

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Quimica

INFLUENCIA DEL CLIMA Y LA ALTITUD SOBRE
LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

114

INGENIERIA QUIMICA
CARLOS ALBERTO DAVILA CASTRO
ENRIQUE GUIRAO NOTARIO
NEFTALI COBOS CUERVO

MEXICO, D. F.

1976



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CLAS TOSIJ
AÑO 1976
FECHA _____
PROC MT 21 101



QUIMICA

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

Presidente	RUDI-PRIMO STIVALET CORRAL
Vocal	ALEJANDRO ANAYA DURAND
Secretario	ROBERTO ANDRADE CRUZ
1er. Suplente	MARIO RAMIREZ Y OTERO
2do. Suplente	ALFONSO FRANYUTI ALTAMIRANO

Sitio donde se desarrolló el tema: MEXICO, D. F.

Nombre completo y firma del Sustentante:

DAVILA CASTRO CARLOS ALBERTO _____

Nombre completo y firma del Asesor del tema:

RUDI-PRIMO STIVALET CORRAL _____

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

Presidente	RUDI-PRIMO STIVALET CORRAL
Vocal	ALEJANDRO ANAYA DURAND
Secretario	ROBERTO ANDRADE CRUZ
1er. Suplente	MARIO RAMIREZ Y OTERO
2do. Suplente	ALFONSO FRANYUTI ALTAMIRANO

Sitio donde se desarrolló el tema: MEXICO, D. F.

Nombre completo y firma del sustentante:

GUIRAO NOTARIO ENRIQUE _____

Nombre completo y firma del asesor del tema:

RUDI-PRIMO STIVALET CORRAL _____

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

Presidente	RUDI-PRIMO STIVALET CORRAL
Vocal	ALEJANDRO ANAYA DURAND
Secretario	ROBERTO ANDRADE CRUZ
1er. Suplente	MARIO RAMIREZ Y OTERO
2do. Suplente	ALFONSO FRANYUTI ALTAMIRANO

Sitio donde se desarrollo el tema: MEXICO, D. F.

Nombre completo y firma del sustentante:

COBOS CUERVO NEFTALI _____

Nombre completo y firma del asesor del tema:

RUDI-PRIMO STIVALET CORRAL _____

A nuestros padres
Con gratitud y cariño

Con afecto a nuestros familiares
y hermanos

A nuestros amigos,
compañeros y maestros

A nuestro maestro y amigo
Ing. Rudi-Primo Stivalet C.
Por su valiosa colaboración

Y a todas aquellas personas que hicieron
posible la realización de este trabajo

A nuestra querida escuela
la Facultad de Química.

I N D I C E

- I) PROLOGO
 - I.1) Introducción

- II) GENERALIDADES
 - II.1) Clasificación de torres de enfriamiento
 - II.2) Partes de una torre de enfriamiento

- III) DESARROLLO DE LOS FUNDAMENTOS TEORICOS EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

- IV) INFLUENCIA DEL CLIMA Y LA ALTITUD SOBRE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO
 - IV.1) Efectos de la precipitación fluvial, arrastre y vientos
 - IV.2) Recirculación.

- V) TRATAMIENTO DE AGUA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO
 - V.1) Agua de enfriamiento
 - V.2) Control de Ensuciamiento
 - V.3) Naturaleza de la Corrosión, Incrustación y Ensuciamiento
 - V.4) Análisis de la Eficiencia de un sistema de Enfriamiento
 - V.5) Ahorros Potenciales.
 - V.6) Factores que influyen en el enfriamiento del agua.
 - V.7) Factores que afectan la Corrosión, Incrustación y Ensuciamiento
 - V.8) Control de Corrosión, Incrustación y ensuciamiento en un sistema de Enfriamiento.

- VI) CALCULOS Y ASPECTOS SOBRE INGENIERIA
 - VI.1) Métodos de Cálculo

VI.2) Selección de una torre de enfriamiento.

VI.3) Rediseños de las torres Analizadas.

VI.4) Cálculos de las Eficiencias.

VI.5) Diseño Estructural.

VI.6) Operación y Mantenimiento.

VII) ASPECTOS ECONOMICOS

VIII) DISCUSION DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

GLOSARIO

BIBLIOGRAFIA

I) P R O L O G O

El objetivo principal de esta t esis es tener una visión general del comportamiento actual de las Torres de Enfriamiento en México, teniendo en cuenta la influencia de las diferentes altitudes donde se encuentran instaladas, así como también de las diferentes condiciones climatológicas en que operan.

Este estudio se hizo en base a la información obtenida en:

- a) Refinería de Cd. Madero (Tamaulipas)
- b) Complejo Petroquímico de Cosoleacaque (Veracruz)
- c) Refinería 18 de Marzo (Distrito Federal)

Determinándose que tipo de torre y de acuerdo con su localización - opera más adecuadamente en base al servicio requerido.

Se hizo además un estudio general de los diferentes tipos de Torres de Enfriamiento, y se analizaron diferentes métodos de diseño para determinar la eficiencia de los mismos.

I.1) INTRODUCCION

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 tanto la operación de enfriamiento de agua representa un caso de transferencia simultánea de materia y de calor, consistiendo la primera en el paso del agua evaporada desde la superficie líquida al seno del aire. Como en todos los procesos de transferencia de materia y de transmisión de calor por contacto directo, una de las consideraciones primarias al diseñar la instalación es la creación de una gran área interfacial. Evidentemente una torre empacada constituye una solución para conseguir este propósito.

El enfriamiento de agua es una operación en que la mayor resistencia a la transferencia corresponde a la fase gaseosa. Por consiguiente, para una transferencia eficiente se requiere una elevada velocidad del aire.

Por tanto, la pérdida de presión se hace crítica, y los empaques se diseñan principalmente desde este punto de vista.

En los equipos de refrigeración tales como el condensador refrigerante el calor es disipado usando aire ó agua como medio de enfriamiento; ambos son relativamente baratos.

Las características físicas de estos medios son tales que la transferencia de calor entre dos gases a través de las paredes de un tubo separador es más difícil y requiere mayor superficie de transferencia de calor que entre un líquido y un gas. Debido a que una gran área de transferencia de calor implicaría un costo mayor.

En consecuencia es necesario el empleo de equipos tales como las Torres de Enfriamiento ya que además de las ventajas antes mencionadas ofrece mejores perspectivas desde los puntos de vista arquitectónico y estético.

Definición de Torre de Enfriamiento.

Una torre de enfriamiento es un dispositivo cerrado, diseñado para el enfriamiento por evaporación de agua por contacto con aire.

II) GENERALIDADES

II.1) Clasificación de Torres de Enfriamiento.

Las torres de enfriamiento pueden clasificarse de la siguiente forma:

- I) Tiro Natural
- II) Tiro Mecánico

Debido a que las torres de tiro natural no utilizan equipo mecánico para su operación ya que solo dependen de las condiciones atmosféricas, mientras que las torres de tiro mecánico si las utilizan.

A su vez las torres de tiro natural y las torres de tiro mecánico- podemos clasificarlas de la siguiente manera:

- I) Tiro Natural
 - a) Torres Atmosféricas
 - a 1) Sin relleno Dispensor

a 2) Con Relleno Dispensor

b) Torres de Chimenea ó Hiperbólicas

II) Tiro Mecánico.

a) Tiro Forzado

b) Tiro Inducido

b 1) Flujo a contra corriente ó contraflujo.

b 2) Flujo Cruzado.

I) Torres de Tiro Natural.

Las torres de enfriamiento de tiro natural modernas consisten de - una chimenea de concreto de armazón delgada y de forma hiperbólica.

En estas torres el flujo de aire es inducido por una chimenea de - grandes dimensiones (por ejemplo: 104 mts. de alto por 83 mts. de diámetro) colocada arriba del empaque de la torre que comunmente es de madera de secoya a la cual se le ha hecho un tratamiento previo con el objeto de hacerla más - durable.

En algunos casos la madera de construcción se cimenta sobre un sis - tema de soportes de concreto precolado y en algunas áreas asbesto cemento, - el empaque de plástico se ha usado experimentalmente con buenos resultados.

La operación de estas torres depende de las condiciones del agua -

que determinan la cantidad de aire movido a través de la torre a causa de la diferencia de densidades del aire de entrada y de el aire de salida.

En términos generales las torres de enfriamiento de tiro natural - dependen de la temperatura de bulbo húmedo y de la humedad relativa ya que es - tos factores determinan su nivel de funcionamiento. Debido a esto es necesari - o analizar las condiciones del agua en relación a la carga de la torre en - forma más rigurosa para determinar el punto de diseño óptimo.

a) Torres Atmosféricas.

