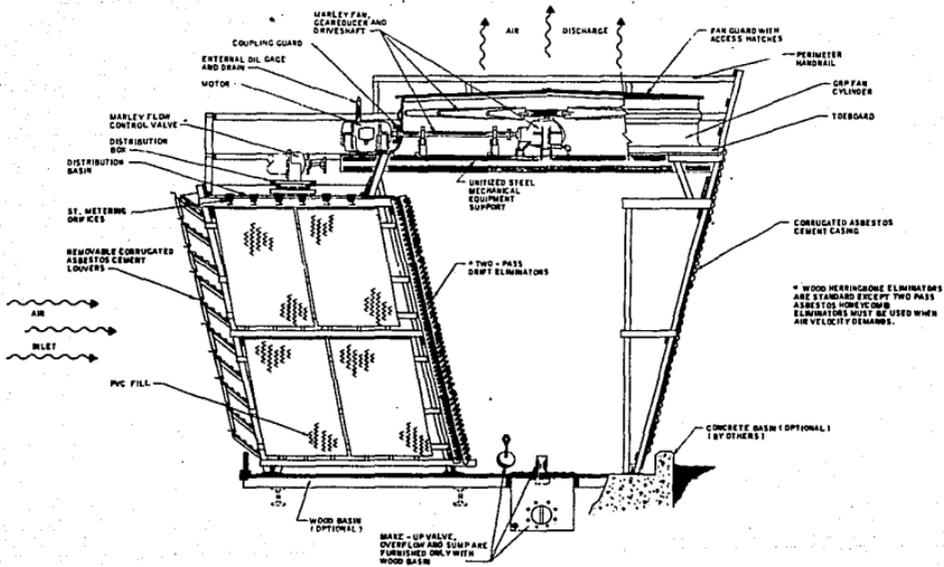


Fig. 5.3 Torre con componentes de madera.

que el primer mantenimiento se lleva a cabo.

El acero galvanizado rolando en caliente, es el más aplicado como soporte en las áreas inundadas de la torre, a condición de que se use un buen sistema de tratamiento del agua.

Esto es un factor muy importante para asegurar el funcionamiento de cualquier material.

Se ha encontrado que el acero galvanizado en la cámara de llenado es decir, en la parte superior de la torre para entrar en contacto con los rociadores es un mal material para uso.

Por otro lado se puede encontrar agrietamiento y corrosión sobre la maquinaria debido a los depósitos de sales, causados por la corriente de aire, lo cual prevee un desarrollo favorable para la corrosión biológica. Los recubrimientos de galvanizado pueden convertir catódico el acero a altas temperaturas de agua (158°F), mientras que el acero galvanizado también se descompone y descompone a su vez, a la madera roja si se usan juntos, lo que sucede es que como el recubrimiento es disuelto y vuelve catódico el acero, los materiales ferrosos producidos son aprovechados por las bacterias y eso da como resultado que la madera se pudra.

Las aleaciones de cobre, deberán seleccionarse con mucho cuidado; la aleación llamada latón, contiene más de 20% de zinc y está sujeta a deszincificación, pérdida de resistencia y rompimiento en tratamiento continuo de agua.

Todas aquéllas aleaciones que contienen menos cantidad de zinc, no están sujetas a rompimiento, pero son muy duras para maquinarse, la aleación silicón - bronce, resulta muy buena en propiedades anticorrosivas, tiene excelente dureza y funciona muy bien en toda la torre, pero su costo es muy elevado y en realidad son pocos los usuarios que toman la decisión de utilizarlo.

Los aceros inoxidables austeníticos, es decir, los que contienen de 16 a 26% de níquel y 0.08% de carbón, como el acero inoxidable 316, el 304, el 304L, el 316L, etc., han sido de uso menos extenso que otros aceros o metales, para la maquinaria de la torre. A pesar de que estos aceros son comúnmente recocidos en su fabricación, sobre torsión, sobre torsión deberán ser evitados donde se apliquen grandes esfuerzos.

Estos materiales están también sujetos a perder resistencia por corrosión y rompimiento causado por la precipitación de carburos en el momento de aplicar la soldadura.

En lo que respecta a tuberías, las usadas para sistemas de distribución de las torres de enfriamiento, es por lo regular de calibre 10 a 14 para sistemas de baja presión.

Las tuberías de acero galvanizado da algunas veces, de regular a buen servicio en sistemas de baja presión, pero a otras condiciones en tres o cuatro años es inservible.

Los sistemas de tuberías instalados sobre la cámara de llenado, esto en torres de flujo cruzado, aún con recubrimientos

tratados por inmersión en caliente, fallan rápidamente.

Pero si son instalados, por debajo de los eliminadores de humedad, en donde el agua tratada fluye constantemente a través de la tubería, entonces tiende a dar un buen servicio.

Si las condiciones son tales que, la tubería galvanizada no pueda funcionar, entonces, los recubrimientos galvanizados deberán ser protegidos por pintura vinílica especial, o si se usa acero desnudo, se deberá aplicar un recubrimiento de epoxy tipo alquitrán catalizado o similar.

En torres de altas temperaturas, la experiencia tiene a ser muy costosa con el acero, sobre todo en la flecha y cople del reductor, en el cual se encuentra, según observaciones de usuarios, una reducción del diámetro de 2 1/8 de pulgadas -- hasta 7/8 de pulgadas, en tres o cuatro años.

Con esta experiencia, los fabricantes, trataron primero de usar el reductor con la flecha integrada, entonces se observó que se tenía que reemplazar completamente todo el engranaje y otras partes de la unidad. Algunas veces este problema tendía a ser resuelto por medio de un blindaje de cromo en las partes expuestas de la flecha, un procedimiento que además incrementaba la vida del sello de lubricación, pero es un procedimiento -- al que hay que estar vigilando constantemente y tiende a ser poco usado, conforme se han probado otros materiales.

El hierro gris (cast iron), es muy usado para los ejes del ventilador, algunas veces, este material exhibe muy bue-

nas propiedades anticorrosivas, pero debe tenerse mucho cuidado - en la fabricación y en la instalación para evitar rompimiento.

El aluminio colado (cast aluminium), es un material usado para las aspas del ventilador y por 15 a 20 años ofrece un servicio excelente si se tiene cuidado en su instalación.

En muchos casos, es necesario aislar con fibra de vidrio, el mango de las aspas de aluminio, es decir desde la sujeción de acero, para prevenir la corrosión desigual del metal. El aluminio en torres de alta temperatura da un muy buen servicio.

En las tablas (5.3) y (5.4), se muestran las propiedades mecánicas y físicas, así como el rendimiento de algunos metales utilizados en la construcción de maquinaria de torres de enfriamiento.

PLASTICOS Y ASBESTO - CEMENTO.-

De muchos tipos de plásticos, que tienden a ser usados en servicio de torres de enfriamiento, el más común es el poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP), este plástico es muy utilizado en lo que es el cilindro del ventilador, sellos, aspas del ventilador, soportes de llenado, empaque y revestimientos, - con muy buenos resultados.

Uno de los problemas principales, con los materiales resinosos con fibra de vidrio, ha sido el sellado de la propia fibra de vidrio en la resina durante la fabricación, cuando se -

TABLA (5.3) Propiedades Mecánicas y Físicas de Metales usados en construcción de Torres de Enfriamiento.

MATERIAL	COMPOSICION NOMINAL (ELEMENTOS ESENCIALES)	FORMA Y CONDICION	PROPIEDADES MECANICAS TÍPICAS			CONSTANTES FISICAS TÍPICAS		
			RESISTENCIA A LA CADEENCIA (0.2% DE DESVIACION) 1000 lb/Lf	RESISTENCIA A LA TRACCION 1000 lb/in ²	ELONGACION EN 2 plg. %	CALOR ESPECIFICO (32-212°F) BTU/lb°F	COEFICIENTE DE DILATACION TERMICA (32-212°F)	CONDUCTIVIDAD TERMICA 32-212°F BTU/ft ² h°F plg
Acero al carbono A.I.S.I. S.A.E. 1020	Fe Resto Mn. 0.45 Si 0.25; C. 0.20	Recocido Laminado en caliente Endurecido	38	65	30	0.017	6.7	360
			42	68	32			
			62	90	25			
Hierro dulce o de Forja	Fe. Bal., Chatarra 2.5	Laminado en caliente	30	48	30 (en 8 plg)	0.11	6.35	410
Hierro colado Gris	C. 34, Si 1.8 Mn 0.5 Fe, resto	colado (vaciado)	---	25 (mínimo)	0.5 (máximo)	---	6.7	310
Hierro Dúctil Com. H-1	C14 Si 1.8 Mn. 4 p.0.1 Max. Ni 0.1 Mg 0.06 Fe resto	Colado Colado (vaciado) Colado templado	53	70	18	---	7.5	228
			68	90	7			
			108	135	5			
Hierro Dúctil (Com. H-2)	C 3.3 Si 4.3 Mn 0.4 P 0.1 Max Fe Resto	Colado (recocido y vaciado)	60	80	10	---	---	200
Hierro Dúctil (Invertido)	C 2.8 Si 2.5 Mn 1 P 0.2 Max. Ni 20, Cr 2, Mg 0.1 Fe resto	Colado (vaciado)	35	68	10	---	10.4	---
Hierro-invariante Tipo 1	C 2.8, Si 2.0 Mn 1.2 Ni 15.5 Cr 2.5 Cu 6.5 Fe resto	Colado (vaciado)	---	27	2	0.110	10.3	276
Hierro-invariante Tipo 2	C 2.8, Si 2.0 Mn 1.0, Ni 2.0 Cr 2.5 Fe resto	Colado (vaciado)	---	27	2	0.116	9.6	276

TABLA (5.3)

Continuación.

MATERIAL	COMPOSICION NOMINAL (ELEMENTOS ESENCIALES) %	FORMA Y CONDICION	PROPIEDADES MECANICAS TÍPICAS			CONSTANTES FISICAS TÍPICAS		
			RESISTENCIA A LA CAEDENCIA (0.2% DE DESVIACION) 1000 lb/in ²	RESISTENCIA A LA TRACCION 1000 lb/in ²	FLONGACION EN 2 plg. %	CALOR ESPECIFICO (32-212°F) BTU/lb°F	COEFICIENTE DE DILATACION TERMICA (32-212°F)	CONDUCTIVIDAD TERMICA (32-212°F) BTU/in ² h°F plg
Acero Inoxidable Tipo 304	Fe resto Cr 19 Ni 9 C 0.09 Max.	Recocido, laminado en frío	30 a 100	85 a 105	62 (A B plg.)	0.12	9.6	113
Acero inoxidable Tipo 304 L	Fe resto, Cr 25 Ni 20 C 0.03 Max.	Recocido Estirado en frío	30 95	80 125	60 25	0.12	9.6	113
Acero Inoxidable Tipo 316	Fe resto, Cr 18 Ni 11 Mo 2.5 C 0.10 Max.	Recocido, laminado en frío.	30 ^a a 120	90 a 150	50 (a B plg)	0.12	8.9	113
Acero Inoxidable Tipo 316 L	Fe resto Cr 17 Ni 12 C 0.03 Max Mo 2	Recocido Estirado en frío	30 60	80 90	60 45	0.12	8.9	113
Aluminio de Aluminio 6061	Al 99% y más	Recocido o laminado frío H 14 laminado frío H 18	6 21 27	13 18 24	45 20 15	--- 0.2300 (68 °F)	13.10 (68 °F)	1540 --- (68 °F)
Níquel Plata 600	Cu 65 Zn 17 Ni 18	Recocido Laminado en frío (HT) Alambre Est. frío	25 70 ---	58 85 105	40 4 ---	0.09	9.0	230
Níquel Plata 600 forjado	Cu 65 Zn 25 Ni 10	Recocido Laminado en frío (HT) Alambre Est. frío	20 70 ---	55 88 110	45 4 ---	0.09	9.0	320
Latón 602	Cu 99 y más	Recocido Estirado en frío Laminado en frío (HT)	10 40 40	32 45 46	45 15 5	0.092	9.3	2700
Latón 603 (forjado)	Cu 85 Zn5	Recocido Estirado en frío Laminado en frío	15 55 60	40 70 75	50 15 7	0.090	9.8	1100

TABLA (5.4) Rendimiento de uso en cuanto a corrosión de mesteles.

MATERIAL	PROBADO EN AGUA DULCE, ESTÁTICA O EN MOVIMIENTO	PROBADO EN AIRE AMBIENTAL E INDUSTRIAL
Hierro Colado, Grafito Escamoso, Aleación Benicilla	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.	Regular a Bueno.
Hierro Ductil	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.	Regular a Bueno
Ni- Resistente, Hierro colado Tipo 1(14Ni, 7Co, 2Cr, resto Fe)	Bueno a Excelente	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.
Ni- Resistente Hierro colado Tipo 2(20-30Ni, 2-3Cr, resto Fe)	Bueno a Excelente	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.
Ni- Resistente Hierro colado Ductil(24Ni, Resto Fe)	Bueno a Excelente	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.
Hierro con 14% de silicio	Bueno a Excelente	Normalmente excelente
Acero Dulce También aceros y Hierros de Baja aleación	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.	Regular a Bueno
Acero Inoxidable Ferrítico 17% Cr	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.	Bueno, apropiado cuando las alternativas superiores sean anticorrosivas.
Acero Inoxidable austenítico 18% Cr, Tipo de 8% Ni	Normalmente excelente	Bueno a excelente
Acero Inoxidable austenítico tipo 18%Cr, 12%Ni, 2.5 Mo	Normalmente excelente	Normalmente excelente
Acero Inoxidable austenítico Tipo 18Cr, 29Ni, 2.5Mo, 1.5Cu	Normalmente excelente	Normalmente excelente
Ni-0-Ni, Aleación de Niquel Hierro-cromo(40Ni, 2Cr, 38Mo, 1.5 Cu, resto Fe)	Normalmente excelente	Normalmente excelente
ALUMINIO y sus aleaciones	Bueno, Aprop. cuando las alternativas sup. son anticorrosivas.	Bueno a excelente

pone en contacto con agua, ya que puede ocurrir ampollamiento alrededor de la fibra expuesta lo cual trae consigo pérdida de dureza en el material terminado. (9)

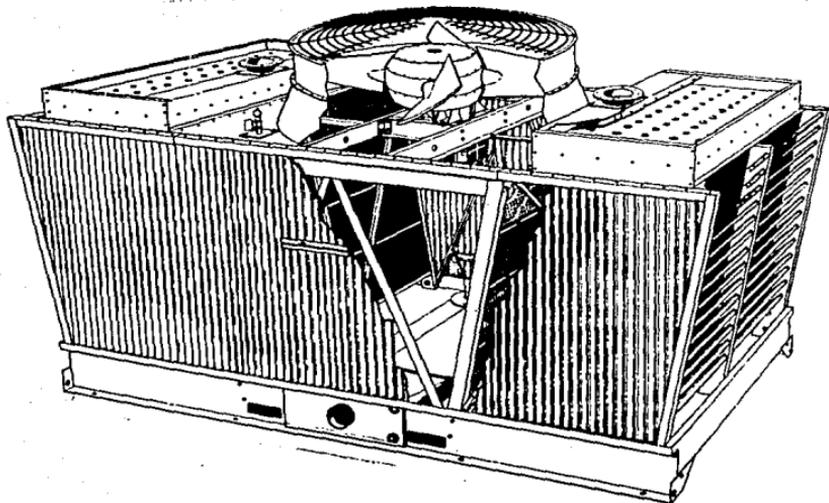
Debido al alto costo del GRP, su uso es algo limitado como reemplazamiento comercial, a no ser que una fabricación en serie se lleve a cabo, para así abatir los costos de moldeo y materia prima.