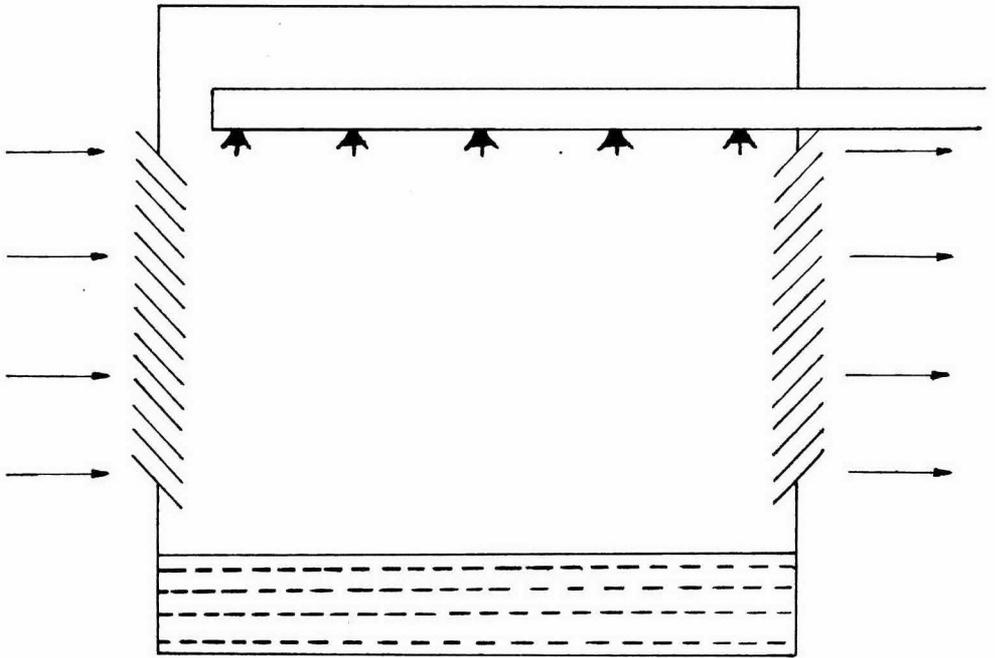
Se identifican porque el movimiento de aire a través de la torre - depende solo de las condiciones atmosféricas.

En estas torres el flujo de aire es cruzado con respecto al flujo - de agua, ya que esta última cae verticalmente por gravedad, mientras que el - flujo de aire es producido por vientos que corren horizontalmente.

Como se vió anteriormente estas a su vez pueden clasificarse en:

a1) Sin Empaque Dispensor.

Para aumentar la superficie de contacto entre el agua y el aire en - estos equipos, se logra únicamente a base de toberas colocadas en la parte su - perior de la torre. Hay que hacer notar que en este caso la palabra torre no - es adecuada debido a que no contiene empaque, solo como se mencionó anterior - mente numerosas boquillas espreadoras colocadas en la parte superior de la es -



TORRE SIN EMPAQUE DISPERSOR

estructura y un alto cercado de persianas.

a2) Con empaque Dispensor.

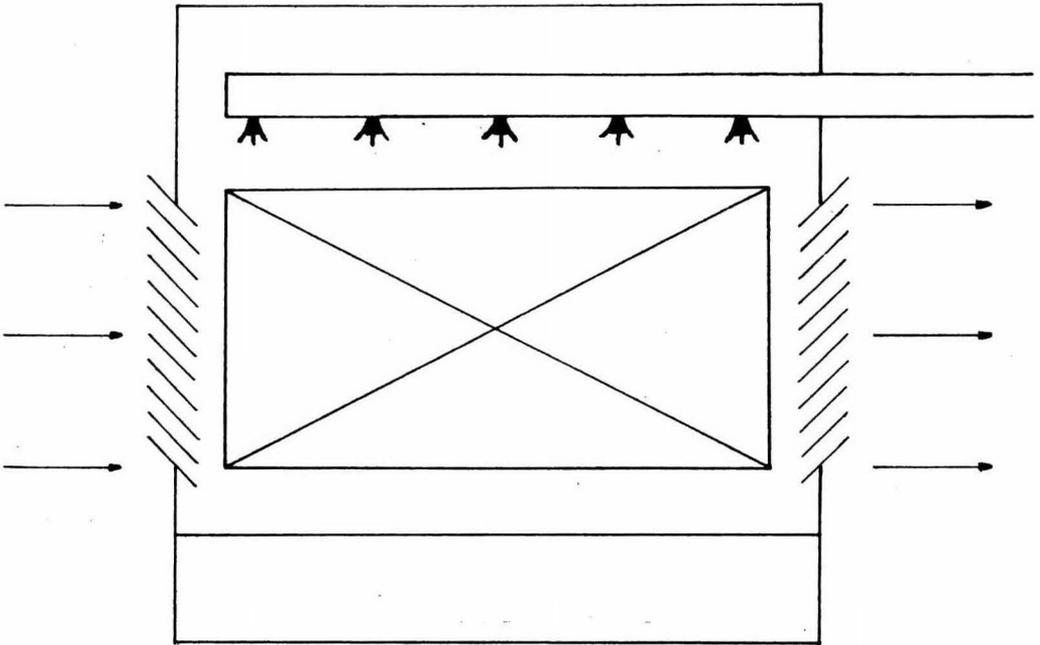
Estas se caracterizan porque contienen en su interior deflectores de madera ó plástico que dispersan el agua al ir cayendo de piso a piso para aumentar el área de contacto aire-agua así como también el tiempo de contacto. Por estas razones la operación de estas torres es más eficiente que las anteriores.

Las ventajas comunes a ambos equipos son:

- 1) Carecen de partes mecánicas.
- 2) Bajos costos de mantenimiento.
- 3) No están sujetas a la recirculación del aire empleado.
- 4) Tienen una vida promedio bastante larga.
- 5) El promedio de temperatura del agua fría puede ser tan bajo como el obtenido en torres de tiro mecánico diseñadas para las mismas condiciones de servicio.

Las desventajas comunes a ambos equipos son:

- 1) Estos equipos tienen una gran longitud como resultado de lo estrecho de su construcción.
- 2) Alto costo inicial (casí el mismo que para una torre de tiro mecánico).



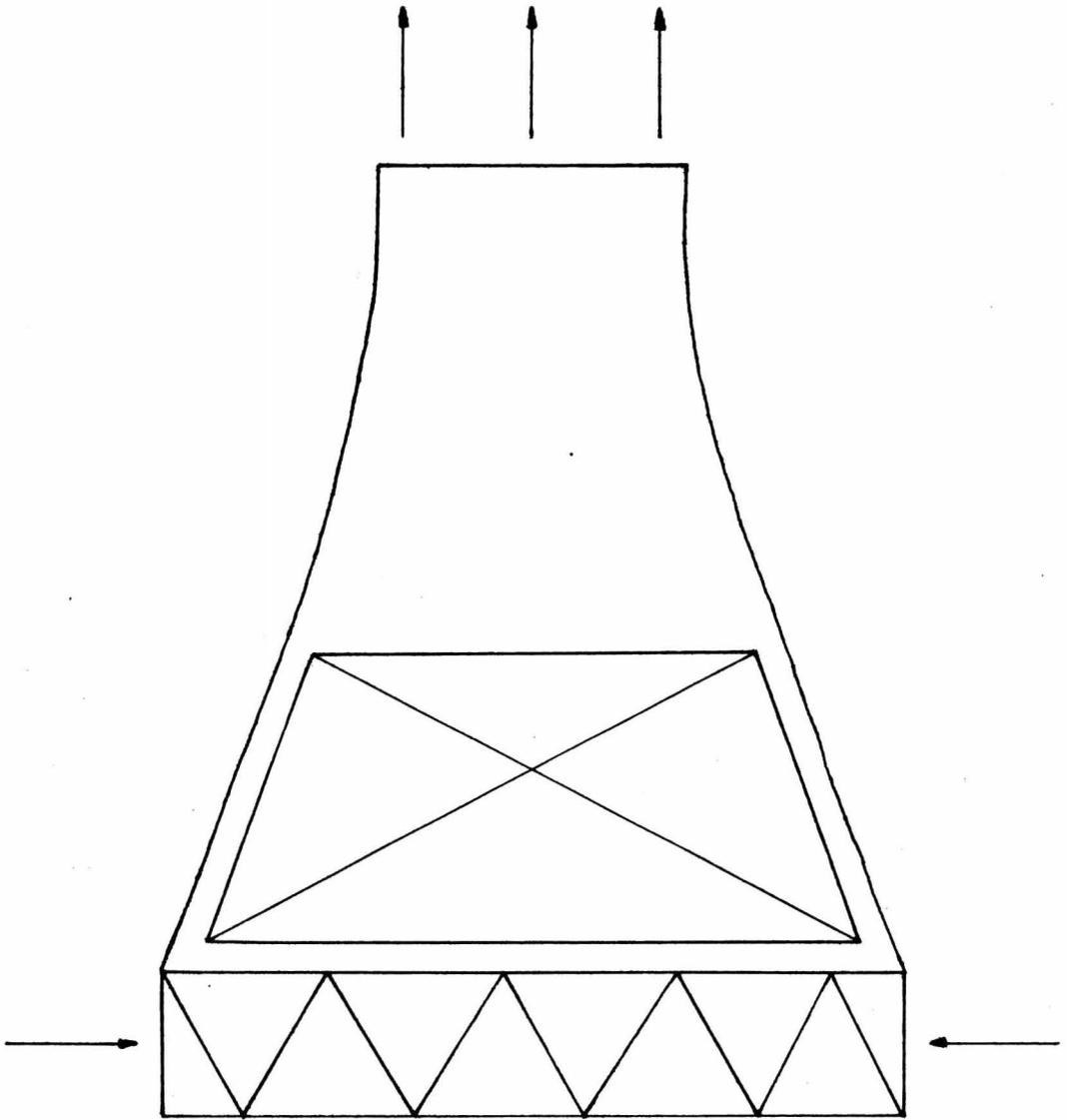
TORRE CON EMPAQUE DE MADERA

- 3) Requiere de un alto potencial hidráulico de bombeo para atomizar el agua a través de las espreas.
 - 4) Las torres deben localizarse en áreas no obstruídas.
 - 5) La temperatura del agua fría fluctúa debido a cambios en la dirección y la velocidad del viento.
 - 6) Debe ser localizada normal a la dirección del viento prevaleciente.
 - 7) El flujo de aire puede ser regulado para reducir las pérdidas por rocío, solamente incrementando las dimensiones de la torre.
 - 8) Las torres deben estar bien cimentadas para prevenir el levantamiento ó volcadura durante fuertes vientos.
- b) Torres de Chimenea o Hiperbólica (de Tiro Natural).

Es una torre a través de la cual el aire es inducido por el gran cañón de la chimenea encima del empaque. El tiro a través de la torre resulta de complicados efectos relacionados entre sí; como son: la diferencia de presión del aire atmosférico debido a la altura de la chimenea; el tiro inducido debido a la velocidad diferencial del viento; las diferencias de temperatura del aire calentado por el agua y un incremento en la velocidad debido a la vaporización. Por lo tanto al variar alguno de estos factores se dificulta el diseño de las torres de chimenea.

Las principales ventajas de estos equipos son:

- 1) Producen un enfriamiento similar al obtenido con torres de ti-



TORRE HIPERBOLICA DE TIRO NATURAL

ro mecánico sin tener partes en movimiento y sin tener el gasto de energía causado por los ventiladores.

- 2) Los costos de mantenimiento son muy bajos.
- 3) Operación prácticamente libre de fallas.
- 4) Comparadas con las torres de ventilación natural, tienen la ventaja de una operación independiente de la dirección del viento.
- 5) Pueden soportar grandes cargas de agua.
- 6) Usan comparados con otras, pequeñas áreas de tierra.
- 7) El aire fluye en dirección opuesta al agua, lo que garantiza una buena eficiencia.

Las principales desventajas son:

- 1) La resistencia al flujo de aire debe ser considerada a un mínimo, por lo que el empaque debe diseñarse muy cuidadosamente.
- 2) La gran altura requerida por la chimenea para mantener el flujo necesario.
- 3) El costo inicial es bastante superior al de las torres de tiro mecánico.
- 4) Es difícil obtener un control exacto de la temperatura del agua fría.

II) Torres de Tiro Mecánico.

La instalación más común es una torre de enfriamiento de tiro indu

cido de forma rectangular que utiliza equipo mecánico para mover el aire a través de la torre; esto dá el control absoluto de diseño sobre el aire suministrado. El flujo y la velocidad apropiada del aire pueden ser seleccionados sin restricciones, por lo tanto no hay factores limitantes de flujo de aire en la torre; de dirección del viento ó de velocidad.

El empaque en este tipo de torres es de madera ó de asbesto cemento soportado sobre una armazón de madera ó de concreto precolado.

Sus ventajas principales son:

- 1) Buen control de la temperatura del agua fría.
- 2) Requiere una pequeña área de terreno para su instalación.
- 3) Generalmente requieren de una carga de bombeo bastante baja.
- 4) No tiene restricciones la ubicación de la torre.
- 5) Admiten más empaque por unidad de volumen.
- 6) Es posible lograr un pequeño acercamiento y un gran rango de enfriamiento.
- 7) El costo inicial es inferior al de las torres de tiro natural.

Las desventajas son:

- 1) El costo de operación es elevado debido a la energía requerida para hacer funcionar los ventiladores.
- 2) Están sujetas a fallas mecánicas.
- 3) Debido a su poca altura y a la succión creada por los ventila-

dores, están sujetas a la recirculación del aire húmedo descargado por la torre.

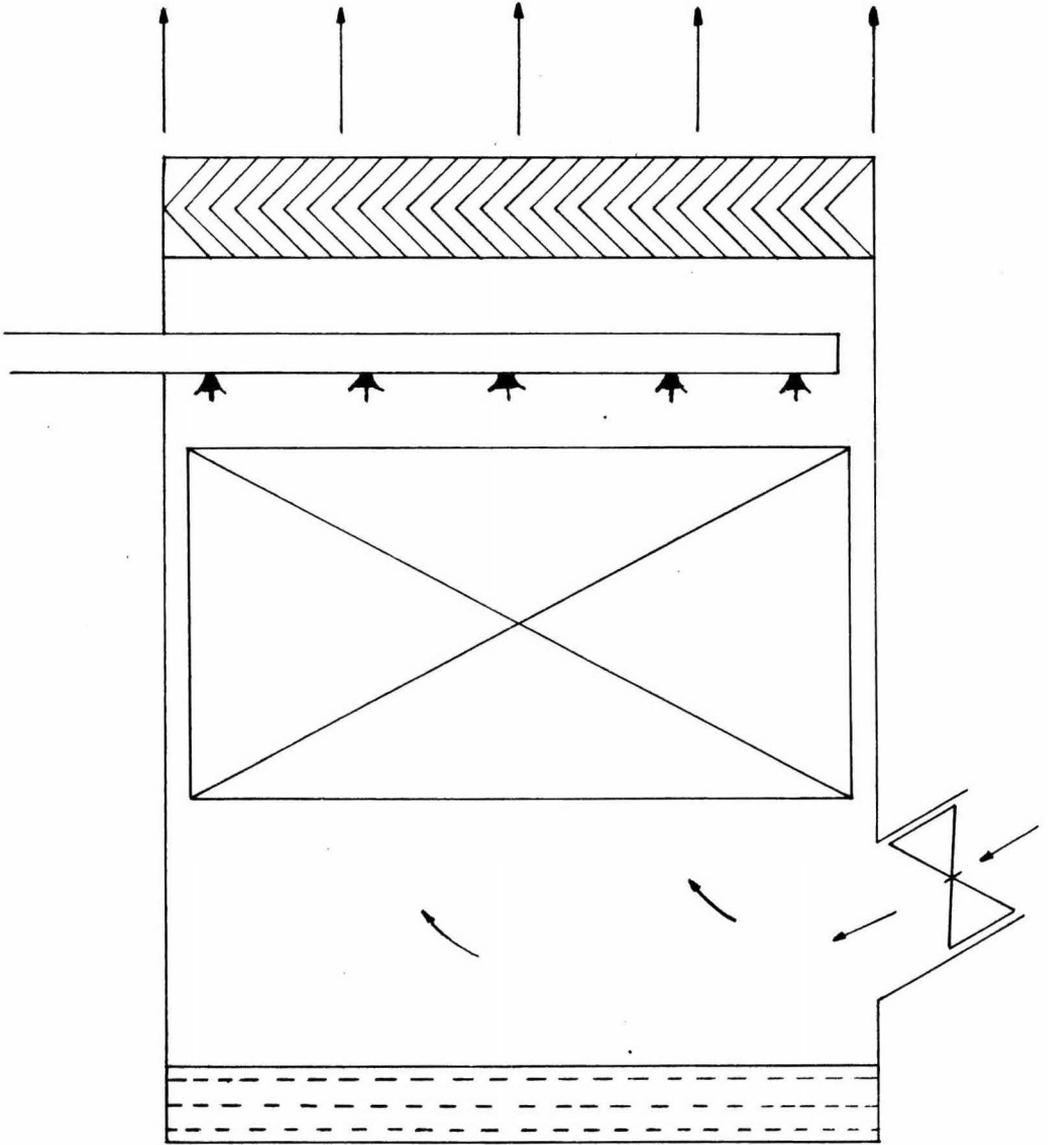
- 4) Los costos de mantenimiento son altos.
- 5) El funcionamiento variará con la intensidad del viento; a diferencia con las torres atmosféricas, el funcionamiento decrece con el incremento de la intensidad del viento hasta que se alcanza la velocidad crítica, después de la cual el funcionamiento mejora debido a la disminución de la recirculación.
- 6) Hay pérdida de la carga de calor y las condiciones climatológicas pueden ser muy perjudiciales para el uso económico de las torres de tiro mecánico.

a) Torres de Tiro Forzado.

Estas torres se caracterizan por tener uno ó varios ventiladores localizados en la entrada del aire, que lo impulsan a través de la misma.

En este tipo de torres las principales ventajas son:

- 1) La vibración en la torre es mínima, debido a que el equipo mecánico se encuentra cercano al piso y está por lo tanto bien cimentado.
- 2) La operación de los ventiladores es ligeramente más eficiente que en el caso de los ventiladores de tiro inducido, ya que algo de la presión dinámica es convertida a presión estática, y es recobrada en forma de trabajo útil.



TORRE DE TIRO FORZADO

- 3) Los ventiladores manejan aire seco, por lo que la erosión de las aspas es mínima y no se tienen problemas de condensación de humedad en la caja del reductor de velocidad.