De esta manera y debido a la implementación actual de materiales plásticos sobre diseño como partes de las nuevas torres de enfriamiento se está observando una economía y eficiencia en la construcción de torres. Como ejemplo se pueden citar las torres serie NC y Permatower de The Marley Co. (figuras 5.4 y 5.5). Estas torres llevan un nuevo tipo de soporte de relleno de GRP y con los cuales se ha tenido una reducción de los costos de instalación de relleno y además, la experiencia ha demostrado que tienen un tiempo de duración que oscila entre 10 y 15 años.

Por otro lado el polipropileno es usado en las torres para mantener los eliminadores de rocío en posición correcta, es decir, como soporte.

Aunque este material ha demostrado, por muchos años, una operación satisfactoria, en otros usos, a altas temperaturas se vuelve frágil y tiende a quebrarse.

Al igual que los metales, madera, o cualquier otro material en contacto con agua, en los plásticos, también debe tenerse un correcto control de la circulación de agua, ya que algunos son-



Helleno
de PVC

Fig. 5.4 Torre de Enfriamiento de la serie NC de Marley.

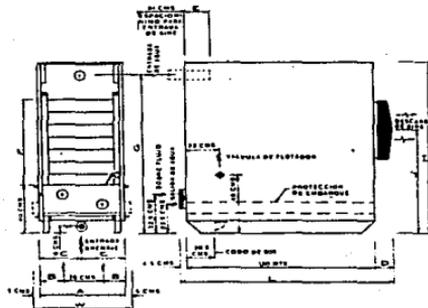


Fig. 5.5 (a)

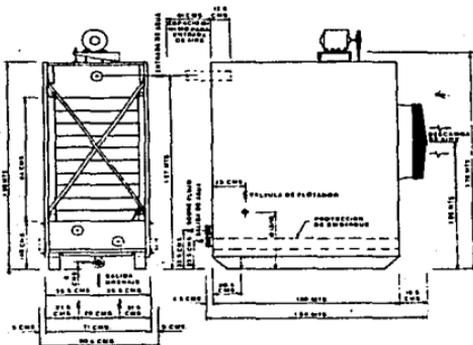


Fig. 5.5 (b)

Fig. 5.5 (a),(b). Torres modelo "Permatower" de Marley
 Ambos modelos utilizan relleno de GRP.

sensibles al p^H y entonces pueden debilitarse.

El futuro se espera aún más promisorio para los materiales plásticos, en la construcción de torres de enfriamiento, especialmente ahora que los métodos de fabricación son más eficientes y los materiales están resultando más económicos.

Las tablas (5.5) y (5.6), muestran propiedades y características de plásticos aplicables a torres.

Las láminas de asbesto-cemento, (CAB), han demostrado muchos usos en la construcción de torres, tales como de las paredes externas, persianas o como relleno.

Además de que tienen buena apariencia, dan buen servicio en torres atmosféricas (casi no usadas en México), y son fáciles de instalar comparadas con materiales como madera o tablas del tipo ranura y lengüeta, aunque también tienen sus limitaciones.

A bajo p^H de agua de circulación (menos de 5.0), y a altas temperaturas así como a altas concentraciones de cloruros, se produce debilitamiento tienden al rompimiento.

EL CONCRETO EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

El concreto reforzado, es un material importante para la industria, donde se requieren grandes torres de enfriamiento (termoeléctricas, por ejemplo).

Muchas unidades de flujo cruzado y contraflujo son construidas con basines muy profundos, teniendo muchos miembros de es

TABLA (5.5) Comportamiento de Plásticos en agua y propiedades importantes.

MATERIAL	AGUA DULCE EN MOVIMIENTO COMPORTAMIENTO	FLEXIBILIDAD	TEMPERATURA °F PROMEDIO MAXIMA	TOXICIDAD	RESISTENCIA A LOS IMPACTOS	ADHESION A METALES FERROSOS	ADHESION A METALES NO FERROSOS	ADHESION A PINTURAS ANTIGUAS
Alquido	Regular	Excelente	200	Ninguna	Muy buena	Excelente	Regular	Muy buena
Alquidoamino	Bueno	Muy bueno	250	Ligera	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno
Alquidofenolicos	Bueno	Bueno	250	Ninguna	Buena	Excelente	Excelente	Bueno
Siliconas	Bueno	Muy bueno	450	Ninguna	Buena	Muy buena	Muy buena	Excelente
Alquidourea	Regular	Muy bueno	225	Ligera	Excelente	Excelente	Muy buena	Bueno
Atquilos Estirenados	Bueno	Bueno	200	Ligera	Buena	Regular	Regular	Muy bueno
Acrilicos	Excelente	Excelente	180	Ninguna	Excelente	Muy buena	Muy buena	Malo
Bisfenolicos	Excelente	Excelente	200	- - -	Excelente	Excelente	Excelente	- - -
Nitrocelulosa	Bueno	Excelente	180	Ninguna	Excelente	Muy buena	Buena	Malo
Bisfenol A	Excelente	Excelente	195	Ninguna	Excelente	Muy buena	Buena	Malo
Filicopolio	Excelente	Excelente	300	Ninguna	Excelente	Mala	Mala	Malo
Epoxianina	Bueno	Regular	400	Ninguna	Buena	Excelente	Excelente	Bueno
Epoxistereno	Muy bueno	Excelente	300	Ninguna	Excelente	Excelente	Excelente	Muy bueno
Epoxiformano	Excelente	Excelente	350	Ninguna	Buena	Excelente	Excelente	Excelente
Epoxiurea	Bueno	Muy bueno	400	Ninguna	Muy buena	Excelente	Excelente	Malo
Epoxifenol	Excelente	Muy bueno	400	Ninguna	Muy buena	Excelente	Excelente	Malo
Epoxiurea	Bueno	Muy bueno	400	Ninguna	Buena	Excelente	Excelente	Malo
Poliester Clorado	Excelente	Regular	300	Ninguna	Buena	Excelente	Excelente	Malo
Polipropileno Clorado	Excelente	Muy bueno	250	Ligera	Buena	Buena	Muy bueno	Excelente

MATERIAL	AGUA DULCE EN MOVIMIENTO COMPORTAMIENTO	FLEXIBILIDAD	TEMPERATURA *F PROMEDIO MAXIMA	TOXICIDAD	RESISTENCIA A LOS IMPACTOS	ADHESION A METALES FERROSOS	ADHESION A METALES NO FERROSOS	ADHESION A PINTURAS ANTICUAS
Pterocarburo (especial al aire)	Excelente	Bueno	550	Ligera	Excelente	Muy bueno	Muy bueno	Malo
Furano	Excelente	Regular	300	Ninguna	Regular	Regular	Regular	Excelente
Ponolicoa	Excelente	Bueno	350	Ninguna	Buena	Excelente	Excelente	Bueno
Pollamidas (Nylon)	Regular	Bueno	300	- - -	Muy buena	Muy bueno	Muy bueno	- - -
Poliéstera	Bueno	Bueno	200	Ninguna	Regular	Regular	Regular	Malo
Poliétileno	Excelente	Excelente	225	Ninguna	Excelente	Excelente	Excelente	Malo
Cauchos Clorado	Excelente	Muy bueno	200	Ligera	Buena	Regular	Regular	Regular
Neopreno	Excelente	Excelente	200	Ninguna	Excelente	Muy bueno	Muy bueno	- - -
Hipalon	Excelente	Excelente	250	- - -	Excelente	Muy bueno	Muy bueno	Regular
Vitón	Excelente	Bueno	550	Ligera	Excelente	Muy bueno	Muy bueno	Malo
Silicones	Excelente	Regular	550	Ninguna	Regular	Regular	Regular	Excelente
Metileno	Excelente	Excelente	300	Ligera	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno
Vinilo-Alquil en Apdux. (1,1)	Excelente	Excelente	180	Ninguna	Excelente	Muy bueno	Muy bueno	Malo

TABLA (5.6) Comportamiento de Plásticos en agua y propiedades importantes.

estructura de concreto pretensado.