Algunas de las principales desventajas son:

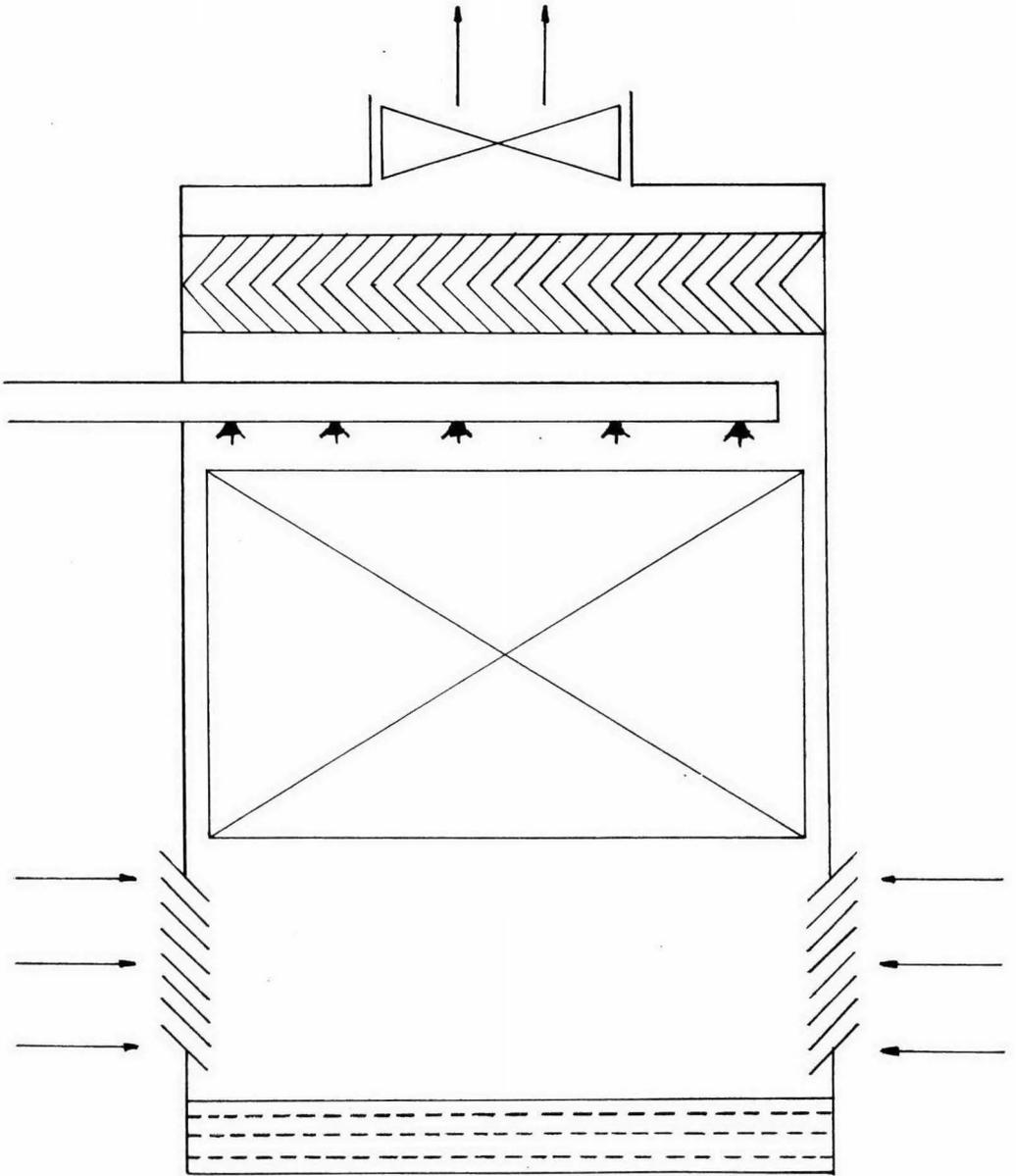
- 1) El aire caliente y húmedo que sale por la parte superior de la torre, tiene tendencia a recircular y en caso de vientos desfavorables, puede llegarse a tener una reducción de capacidad -- que en algunos casos que se han comprobado puede llegar hasta un veinte por ciento.
- 2) Hay tendencia a la formación de escarcha a la salida del ventilador durante la operación en invierno.
- 3) El diseño de las torres limita el diámetro del ventilador a un máximo de 4 metros por lo que cuando la carga térmica es grande, se requiere un número considerable de motores, ventiladores y arrancadores.

b) Torres de Tiro Inducido.

Este tipo de torres tienen los ventiladores colocados en la parte superior de la torre, es decir a la salida del aire.

b1) Torres de Tiro Inducido a Contraflujo.

En este tipo de torres, el movimiento del aire a través de ella es



TORRE DE TIRO INDUCIDO A CONTRA FLUJO

en forma vertical.

Estos equipos tienen la ventaja de que el agua más fría es la que está en contacto con el aire más seco mientras que el agua caliente está en contacto con el aire más húmedo; por lo que se garantiza una alta eficiencia en el proceso de enfriamiento.

A su vez estas torres presentan las siguientes desventajas:

- 1) El aire viaja en sentido contrario a las gotas de agua, por lo que las pérdidas de presión son mayores y se tendrá la necesidad de consumir más potencia en los ventiladores que en el caso de torres de flujo cruzado.
- 2) Hay una distribución irregular del flujo de aire a través de la zona empacada, teniéndose poco movimiento cerca de las paredes de la torre.
- 3) Se requiere una mayor potencia de bombeo, debido a que las torres de este tipo son bastante altas.
- 4) El sistema de distribución del agua colocado abajo de los eliminadores hace que el mantenimiento sea difícil.
- 5) Están sujetas a absorber la basura y los desperdicios que haya en la planta.

b2) Torres de Tiro Inducido a Flujo Cruzado.

En estas torres de enfriamiento el flujo de aire viaja en forma ho

horizontal y el agua cae verticalmente.

Las ventajas que ofrecen estas torres son:

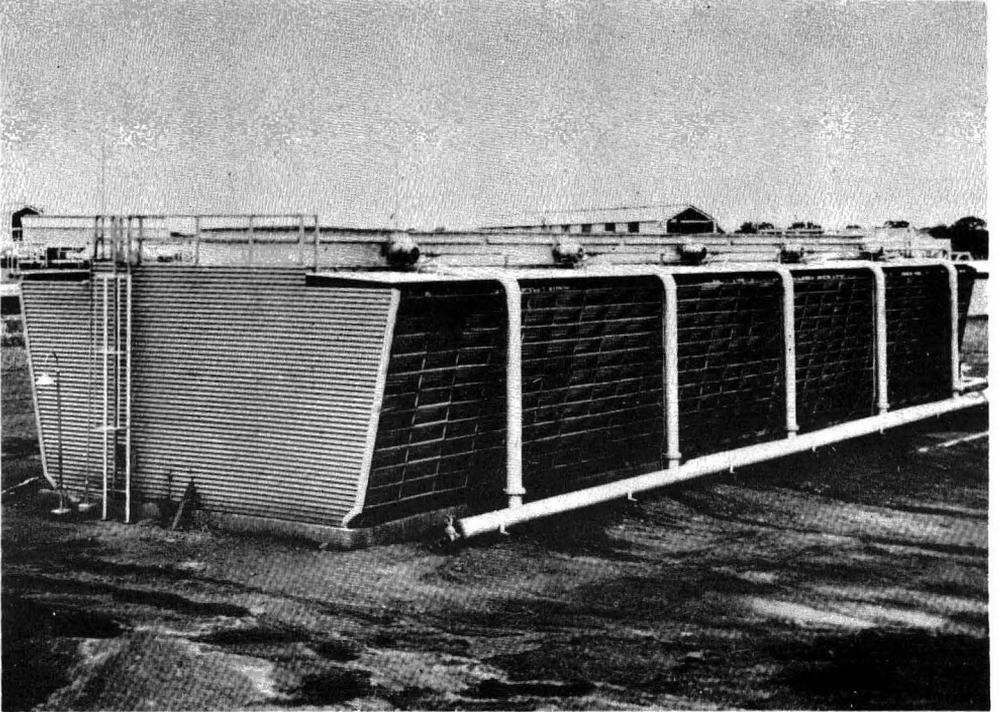
- 1) Baja cabeza de bombeo.
- 2) Baja pérdida de presión por el lado del aire.
- 3) Permite un arreglo adecuado del sistema de distribución.
- 4) Es posible limpiar el sistema de distribución cuando la torre está en operación.
- 5) La altura del empaque es aproximadamente igual a la altura de la torre.
- 6) Mayor superficie de enfriamiento por metro cúbico de volumen de torre.
- 7) Se pueden usar ventiladores de diámetro grande, por lo que se requieren menos celdas para una determinada carga.
- 8) Altas cargas de agua son posibles para una altura dada.
- 9) La temperatura del agua en el estanque varía de el centro a las orillas del mismo.