La examinación de algunos de estos miembros ha mostrado que pueden ocurrir fallas en el concreto, aún cuando el rendimiento de las paredes es propiamente diseñado y hay control en el agua de circulación.

La compañía The Marley Co., experimentó con dos tipos de torres una de contraflujo y la otra de flujo cruzado, y se muestran aquí sus resultados.

La torre de contraflujo fue diseñada para que el nivel de agua de operación fuera a la mitad de las vigas de concreto, con un espacio abierto lo suficientemente grande de aire entre el relleno y las vigas. La torre de flujo cruzado, tuvo el relleno extendido al nivel del agua.

Con menos de la mitad de las vigas sumergidas, en agua caliente a más o menos temperatura constante, las vigas en la torre de contraflujo fueron expuestas al aire extremadamente frío durante el invierno, lo cual trajo como resultado una expansión térmica diferencial de las vigas. La torre de flujo cruzado por contraste utilizando el relleno, llevando agua a lo largo de las vigas no presentó este fenómeno.

Otro problema que es causado por fallas en el basín de concreto, es el depósito de sulfato de calcio sobre la parte superior del basín, bajo la entrada de aire.

Esto, da como resultado una desintegración y degradación del concreto y consecuentemente rompimiento. Si los depósi-

tos de calcio, son de esperarse, deberán usarse formulaciones de concreto especial no susceptible a esta degradación.

EQUIPO AUXILIAR DE TORRES DE ENFRIAMIENTO Y SU MATERIAL DE CONSTRUCCION.-

REDUCTORES Y MOTORES:

Los reductores con chaflán helicoidal o espiral con engranaje de ángulo recte, son uno de los más comúnmente utilizados.

El rango de potencia mecánica y factores de servicio, son seleccionados normalmente de acuerdo al código AGMA, (American Gear Manufactures Assn).

Algunos de los factores a considerar en la selección de reductores son, el tipo de sellos, fluido y sistema de lubricación.

Los sellos mecánicos sobre la salida de la flecha del reductor, son muy susceptibles a penetración de humedad, la cual crea problemas con el fluido de lubricación e incrementa la corrosión.

Un ensamble de cierre tipo laberinto es lo más recomendable para prevenir tal entrada de humedad, este consiste en una superficie maquinada fija y otra rotatoria sellada con grasa resistente a la humedad. Los sellos en la entrada de la flecha pueden ser hechos de neopreno, caucho u otro material sintético. Para prevenir la corrosión rápida causada por humedad, está siendo neces-

rio en algunos casos recubrir el interior del reductor con resinas epóxicas.

Las figuras (5.6) y (5.7), muestran tipos de reductores muy utilizados en torres de enfriamiento.

Los motores usados para servicio de torres de enfriamiento, usualmente clasificados por NEMA (National Electric Manufacturers Assn), deberán ser seleccionados en la base de torque normal con corriente normal de arranque y con voltaje exacto para lo cual serán usados. Los tipos estándar son suministrados con cojines de bronce, lubricados con grasa o cojines de camisa o manga.

El enclaustramiento de los motores puede ser de los clasificados como TCCV hasta a prueba de explosión.

Los motores TCCV y a prueba de explosión, son ampliamente usados para la industria química, son de costo considerable, pero su instalación en torres de enfriamiento, bien vale la pena hacer este gasto.

ASPAS DE VENTILADOR:

Algunas de las primeras aspas, fueron hechas de madera y de acero al carbón pintado, pero se tenían problemas como ampollamiento entre las láminas de madera y las aspas acumulando agua, lo que traía como consecuencia un desbalance entre aspas; lo mismo pasaba con el acero pintado.

Ahora, las aspas son formadas por aluminio fundido, a

Fig. 5.6 Reductor para ventilador.

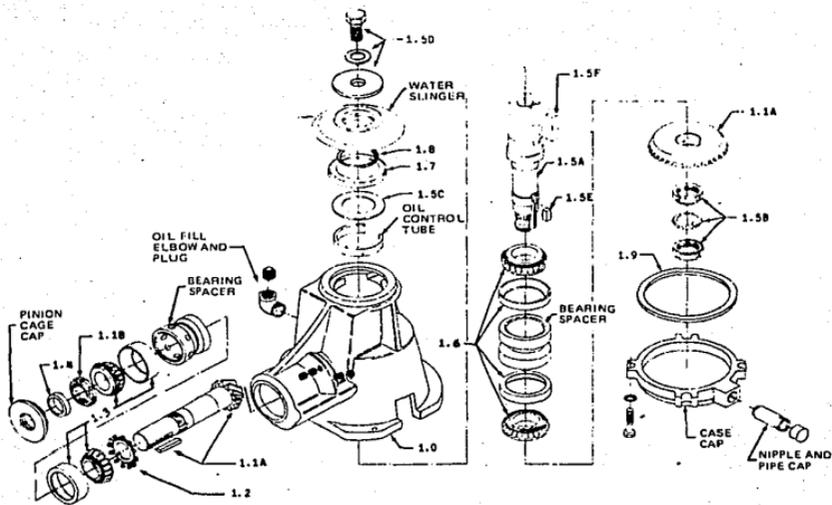
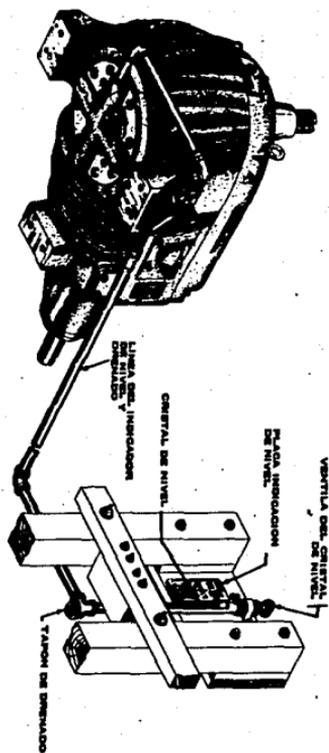


Fig. 5.7 Reductor equipado con vidrio de nivel y línea de drenado.



ro inoxidable y resina epóxica reforzada con fibra de vidrio. Las aspas del ventilador, fabricadas en aluminio fundido, aunque pesadas, dan un servicio excepcional, aunque se deben tomar ciertas precauciones tales como la evaluación de la atmósfera a la cual las aspas estarán en contacto, por ejemplo una torre normal donde el control del p^H es correcto y donde no hay goteo, la atmósfera no deberá ser corrosiva al aluminio.

Las aspas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio, son relativamente nuevas en el mercado y tienen muchas ventajas, este material es virtualmente libre de corrosión y provee importantes factores de seguridad:

Primero, las aspas son en mucho, más ligeras que las hechas de aluminio; segundo, tales aspas no se rompen bajo impacto.

Uno de los factores más importantes en la selección de cualquier ventilador es, que cada aspa debe estar estáticamente y dinámicamente balanceada.

SOPORTES DE ACERO ESTRUCTURAL.-

La alineación del par motor-reductor, es de mucha importancia ya que una correcta alineación alarga la vida de servicio de los dos equipos, de la flecha, engranes y coples.

El camino más satisfactorio para mantener tal alineación es el de instalar las unidades sobre una estructura de acero diseñada para soportar el peso muerto de las unidades y el movi-

miento del ventilador bajo condiciones de plena carga.

El soporte deberá ser capaz de sostener el peso completo del equipo y conectar todas las columnas verticales para la correcta distribución del peso del equipo, de esta forma si algún movimiento vibratorio ocurre, todo el sistema mecánico deberá moverse al unísono.

FACTORES A CONSIDERAR PARA LA SELECCION DE MATERIALES DE CONSTRUCCION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

El tipo de proceso involucrado, es uno de los factores de importancia que hay que considerar en la selección de los materiales de construcción de torres de enfriamiento.

Si por ejemplo, se presentara una filtración de amoníaco dentro de una torre que se utiliza en un sistema de refrigeración por amoníaco, el latón u otra aleación de cobre, sería un material de construcción mal seleccionado.

O si un proceso en el cual se maneje aceite y este último se infiltra en el sistema de circulación de la torre, el balance de transferencia de calor de los eliminadores de rocío y el relleno podrían verse afectados considerablemente.

Pero otras materias pueden producir el mismo efecto que el aceite, tal es el caso de la materia vegetal en la madera la cual produce una reducción en el área de contacto y disminuye por lo tanto la eficiencia de la torre.

Por otro lado, la capacidad de la planta y paralelamente la cantidad de calor que se desea disipar, también son factores muy importantes en la selección de los materiales de construcción para las torres de enfriamiento, y aquí el factor costo juega un papel muy importante.

Por ejemplo, en una termoeléctrica, la cantidad de agua a manejar, hace que estas plantas elijan el concreto como material de construcción de sus torres, con internos o rellenos por lo regular de material plástico del tipo película, la razón, es que debido al requerimiento continuo y de grandes cantidades de agua se pretende evitar al máximo el mantenimiento continuo que se tendría por ejemplo, en una torre de madera de esas dimensiones.

Este tipo de torres también son muy comunes en la industria de los fertilizantes.

Otros factores de gran importancia, en la selección de los materiales de construcción de torres de enfriamiento son; las condiciones ambientales donde se localizará la torre, así como -- las características del agua circulante.

Como se ha mencionado con anterioridad, los componentes en una torre de enfriamiento pueden estar inundados, sujetos a -- salpiqueo o expreado de agua, expuestos al aire húmedo caliente, -- o bien, a la atmósfera que rodea a la torre.

Estas exposiciones, pueden ser más complicadas conforme se tenga un amplio rango de condiciones en el agua circulante y -- en la atmósfera. Si los materiales y los recubrimientos fueran se

leccionados para un servicio duradero, considerando todas las posibles condiciones de exposición, las torres, podrían resultar demasiado costosas para la mayoría de las instalaciones. Por consiguiente se deben seleccionar materiales y recubrimientos estandar para obtener un satisfactorie en varias exposiciones bajo condiciones normales.

La mayoría de los fabricantes denominan condiciones normales a las siguientes:

1. El agua circulante con un p^H entre 6 y 8, un contenido de cloro por debajo de 750 ppm., como NaCl, un contenido máximo de sólidos totales disueltos de 1500 ppm, una temperatura máxima de $130^{\circ}F$ ($54.4^{\circ}C$), una contaminación poco significativa de químicos extraños, o substancias externas y un adecuado tratamiento del agua para minimizar la corrosión como las incrustaciones.
2. El usar cloro, adicionándolo intermitentemente como un residuo libre de (1) una parte por millón o menor, manteniéndolo por cortos periodos.
3. La atmósfera que rodea la torre no es la más extrema.

Los requerimientos de inyección de aire (blow-down) y de reposición de agua (make-up), serán relativos a la práctica de la operación, pero las provisiones de estos deberán tomarse en cuenta en el diseño final.

Como el agua circula en toda la torre, una porción de ésta se evapora, desprendiendo calor a la atmósfera.

El agua remanente, tendrá entonces un alto porcentaje de sólidos disueltos. Con una inadecuada inyección de aire, el proceso puede continuar hasta el punto donde se empezarán a formar incrustaciones en el equipo de intercambio de calor y en la torre misma.

La práctica, limita a que el número de concentraciones, circuladas depende de la calidad del agua local e la contaminación debido a fugas en el equipo de intercambio de calor; como la torre de enfriamiento, resulta ser un eficiente depurador del aire, los sólidos contenidos en el aire, aparecen acumulándose en la circulación.

El programa de tratamiento químico del agua deberá deberá dejarse a un especialista competente.

CLASIFICACION DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO Y SUS MATERIALES DE CONSTRUCCION.-

Como resultado de un trabajo de investigación, donde se recopilaron datos de usuarios y fabricantes de torres de enfriamiento, se pudo llevar a cabo una clasificación general de estos equipos, comparando su capacidad de enfriamiento contra los materiales utilizados en su construcción, así tenemos lo siguiente:

Torres de flujo simple, con capacidades hasta $80M^3/hr.$, equivalentes a 120 toneladas de enfriamiento, las cuales constituyen

yen los modelos más pequeños y se construyen en los siguientes materiales:

Rellenos y eliminadores de rocío	Asbesto-Neopreno
Caja	Triplay tratado/sales Cu.
Persianas	Asbesto
Depósito de agua	Triplay tratado
Ventilador	Aluminio
Estructura	Acero galvanizado

Torres de doble flujo, con capacidades hasta 300M³/hr., 500 toneladas de enfriamiento) se construyen en:

Rellenos y eliminadores de rocío	PVC o Asbesto-N
Caja	Asbesto-cemento corrugado
Persianas	Asbesto-cemento
Depósito de agua	Acero, concreto o madera
Ventilador	Aluminio
Estructura	Madera Tratada

Torres de doble flujo, pero con capacidades de hasta 450M³/hr., (645 toneladas de enfriamiento), se considera a estas - torres como las de uso intermedio en la industria, se encuentran - construidas principalmente con rellenos y eliminadores de rocío y hasta persianas de madera roja tratada.

Torres de doble flujo, pero con capacidades de hasta 900M³/hr., (1320 toneladas de enfriamiento), principalmente se -

caracterizan porque el soporte del relleno es de alguna resina epóxica recubierta de fibra de vidrio, substituyendo así a la madera para este servicio, sin embargo el "relleno", es aún de madera en vigas.

Torres de flujo simple, con las mismas capacidades que la anterior. Aquí se ha encontrado que se caracterizan por contar con relleno PVC.

Torres de flujo simple y flujo doble, pero con capacidades desde 11300-27200M³/hr., (1800 - 43500 toneladas de enfriamiento). Este tipo de torres se encuentran más comúnmente en plantas de generación de energía. Los materiales más comúnmente encontrados son:

Relleno y eliminadores de rocío	GRP
Persianas	Concreto
Depósito de agua	Concreto
Ventilador	Aluminio
Estructura	Concreto

RELACION ENTRE MANTENIMIENTO Y MATERIALES DE CONSTRUCCION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

Generalmente, los fabricantes de torres de enfriamiento anexan las características del equipo en un manual de instrucciones sobre la instalación, operación y mantenimiento. Estas instrucciones dependen del tipo de equipo, así como de su tamaño, pero realmente son muy similares entre fabricantes.

Como cualquier equipo, las partes mecánicas de las torres deberán estar sometidas a un mantenimiento periódico, con el establecimiento de un programa de inspección y mantenimiento, (ver tabla 5.7).

Pero además de esto debe tomarse en cuenta, que la torre es un equipo que está en contacto directo con el agua y este punto debe tomarse en consideración principalmente en la selección de los materiales de construcción de la torre, ya que el agua por sus características propias, sus sales y gases disueltos es una substancia que provoca incrustación y corrosión en los materiales con los que tiene contacto. Por lo tanto, además de un mantenimiento mecánico adecuado, se debe tener un mantenimiento químico, es decir, un buen tratamiento químico al agua de recirculación de la torre.

Y es precisamente en este punto del tratamiento químico, donde fijaremos más nuestra atención, debido a que un tratamiento químico nulo o mal realizado, puede representar posteriormente serios problemas de operación y un mantenimiento, tanto preventivo, como correctivo demasiado costoso, llegando a representar en algunas ocasiones hasta el 25% del costo total del equipo.