Las desventajas más comunes que ofrece este tipo de torre son:

- 1) La baja presión en el sistema de distribución hace posible que los orificios se tapen continuamente con algas ó basuras acarreados por el viento, por lo que requieren un frecuente mantenimiento.
- 2) Una superficie muy grande está expuesta al aire y al sol, por-

lo que se favorece el crecimiento de algas.

- 3) La eficiencia del enfriamiento es menor que en el caso de las torres a contraflujo por lo que en ciertos casos, sobre todo - cuando se requiere un acercamiento muy pequeño, las torres a - contraflujo pueden requerir más superficie y consumir más potencia de ventilación que las de flujo cruzado.



TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO CRUZADO

II. 2) Partes de una Torre de Enfriamiento.

Las partes que mencionaremos a continuación se refieren a una torre de tiro mecánico, aún cuando muchas de ellas se aplican también a torres de tiro natural.

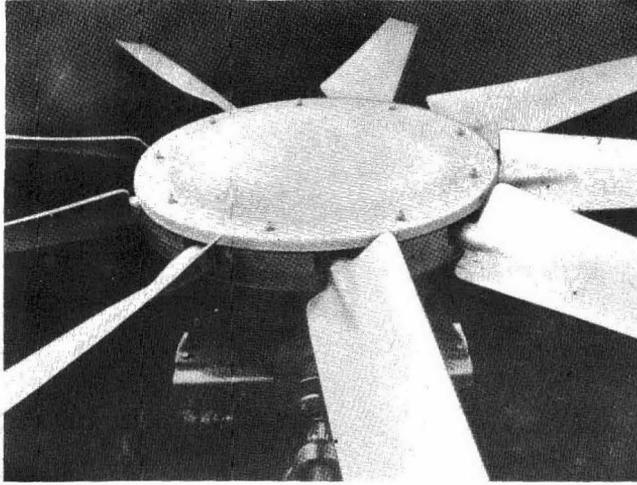
- a) Ventiladores.
- b) Eliminadores de rocío.
- c) Sistema de distribución
- d) Empaque.
- e) Persianas de entrada.
- f) Tanque de almacenamiento de agua.

El objetivo de cada una de estas partes se menciona a continuación así como diversos esquemas y fotografías que nos proporcionan una visión más amplia de estos equipos.

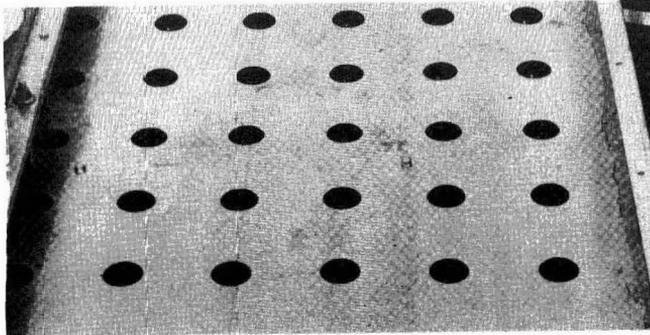
- a) Ventiladores.

El objetivo de estos es mover volúmenes considerables de aire a velocidades relativamente bajas (600 m/seg. ó menos) y con una caída de presión mínima (del orden de 10 mm de H₂O). En general se utilizan ventiladores del tipo de hélice, sin embargo, en torres de tiro forzado se utilizan ventiladores centrífugos del tipo de jaula de ardilla.

Las aspas se fabrican de materiales resistentes a la corrosión co-



VENTILADOR



SISTEMA DE DISTRIBUCION DEL AGUA
CALIENTE

mo el aluminio, plástico reforzado con fibra de vidrio, madera laminada, acero inoxidable y metal monel..

b) Eliminadores de rocío.

Tienen por objeto reducir a un mínimo el agua arrastrada por el -- aire que se perdería sin ser utilizada . Los eliminadores de rocío constan -- en general de una ó varias persianas que obligan al aire a cambiar de direc-- ción bruscamemente y que por fuerza centrífuga hace que se separen las gotas de agua.

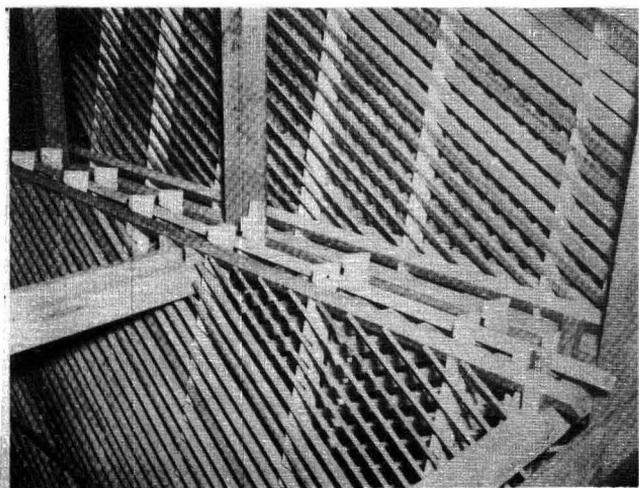
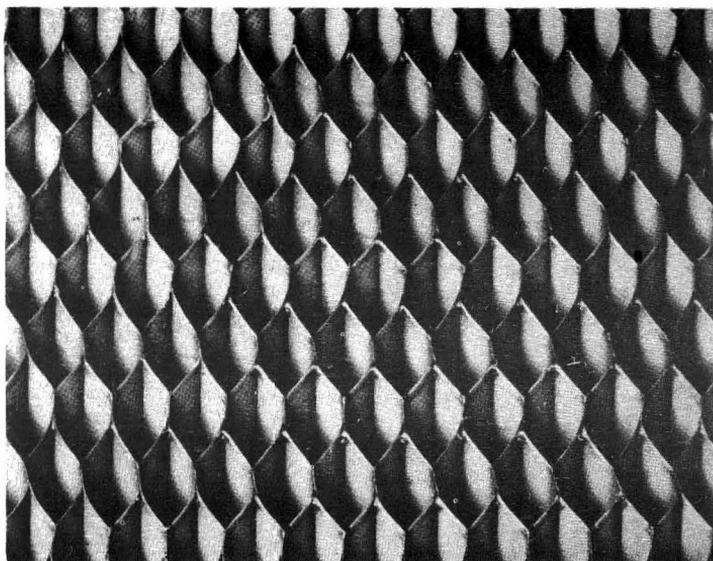
c) Sistema de distribución.

Su objeto es repartir uniformemente el agua caliente en la parte -- superior de la torre. Hay tres maneras de distribuir el agua: por gravedad, a presión y por rotación.

El sistema de distribución por gravedad se emplea en torres de ti-- ro inducido y flujo cruzado. El de distribución a presión en torres de ven-- tilación natural y sin empaque dispersor. Una variación de este último es el sistema de distribución por rotación.

d) Empaque.

Tiene por objeto aumentar el tiempo y la superficie de contacto en -- tre el agua y el aire.



ELIMINADORES DE LLOVIZNA

Existen dos tipos de empaque: el que ocasiona rocío y el que forma película.

En el empaque que ocasiona rocío se busca que el agua al ir cayendo, choque contra el empaque y se rompa en pequeñas gotas; este arreglo permite tener buenos resultados en torres de poca altura.

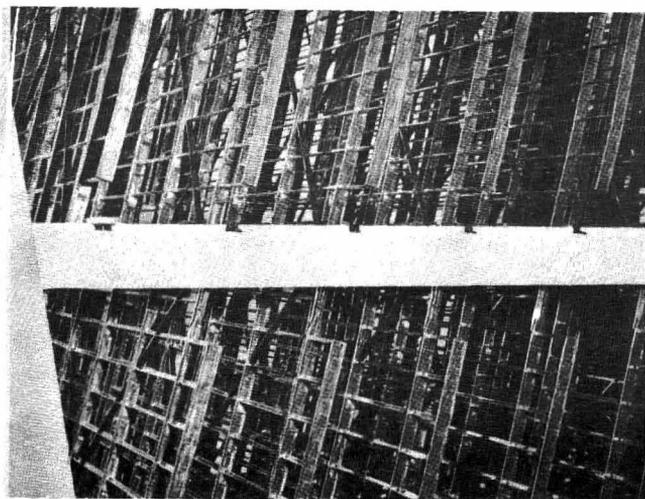
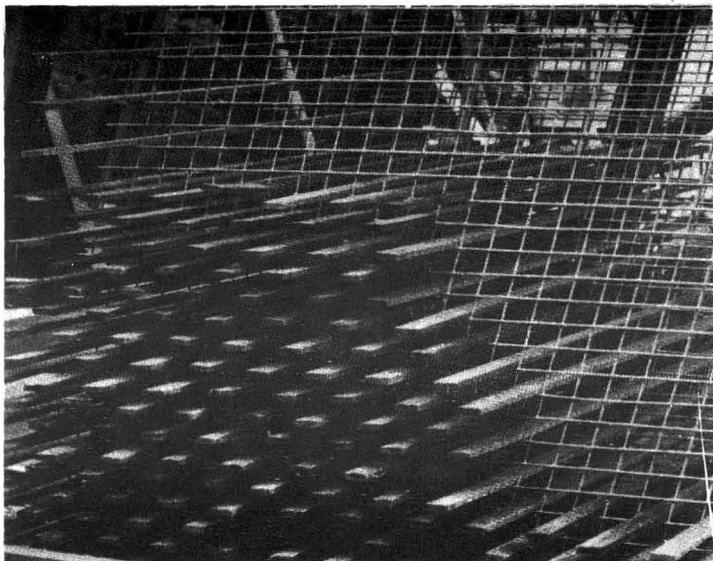
En el empaque que forma película, el flujo de agua se divide en un gran número de capas delgadas que fluyen sobre el empaque exponiendo una gran superficie al aire, evitando en lo posible la formación de gotas. Efecto que ayuda a reducir la caída de presión del aire a través de la torre, permitiendo así que se aumente la velocidad y el volumen de aire manejado.