En algunas investigaciones, observaciones y/o experiencias que se han tenido en campo sobre el mantenimiento de estos equipos, por el lado químico del agua, se ha encontrado que la formación de incrustaciones y corrosión son un problema común de menor a mayor grado sin embargo, es particular el problema dependien

TABLA 5.7

**PROGRAMA DE INSPECCION Y
MANTENIMIENTO**

Recomendaciones Generales

(Es recomendable mayor frecuencia de Inspección y Mantenimiento de las indicadas)

	VENTILADOR	MOTOR	FLECHA TRANSMISION	REDUCTOR	ELIMINADORES	RELLENO	RECIPIENTE AGUA FRIA	RECIPIENTE DE DISTRIBUCION	MIEMBROS ESTRUCTURALES	CUBIERTAS ASBESTO	VALVULA DE FLOTADOR	MALLAS DE SUCCION	BANDAS "V"	CHUMACERA
1.—Inspección de Atascamiento.								B				B		
2.—Checar Vibraciones y Ruidos Extraños.	D	D	D	D					A				D	D
3.—Inspección de Cuiñas y Cuiñeros.		SM	SM	SM										
4.—Checar que las Ventilas estén Abiertas.				M										
5.—Lubricación.		T												M
6.—Checar Tensión en las Bandas.													B	
7.—Checar Sellos de Aceite.				SM										
8.—Checar Nivel del Aceite.				B										
9.—Checar Sedimentos y Agua en el Aceite.				M										
10.—Cambio de Aceite.				BM										
11.—Checar Nivel del Agua.							D	D						
12.—Checar Fugas de Agua.								FM		SM				
13.—Inspección de las Condiciones Generales.			SM		A	A	A		SM	A	A		M	
14.—Checar Apriete de Tornillos.	SM	SM	SM	SM					SM	A	N			SM
15.—Limpieza.	N	SM	N	N	N	N	N	SM	N		N	B		N
16.—Pintura.	N	N	N	N						N				N

D-Diario; S-Semanal; M-Mensual; T-Trimestral; SM-Semestral; A-Anual; N-Cuando sea necesario + Unicamente si lleva Transmisión por bandas "V".

do de los materiales de construcción de la torre, sobre todo, de los internos de la misma.

Se puede abarcar desde un sistema abierto de circulación de agua, donde la calidad de ésta en sólidos disueltos varía desde 60ppm a 400ppm, se presentan problemas de incrustación aunque el agua sea usada una sola vez. Por lo tanto, en sistemas de recirculación donde el agua que ha enfriado el sistema regresa a la torre para ser enfriado nuevamente y regresar al sistema y hace que los sólidos en solución tiendan a concentrarse aumentando el nivel de saturación, así como los gases disueltos, presente en la torre problemas de incrustación y corrosión, así como de crecimiento orgánico de algas, bacterias, hongos, etc.

De aquí la importancia del mantenimiento químico a las torres de enfriamiento. Los objetivos de un tratamiento al agua de enfriamiento comprende la prevención de formación de incrustación, óxido, crecimiento orgánico en la superficie de enfriamiento, obstrucciones y corrosión de los materiales de construcción de las torres de enfriamiento.

Como parte de las observaciones realizadas en campo, se presentan a continuación los problemas típicos encontrados en los principales componentes de las torres de enfriamiento:

- a) Rellenos de madera. Presentan un ataque tanto químico como biológico, dando como consecuencia debilitamiento de su estructura.
- b) Persianas de asbesto-cemento. Presentan ataque químico prin

- cialmente, provocando fragilidad, tendiendo a desmoronarse o quebrarse bajo algún esfuerzo.
- c) Soportes del relleno de madera. Presentan tanto ataque químico como biológico, produciendo debilitamiento y dificultades para su limpieza o desmontaje del relleno.
 - d) Cuerpo de madera. Presenta ataque químico y bacteriano produciendo fragilidad y debilitamiento.
 - e) Relleno de PVC. Estos presentan un ataque químico en la estructura debido a su conformación, sin embargo este ataque es por periodos de tiempo mucho más largo que el de los rellenos de madera. El ataque biológico es de mucho menor grado por lo que su tratamiento por este efecto es aún menor.
 - f) Persianas de PVC o plástico reforzado. Presentan casi nulo deterioro comparadas con las de asbesto, dando un mayor tiempo de operación.
 - g) Cuerpo de lámina galvanizada. Presenta problemas de corrosión para un tratamiento químico malo a pesar de su tratamiento metálico.
 - h) Cuerpos de PVC o plástico reforzado. Presenta un buen comportamiento al ataque químico y biológico, aunque su limitante es su tamaño, ya que no es costeable fabricar torres de enfriamiento con cuerpo de plástico de grandes dimensiones.
 - i) Cuerpo de asbesto. Presenta problemas químicos ocasionados por sulfatos; únicamente las cubiertas del cuerpo son de ag

besto ya que su estructura es de madera en las torres denominadas de asbesto.

- j) Rellenos de cerámica. Por su conformación, estos pueden -- presentar problemas de inundación, cuando son alcanzadas -- las condiciones máximas de flujo. Casi no presentan problemas de carácter químico o biológico, aunque el material de cerámica se fragiliza con el tiempo volviéndose quebradizo.

ANALISIS DE COSTO EN RELACION AL MANTENIMIENTO QUIMICO Y LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION EN TORRES DE ENFRIAMIENTO.-

Los problemas que presentan las torres de enfriamiento en su operación y mantenimiento, como se dijo anteriormente, son comunes, sin embargo, debemos tomar varias consideraciones de acuerdo al tipo de materiales usados en su fabricación.

Las torres de enfriamiento por su diseño, ya sea de madera o plástico, tienen una eficiencia de aproximadamente 80%, en base al calculado. La evaporación de agua y por tanto la concentración de sólidos siempre existe, los fabricantes recomiendan sus equipos de acuerdo a condiciones estandar, pero el punto que puede hacer la diferencia y como lo veremos, es la calidad del agua y su influencia en los materiales de construcción.

El presente análisis parte de un caso que hemos seguido del mantenimiento de dos torres de enfriamiento de proceso, una -- con internos de PVC y la otra con internos de madera, ambas con --

un gasto de agua de recirculación de $300M^3$ /hr. y un rango de $15^{\circ}F$. los ciclos permisibles en ambas de 3.5, dureza total como $CaCO_3$ - de 115 ppm, la cantidad de agua de repuesto de 165 M^3 /día.

Con estas condiciones, en ambas torres se observó primero, en la de relleno de PVC, poco deterioro de ataque químico, crecimiento orgánico casi nulo, las condiciones de temperatura de salida variaron alrededor de 1%. Este equipo tiene operando casi 5-años, llevándose un tratamiento químico de agua.

En la torre de relleno de madera, se observó un ataque-químico severo, principalmente en el relleno, soportes y persianas, crecimiento orgánico en las tablillas de relleno, las variaciones de temperatura son considerables, teniéndose hasta un 30% , a pesar de que esta torre lleva un tratamiento mucho más estricto, sobre todo por el crecimiento orgánico, sin contar además, el deterioro del relleno que es ya considerable.

Los costos del tratamiento de agua de las dos torres, -tomándose en cuenta el volumen de recirculación y la calidad del agua de repuesto (ver memoria de cálculo en el anexo B,) son los siguientes:

De la torre con relleno de PVC, se consumen de químico tanto inhibidores de incrustación, corrosión y biocidas, la cantidad de 265 Kg. mensual con un costo total de \$ 1° 104333 pesos mensuales.

De la torre con relleno de madera su consumo de químicos tanto de inhibidores de incrustación, corrosión y biocidas -

es de 465 Kg. mensual con un costo global de \$ 1' 956076 pesos - mensuales.