Por lo que se refiere al material del empaque, podemos decir que lo más usado ha sido la madera, pero recientemente se están utilizando también los plásticos y en el caso del sistema de película, el asbesto cemento; estos materiales tienen la ventaja de ser más durables que la madera por lo que los costos de mantenimiento se reducen, pero son más costosos.

e) Persianas de Entrada.

Tienen por objeto dirigir el aire que entra a la torre y al mismo tiempo impedir la pérdida de agua.

En general su construcción es muy sencilla, consistiendo en una serie de tablas inclinadas de tal manera, que el agua que los llegue a mojar es

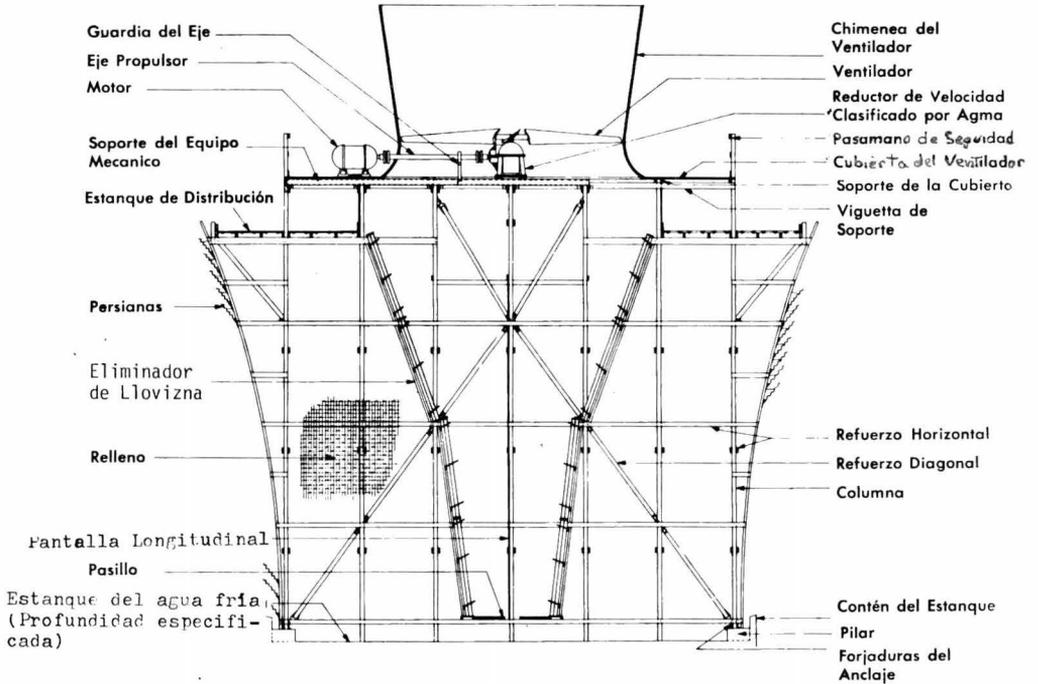


EMPAQUE Y SOPORTE

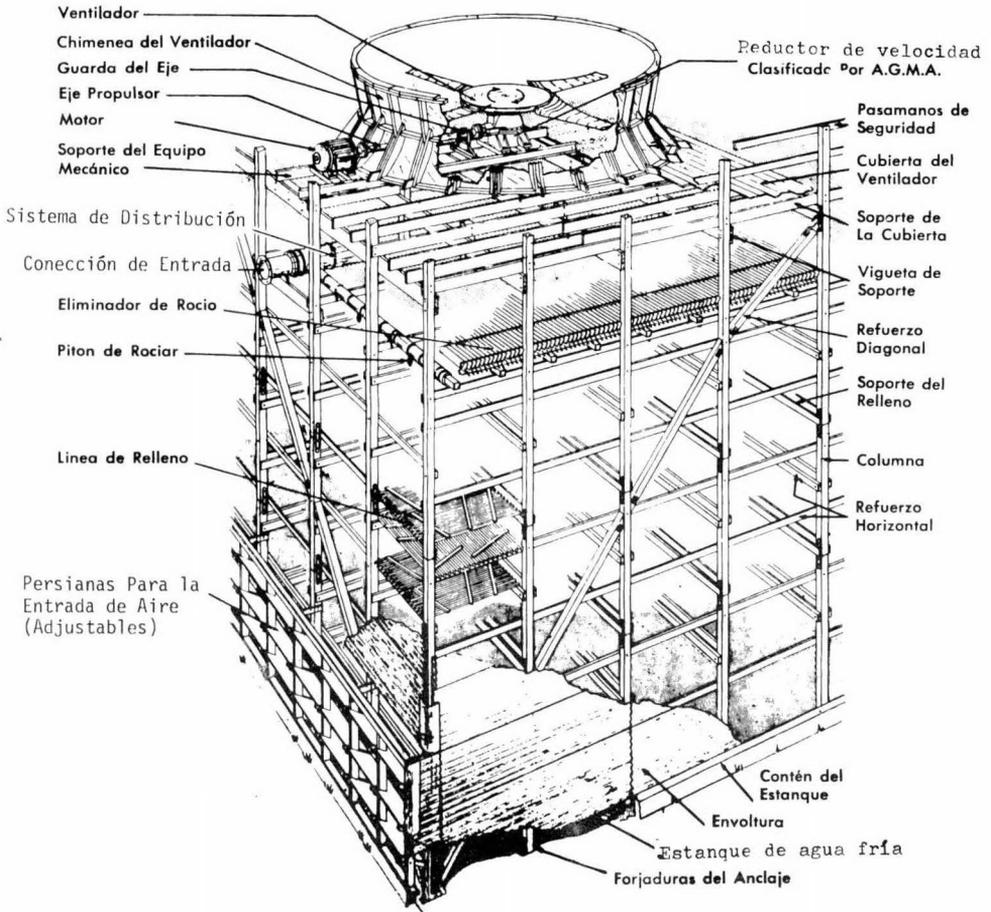
curra hacia el interior de la torre.

f) Tanque de Almacenamiento de Agua.

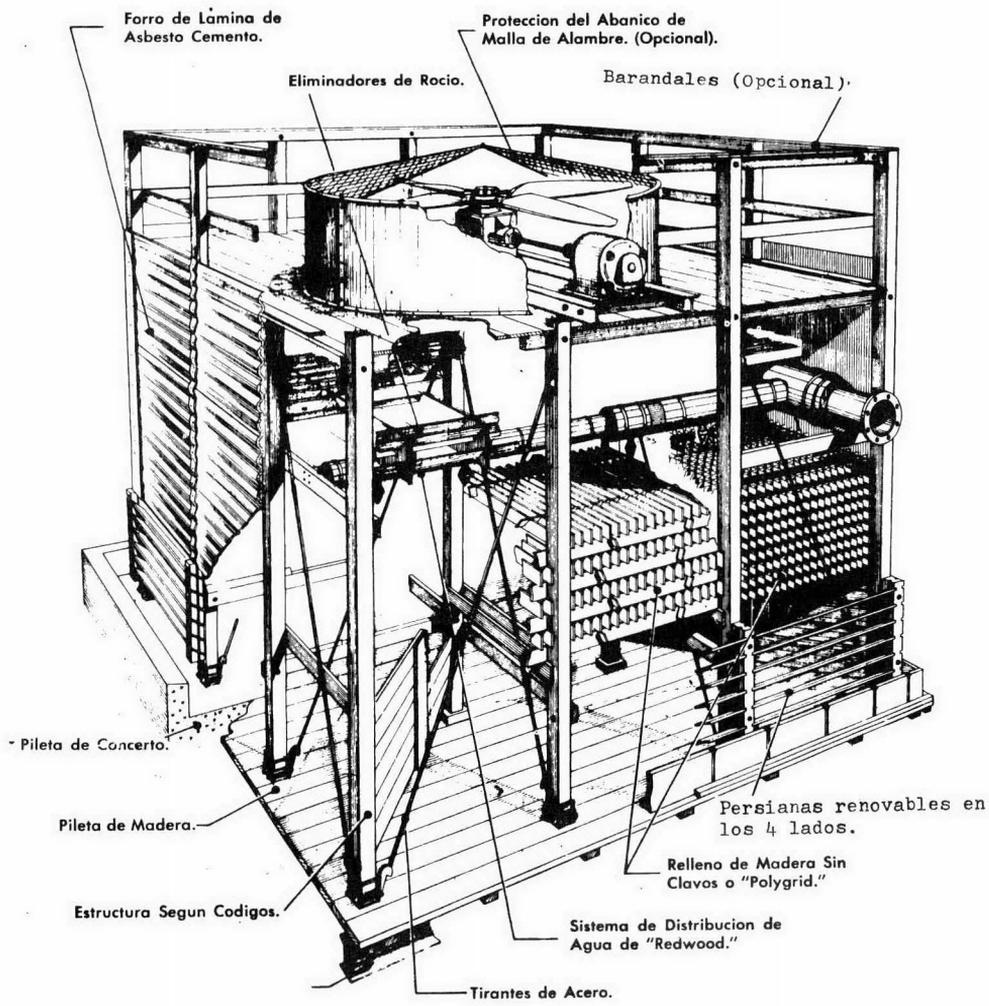
Este tanque que se encuentra colocado en la parte inferior de la torre sirve para recibir el agua fría; en general tratándose de torres grandes el tanque se construye de concreto ó a veces de madera. En caso de torres pequeñas construidas en los techos de las fábricas, se acostumbra tener tanques metálicos.