Esta diferencia de costo y producto químico, se refleja en su mayor consumo principalmente de inhibidor de incrustación y de biocidas en la torre de relleno de madera y es que el ataque que sufre la madera tanto químico como biológico es muy fuerte; y aunque para algunos usuarios pudiera resultar que esta diferencia no es marcada, considerando el costo inicial de una torre de madera con respecto a una de plástico, es importante resaltar que la madera tiende a debilitarse mediante tratamientos continuos reduciendo así su tiempo de vida media.

ANEXO 'A'

Tabla (A-2). Propiedades termodinámicas del aire húmedo.

Temp t, °F	Humedad de saturación w _s , %	Presión de vapor p _v						Temperatura						Volumen específico				Temp t, °F
		psia		mm Hg		torr		°F		°C		°C		ft ³ /lbm		m ³ /kg		
		psia	mm Hg	torr	psia	mm Hg	torr	psia	mm Hg	torr	psia	mm Hg	torr	psia	mm Hg	torr	psia	
80	2.223	18.601	0.466	14.083	19.331	38.42	43.58	0.83454	0.07852	0.00038	40.10	0.0931	0.7323	80				
82	2.269	19.611	2.023	14.174	19.703	38.20	44.90	0.8343	0.11025	0.00039	50.00	0.0970	1.0107	82				
84	2.315	19.762	5.605	14.262	20.13	38.04	46.22	0.8341	0.14266	0.00040	60.00	0.1007	1.3122	84				
86	2.371	19.923	9.615	14.354	20.613	37.90	47.55	0.8339	0.17582	0.00041	70.00	0.1043	1.6379	86				
88	2.438	20.095	14.048	14.450	21.146	37.78	48.89	0.8337	0.20983	0.00042	80.00	0.1078	1.9951	88				
90	2.516	20.279	18.922	14.549	21.725	34.31	50.23	0.8335	0.24469	0.00043	100.00	0.1114	2.3790	90				
92	2.599	20.474	24.241	14.649	22.356	36.47	51.58	0.8332	0.27925	0.00044	110.00	0.1151	2.7833	92				
94	2.586	19.954	29.999	14.749	23.039	38.17	52.93	0.8330	0.31465	0.00045	120.00	0.1188	3.2099	94				
96	2.793	19.075	35.111	14.846	23.768	41.83	54.28	0.8328	0.35093	0.00046	130.00	0.1225	3.7125	96				
98	3.009	18.256	40.000	14.942	24.544	44.68	55.63	0.8326	0.38814	0.00047	140.00	0.1262	4.2899	98				
100	3.216	18.106	45.013	15.041	24.879	47.70	57.73	0.8324	0.42729	0.00048	150.00	0.1299	4.9333	100				
102	3.426	18.137	5.043	15.200	24.910	50.91	59.47	0.8321	0.46791	0.00049	160.00	0.1337	5.6428	102				
104	3.611	18.207	11.017	15.314	24.991	54.32	79.31	0.8319	0.51026	0.00050	170.00	0.1374	6.4196	104				
106	3.734	18.236	1.194	15.452	25.072	57.95	81.42	0.8317	0.55481	0.00051	180.00	0.1411	7.2617	106				
108	3.978	18.268	1.278	15.566	25.153	61.60	82.76	0.8315	0.60170	0.00052	190.00	0.1448	8.1693	108				
110	4.244	18.299	1.359	15.665	25.224	65.91	83.36	0.8313	0.65097	0.00053	200.00	0.1484	9.1436	110				
112	4.533	18.329	1.600	15.809	25.295	70.27	84.18	0.8311	0.70270	0.00054	210.00	0.1519	10.1857	112				
114	4.846	18.400	1.500	16.020	25.367	74.81	101.31	0.8309	0.75697	0.00055	220.00	0.1554	11.2951	114				
116	2.185	18.510	1.665	16.178	25.478	79.85	101.73	0.8307	0.81370	0.00056	230.00	0.1589	12.4701	116				
118	2.532	18.561	1.782	16.363	25.589	83.10	115.66	0.8305	0.87303	0.00057	240.00	0.1624	13.7119	118				
120	3.019	18.611	1.905	16.516	25.681	90.20	118.56	0.8303	0.93503	0.00058	250.00	0.1659	15.0204	120				
122	3.678	18.662	2.034	16.706	25.792	96.46	121.98	0.8301	1.00080	0.00059	260.00	0.1694	16.3969	122				
124	4.242	18.712	2.174	16.926	25.904	103.9	132.8	0.8300	1.07022	0.00060	270.00	0.1729	17.8403	124				
130	4.641	18.763	2.323	17.096	26.025	109.8	146.1	0.8298	1.14339	0.00061	280.00	0.1764	19.3516	130				
132	5.069	18.813	2.482	17.275	26.146	117.0	149.8	0.8297	1.22041	0.00062	290.00	0.1799	20.9267	132				
134	5.518	18.864	2.632	17.416	26.267	124.9	155.9	0.8295	1.30128	0.00063	300.00	0.1834	22.5679	134				
136	6.000	18.915	2.784	17.569	26.388	133.0	162.7	0.8294	1.38600	0.00064	310.00	0.1869	24.2764	136				
138	6.527	18.965	3.029	17.794	26.511	141.8	174.6	0.8292	1.47467	0.00065	320.00	0.1904	26.0549	138				
140	7.100	19.016	3.237	18.023	26.632	151.2	183.9	0.8291	1.56730	0.00066	330.00	0.1939	27.9046	140				
142	7.719	19.068	3.502	18.258	26.753	161.2	194.4	0.8289	1.66390	0.00067	340.00	0.1974	29.8276	142				
144	8.384	19.120	3.782	18.519	26.874	171.8	204.7	0.8288	1.76457	0.00068	350.00	0.2009	31.8269	144				
146	9.105	19.172	4.077	18.796	26.995	183.0	217.2	0.8286	1.86930	0.00069	360.00	0.2044	33.8944	146				
148	9.882	19.224	4.387	19.089	27.116	194.8	230.6	0.8285	1.97809	0.00070	370.00	0.2079	36.0331	148				
150	10.716	19.276	4.712	19.398	27.237	207.1	245.0	0.8283	2.09094	0.00071	380.00	0.2114	38.2469	150				
152	11.618	19.328	5.052	19.723	27.358	220.0	260.4	0.8282	2.20785	0.00072	390.00	0.2149	40.5389	152				
154	12.590	19.380	5.407	20.064	27.479	233.5	276.9	0.8280	2.32882	0.00073	400.00	0.2184	42.9121	154				
156	13.632	19.432	5.777	20.421	27.599	247.6	294.6	0.8279	2.45385	0.00074	410.00	0.2219	45.3696	156				
158	14.746	19.484	6.162	20.794	27.719	262.4	313.4	0.8277	2.58294	0.00075	420.00	0.2254	47.9054	158				
160	15.932	19.536	6.562	21.183	27.839	278.2	333.3	0.8276	2.71609	0.00076	430.00	0.2289	50.5226	160				
162	17.190	19.588	6.977	21.588	27.959	295.0	354.3	0.8274	2.85330	0.00077	440.00	0.2324	53.2241	162				
164	18.520	19.640	7.407	22.009	28.079	312.8	376.4	0.8273	2.99457	0.00078	450.00	0.2359	56.0139	164				
166	19.922	19.692	7.852	22.446	28.199	331.6	399.6	0.8271	3.14090	0.00079	460.00	0.2394	58.8861	166				
168	21.396	19.744	8.312	22.899	28.319	351.4	423.9	0.8270	3.29229	0.00080	470.00	0.2429	61.8436	168				
170	22.942	19.796	8.787	23.368	28.439	372.2	449.3	0.8268	3.44874	0.00081	480.00	0.2464	64.8804	170				
172	24.560	19.848	9.277	23.852	28.559	394.0	475.8	0.8267	3.61025	0.00082	490.00	0.2499	67.9904	172				
174	26.250	19.900	9.781	24.351	28.679	416.8	503.4	0.8265	3.77682	0.00083	500.00	0.2534	71.1676	174				
176	28.012	19.952	10.299	24.865	28.799	440.6	532.2	0.8264	3.94845	0.00084	510.00	0.2569	74.4159	176				
178	30.846	19.076	13.266	25.393	28.919	465.4	561.2	0.8262	4.12514	0.00085	520.00	0.2604	77.7384	178				
180	33.862	19.128	16.370	25.936	29.039	491.2	591.4	0.8261	4.30687	0.00086	530.00	0.2639	81.1381	180				
182	37.060	19.180	19.611	26.494	29.159	518.0	622.8	0.8259	4.49364	0.00087	540.00	0.2674	84.6181	182				
184	40.440	19.232	23.089	27.067	29.279	545.8	655.4	0.8258	4.68545	0.00088	550.00	0.2709	88.1724	184				
186	44.002	19.284	26.814	27.654	29.399	574.6	689.2	0.8256	4.88230	0.00089	560.00	0.2744	91.8051	186				
188	47.746	19.336	30.795	28.256	29.519	604.4	724.2	0.8255	5.08419	0.00090	570.00	0.2779	95.5104	188				
190	51.672	19.388	35.042	28.873	29.639	635.2	760.4	0.8253	5.29112	0.00091	580.00	0.2814	99.2821	190				
192	55.780	19.440	39.565	29.506	29.759	667.0	797.8	0.8252	5.50409	0.00092	590.00	0.2849	103.1244	192				
194	60.070	19.492	44.374	30.154	29.879	700.0	836.4	0.8250	5.72310	0.00093	600.00	0.2884	107.0314	194				
196	64.542	19.544	49.477	30.817	29.999	734.6	876.2	0.8249	5.94815	0.00094	610.00	0.2919	111.0071	196				
198	69.196	19.596	54.884	31.496	30.119	770.6	917.2	0.8247	6.17924	0.00095	620.00	0.2954	115.0554	198				
200	74.032	19.648	60.605	32.191	30.239	808.0	959.4	0.8246	6.41637	0.00096	630.00	0.2989	119.2704	200				

La entalpía del aire seco se toma como cero a 0 °F.

La entalpía del agua líquida se toma como cero a 32 °F.

ANEXO 'B'

B. MEMORIA DE CALCULO.--

ANALISIS DE COSTO EN RELACION AL MANTENIMIENTO QUIMICO
Y LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.--

C A R A C T E R I S T I C A S

AGUA DE REPUESTO	T.PVC	T. MADERA	PARAMETROS
Dureza total 115ppm	190	415	0-10
Alcanilidad parcial 10	95	250	-
Alcanilidad t. 40	240	340	200
Cloruros	95	260	-
Sflice	50	140	150
p ^H	7	9.5	11.0
			6.5 - 7.5

D A T O S

Volumen del sistema:	45M ³ .
Volumen de recirculación:	300M ³ /hr. (7200M ³ /dfa)
Rango:	15° F.
Sflice en agua de repuestos:	50 ppm.
Ciclos de concentración permitidos:	3.5

C A L C U L O S

Porcentaje de evaporación	1.5%
---------------------------	------

Porcentaje de purga: 1.5/3.5 - 1 0.6%
 Porcentaje de repuesto: Evaporación más purga más arrastre:
 Porcentaje de repuesto: 1.5 0.6 0.2 2.3%
 Repuesto: % de repuesto vol. de recirculación
 Repuesto: 2.3 7200 / 100 165.6 M³.
 Cantidad de sales a remover: 19000 gramos/día.

Torre de PVC.

Dosificación: 100/3.5 165.6 4.7 Kg/día (141 Kg./mes).
 Inhibidor de corrosión 75 Kg./mes.
 Biocidas: 45 Kg./ mes.

C O N C L U S I O N

QUIMICOS	CANTIDAD MES	COSTO
Inhibidor de incrustación	141 Kg.	632808
Inhibidor de corrosión	75 Kg.	292875
Biocidas	45 Kg.	178650
TOTAL	<hr/> 265 Kg.	<hr/> \$1'104333.00 M.N.

Torre de Madera.

C O N C L U S I O N

QUIMICOS	CANTIDAD/MES	COSTO
Inhibidor de incrustación	225 Kg.	1'009,800
Inhibidor de corrosión	75 Kg.	292875
Biocidas	165 Kg.	653400
TOTAL	<hr/> 465 Kg.	<hr/> \$ 1'956,075.00 M.N.

CONCLUSIONES

Debido a que la escasez de agua, está siendo cada vez más crítico, es imprescindible optimizar los equipos cuya operación está relacionada con el uso de grandes cantidades de ésta.

Tal es el caso de las torres de enfriamiento, las cuáles representan un importante equipo de recirculación de este líquido.

Una parte muy importante para la optimización de estos equipos es la de los materiales de construcción, es decir, buscar nuevas alternativas para dar mayor duración y abatir costos de mantenimiento, sea este mecánico o químico.

Se ha observado que muchas industrias mexicanas, prefieren tirar el agua que darle mantenimiento químico a sus torres de enfriamiento, por el costo que esto representa, sin saber que ellas son los responsables del problema, por no darle la importancia debida a este equipo y al de servicios auxiliares en general.

Los objetivos principales de este trabajo se han cumplido, ya que se muestra una comparación técnica de los materiales existentes, destacando las ventajas de los plásticos, pues éstos-

con un mantenimiento químico apropiado, abaten los costos totales de una torre de enfriamiento.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) H.C. Van Ness, et. al., INTRODUCCION A LA TERMODINAMICA EN INGENIERIA QUIMICA, Editorial Mc. Graw-Hill, México 1981, p.p. 181 - 381.
- (2) Foust, et. al., PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS, Editorial Interamericana, México 1981,
- (3) David M. Himmelblau, PRINCIPIOS Y CALCULOS BASICOS DE LA - INGENIERIA QUIMICA, Editorial CECSA., México 1980, p.428
- (4) R. Myron Bird, et. al., FENOMENOS DE TRANSPORTE, Editorial Reverte, España 1980, p.p. 21 - 15.
- (5) Robert H. Perry, et. al., MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO, Editorial Mc Graw Hill, México 1982, p.p. 123 y 124.
- (6) Donald Q. Kern, PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Editorial CECSA. México 1982.

- (7) Marley de México, S.A. de C.V., MANUAL DE OPERACION Y MANTENIMIENTO, México 1980.
- (8) Joe Ben Dickey, Jr. EVAPORATIVE COOLING TOWERS FOR CHEMICAL AND GENERAL INDUSTRIES, The Marley Cooling Tower Company.
- (9) P. Parrilla C. , RESINAS POLIESTER, PLASTICOS REFORZADOS. FABRICACION, MOLDEO Y FORMULACIONES, Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. México 1986.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BEN DICKEY JOE Jr. "Evaporative Cooling Towers for Chemical and General Industries", The Marley Cooling Tower Company.

BYRON BIRD R. et. al., "Fenómenos de Transporte", Editorial - Reverte, España 1980.

FOUST et. al., "Principios de operaciones unitarias", Editorial Interamericana, México 1981.

HIMMELBLAU DAVID M., "Principios y cálculos básicos de la Ingeniería Química", Editorial CECSA., México 1980.

KERN DONALD Q. "Procesos de Transferencia de calor", Editorial CECSA., México 1982.

PARRILLA F., "Resinas poliéster, plásticos reforzados. Fabricación, moldeo y formulaciones, Asociación Nacional de Industrias del Plástico. A.C. México 1986.

PERRY ROBERT H., et. al., "Manual del Ingeniero Químico", Editorial Mc. Graw Hill, México 1982.

VAN NESS H.C., et. al., "Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. Editorial Mc. Graw Hill, México - 1981.

DOCUMENTOS:

MARLEY de México, S.A. de C.V., Manual de operación y mantenimiento., México 1980.