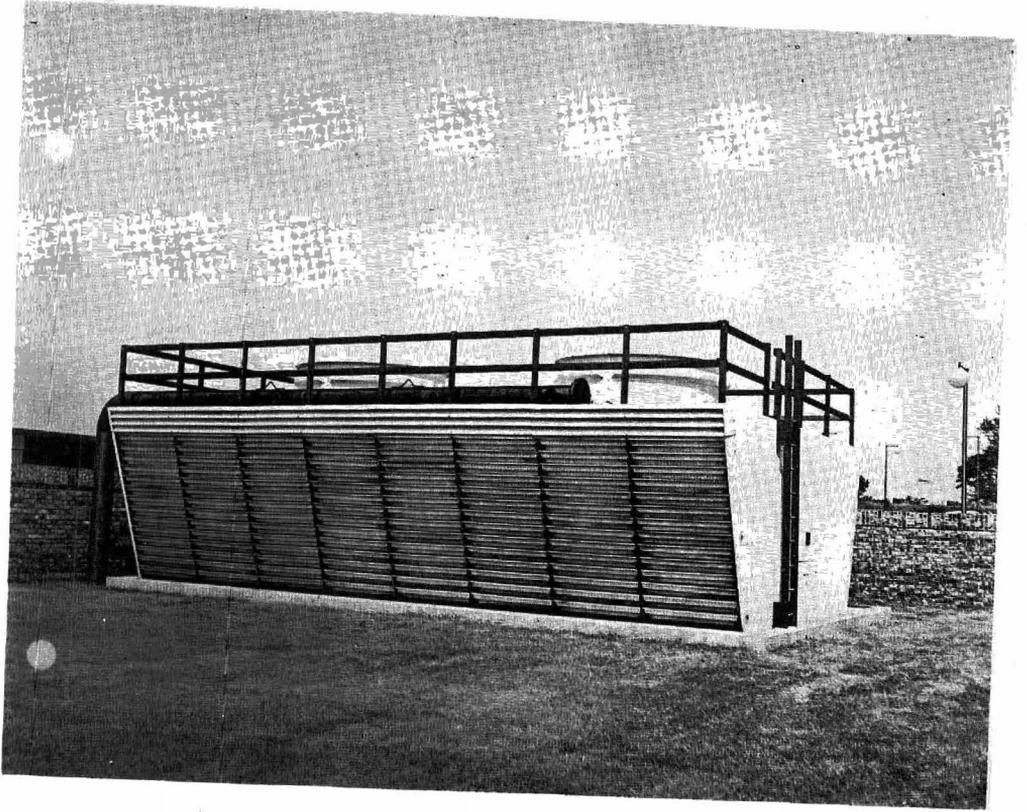
TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO



TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO



TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO



TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO CRUZADO

III) DESARROLLO DE LOS FUNDAMENTOS TEORICOS EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

Es un hecho físico que el aire es capaz de soportar vapor de agua y la psicometría muestra que para una temperatura dada el aire es capaz de soportar una cierta cantidad de vapor de H_2O , el cual para que la temperatura del aire sea máxima, será un máximo y cuando esté en estas condiciones será conocido como saturado. Si total ó parcialmente está saturado el vapor de agua de acuerdo a la Ley de Dalton tendrá su propia presión de vapor.

Para evaporar agua dentro del aire ambiente debe haber una diferencia entre la presión de vapor del agua y la presión de el vapor en el aire, - con la restricción de que la presión del agua debe ser más alta.

Considerando lo que sucede dentro de una torre de enfriamiento y - para desarrollar un método de cálculo, es útil pensar en una gotita de agua - con aire fluyendo sobre ella.

Para el enfriamiento de agua el volumen de aire que se está moviendo sobre ella tiene una presión de vapor más baja y de aquí podemos deducir -

que la alta presión de vapor que tiene la película que rodea a la gota de - - agua intentará igualarse con la presión de vapor que tiene el aire. De esto resulta un flujo de vapor, esto es, evaporación, y por lo tanto el agua pierde calor, aunque la conducción directa de calor entre el aire y el agua basada sobre una diferencia de temperaturas es útil también. Por lo tanto puede ser considerado que la gotita de agua está cayendo a través de una corriente-mecánica de aire a contracorriente en la torre; con agua alimentada en el domo y el aire en la base.

Puede hacerse la simplificación de que la película interfacial está a la misma temperatura que el agua de manera que en esta etapa las condiciones de el aire y el agua pueden ser graficados sobre una carta psicométrica.

Si despreciamos la evaporación, la justificación para esto puede ser mostrada haciendo un balance de calor:

$$\omega C_{p\omega} (t_1 - t_2) = G (h_2 - h_1) \text{ donde}$$

ω = flujo de agua en lb/hr

$C_{p\omega}$ = Calor específico del agua en BTU/lb °F

t_1 = Temperatura a la cual entra el agua a la torre en °F

t_2 = Temperatura a la cual sale el agua de la torre en °F

G = Flujo de aire en lb/hr

h_1 = Entalpia de el aire saturado que entra a la torre en BTU/lb

h_2 = Entalpia de el aire saturado que sale de la torre en BTU/lb

rearrreglando esta ecuación obtenemos:

$$WCp_w (t_1 - t_2) / G + h_1 = h_2 \quad (\text{ ec. 1})$$

Como puede observarse esta ecuación nos representa una recta.

Los cálculos para las torres de enfriamiento están basados normalmente sobre una sección transversal de la misma que contiene un elemento de volumen de empaque de la torre.

Las ecuaciones pueden ahora ser desarrolladas para evaluar el calor sensible y el calor latente que han sido transferidos.

El aire en algún punto de la torre tiene una temperatura de bulbo-seco T_y y una humedad Y' $(\frac{1bH_2O}{1b \text{ a.s}})$, así como también una entalpia H . El agua a la temperatura t es rodeada por una película de aire que se encuentra a una temperatura T' y la condición necesaria para enfriar el agua es que t sea mayor que T' la cual a su vez es mayor que la temperatura T_y que existe en la corriente de aire.

Si el calor específico del agua es tomado como la unidad, la velocidad de transferencia de calor de el agua a la interfase es:

$$dQ_w = Wdt = K_j a dv (t - T') \quad (\text{ ec. 2}) \quad \text{donde;}$$

Q_w = Velocidad de transferencia de calor de el agua a la pelícu-

la interfacial en BTU/hr' interfase.

K_1 = Coeficiente de película del agua a la interfase en BTU/lb

a = Area de contacto empacada por unidad de volumen de empaque-
en $\frac{ft^2}{ft^3}$

V = Volumen empacado de la torre en ft^3 .

Si una cantidad de este calor es transferido como calor sensible a la corriente principal de aire obtenemos:

$$dQ_s = /Kg \ a \ dv \ (T' - T) \quad (Ec. 3) \text{ donde:}$$

Q_s = Velocidad de transferencia del calor sensible de la interfase a la corriente de aire en BTU/hr.

$/Kg$ = Coeficiente de película del calor sensible de la interfase a la corriente principal de aire

T = Temperatura de el volumen de aire en °F

Es común igualar la resistencia a la transferencia de masa de el agua a la interfase. Nosotros pensamos que los métodos presentes usados en la determinación y aplicación de coeficientes a las torres para refrigeración general y acondicionamiento de aire no son afectados por esta suposición puesto que los coeficientes de laboratorio serían usados bajo condiciones similares en el campo.

La velocidad de transferencia de masa de el vapor en la película a el aire está dada por la (Ec. 4):

$$dm = K' a dv (Y' - Y) \text{ donde:}$$

m = Masa de vapor que se transfiere en lb/hr

K' = Coeficiente de transferencia de masa de la interfase a la corriente principal de aire.

Y = Humedad absoluta de el volumen de aire en $\frac{1b H_2O}{1b a.s.}$

Considerando el calor latente de vaporización como una constante -- (λ), la transferencia de masa puede ser mostrada como el calor transferido multiplicándola por λ :

$$\lambda dm = dQ_1 = \lambda k'a dv (Y' - Y) \text{ (Ec. 5) donde}$$

Q_1 = Velocidad de transferencia de el calor latente de la interfase a la corriente de aire en BTU/hr.

Con agua de enfriamiento y para condiciones de equilibrio, el agua perdida por concepto de evaporación se iguala a la mezcla que va a ser recibida por el aire es decir:

$$dm = G d Y \text{ (Ec. 6)}$$

El calor perdido por el agua es igual al calor ganado por el aire, y para la mayoría de los casos de refrigeración podemos ignorar las pérdidas por evaporación de manera que:

$$G d H = W dt \text{ (Ec. 7)}$$

La entalpia de el aire húmedo está dada por la (Ec. 8)

$$H = C_{pa} (T - T_0) + Y [\lambda + C_{pv} (T - T_0)] \quad \text{donde:}$$

C_{pa} = Calor específico del aire en BTU/lb °F.

C_{pv} = Calor específico del vapor en BTU/lb °F.

T_0 = La temperatura dato.

En la (Ec. 8) el primer término del lado derecho representa la entalpia del aire seco y el segundo la entalpia del vapor. Si diferenciamos esta ecuación ya que Y' y T son variables obtenemos:

$$dH = C_{pa} dt + Y C_{pv} dT + [\lambda + C_{pv} (T - T_0)] dY \quad (\text{Ec. 9})$$

ó

$$dH = (C_{pa} + Y' C_{pv}) dT + [\lambda + C_{pv} (T - T_0)] dY \quad (\text{Ec. 10})$$

El calor específico de la mezcla de aire y vapor de agua puede ser expresado como:

$$C_{pm} = C_{pa} + C_{pv} Y \quad (\text{Ec. 11})$$

Sustituyendo este valor en la (Ec. 10) obtenemos:

$$dH = C_{pm} dT + [\lambda + C_{pv} (T - T_0)] dY \quad (\text{Ec. 12})$$

igualando dH en las ecuaciones (7 y 12) obtenemos:

$Wdt = \text{Calor sensible} + \text{calor latente}$

$$Wdt = [G C_{pm} dT] + [\lambda + C_{pv} (T - T_o)] G dY \quad (\text{Ec. 13})$$

igualando los términos de calor sensible:

$$dQ_s = G C_{pm} dT$$

Ahora la (Ec. 3) puede convertirse en:

$$dQ_s = K_g a dv (T' - T) = G C_{pm} dT \quad (\text{Ec. 14})$$

La relación para transferencia de masa $dm = G dY$ puede ser usada - para convertir:

$$dm = K' a dv (Y' - Y) = G dY \quad (\text{Ec. 15})$$

donde el coeficiente de transferencia de masa K' puede ser expresado en diversas formas siempre y cuando las unidades se mantengan consistentes.

Como podemos observar la ecuación anterior puede ser comparada con:

$$dQ = U A dT$$

Ahora bien, si expresamos la ecuación anterior en palabras obtenemos la siguiente expresión:

Calor Transferido = (Coeficiente de Transferencia) x (Area de Transferencia) x (Diferencia de Temperaturas).

En este caso la fuerza directora ó el potencial es la temperatura, mientras que para la (Ec. 15) es la diferencia de humedades aunque podrían usarse también presiones de vapor.

Utilizando la relación de Lewis $Kg/K' \text{ Cpm}$ y haciendo la suposición de que el valor de esta expresión es aproximadamente igual a la unidad despegamos $Kg = K' \text{ Cpm}$ y si lo sustituimos en la ecuación 14 obtenemos la siguiente expresión:

$$dQ_s = K' \text{ Cpm } a \, dv \, (T' - T) = G \text{ Cpm } dT$$

Usando las ecuaciones 15 y 13 para $G \text{ Cpm } dT$ y $G \, dY$ tenemos:

$$Wdt = K' \text{ Cpm } a \, dv \, (T' - T) + \left[\lambda + \text{Cpv} \, (T - T_0) \right] K' a \, dv \, (Y' - Y) \quad (\text{Ec. 16})$$

rearrreglando términos obtenemos la (Ec. 17):

$$Wdt = K' a \, dv \, \left\{ \text{Cpm} \, (T' - T) + \left[\lambda + \text{Cpv} \, (T - T_0) \right] (Y' - Y) \right\}$$

Aplicando ahora la expresión para el cálculo de la entalpia para -- una mezcla vapor-aire:

$$H = \text{Cpa} \, (T - T_0) + Y \left[\lambda + \text{Cpv} \, (T - T_0) \right]$$

$$H = C_{pa} T + Y C_{pv} T - C_{pa} T_o + Y (\lambda - C_{pv} T_o)$$

Y como $C_{pm} = C_{pa} + Y C_{pv}$ entonces:

$$H = C_{pm} T - C_{pa} T_o + Y (\lambda - C_{pv} T_o) \quad (\text{Ec. 18})$$

De igual forma la entalpia de la película interfacial de aire estará dada por la ecuación (19):

$$H' = C_{pm} T' - C_{pa} T_o + Y' (\lambda - C_{pv} T_o)$$

Si resolvemos para T y T' las ecuaciones (18) y (19) y lo sustituimos en la ecuación (17) tenemos:

$$H + C_{pa} T_o - Y (\lambda - C_{pv} T_o) = C_{pm} T$$

$$H' + C_{pa} T_o - Y' (\lambda - C_{pv} T_o) = C_{pm} T'$$

Entonces de acuerdo a esto Wdt se reduce a:

$$Wdt = k'a \, dv (H' - H) + C_{pv} (Y' - Y)$$

Puesto que el valor del segundo término de esta última expresión es muy pequeño puede ser despreciado reduciéndose la ecuación a:

$$Wdt + K'adv (H' - H)$$

Y si igualamos con $G dH$ de acuerdo a la ecuación (7) obtenemos:

$$W dt = K' a dv (H' - H) = G d H$$

Debe notarse que esta ecuación se refiere a la película interfacial y si hacemos la suposición de que la temperatura de la película es igual a la temperatura del agua y que los coeficientes de película pueden considerarse - como coeficientes totales obtenemos que:

$$W dt = K a dv (H' - H) = G d H$$

Donde el valor de k' ha sido sustituido por K que es el coeficiente total de transferencia.

Esta última expresión puede ser integrada para obtener las ecuaciones (20) y (21):

$$\frac{K a V}{G} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{d H}{H' - H}$$

$$\frac{k a V}{W} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{d t}{H' - H}$$

Puesto que V es el volumen del empaque y está dado por:

$$V = \text{Area empacada} \times \text{altura del empaque}$$

La ecuación (20) puede rearrreglarse para obtener la expresión (22)-
como se muestra a continuación:

$$Ka (A \times L) / G = \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H' - H} \quad ??$$

y por lo tanto

$$L = G / ka A \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H' - H}$$

Donde A representa el área empacada que estamos considerando y L la altura del empaque.

Un determinado arreglo de empaque contendrá un número de unidades - de transferencia, siendo estas un término empleado en ingeniería química para referirse a la altura de empaque necesaria para que la temperatura del gas y el aire alcancen el equilibrio con la temperatura del agua de salida, ahora - que refiriéndonos a la ecuación (22) podemos determinar que:

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H' - H} = \text{Número de Unidades de Transferencia (N.U.T.)}$$

$$G / Ka A = \text{Altura de la Unidad de Transferencia (A.U.T.)}$$

No debe olvidarse que para el desarrollo de estas ecuaciones se hicieron las siguientes suposiciones:

- a) Se desprecian los efectos causados como pérdidas por evaporación.
- b) Se desprecia la resistencia en la interfase.
- c) El calor latente de vaporización es considerado constante.
- d) El calor específico del agua es considerado como la unidad.
- e) El número de Lewis para el sistema aire-agua es tomado como la unidad.

IV) INFLUENCIA DEL CLIMA Y LA ALTITUD SOBRE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Debido a las variaciones climatológicas y a las diferentes altitudes en que operan las torres de enfriamiento, hemos considerado necesario analizar la influencia de estos factores sobre ellas.

En primer lugar analizaremos el efecto que tiene la altitud sobre las torres de enfriamiento.

Cuando va a instalarse una torre de enfriamiento de agua debe considerarse la influencia de la altitud sobre la misma por lo que los siguientes factores son importantes.

- 1) A una altitud dada un metro cúbico de aire pesará menos que a nivel del mar.
- 2) A una altitud dada una determinada masa de aire es capaz de sostener o de soportar un mayor peso de mezcla que a nivel del

mar, o sea es una función de la saturación del aire y la presión ejercida.

El primer punto es de importancia porque, como ha sido demostrado, los cálculos para las torres de enfriamiento estan basados en un intercambio de calor y masa entre un volumen de aire y agua dados. Como los ventiladores escogidos son a menudo unidades estandard para un tamaño dado de torre, el ventilador habrá sido seleccionado para un volumen estandard y algún cambio en la altitud acarreará que el ventilador este liberando el mismo volumen pero con un peso diferente del aire al valor de diseño.

Respecto al volumen de aire necesario para un requerimiento particular de enfriamiento y una torre a gran altitud cuando se compara al nivel del mar, el efecto de la altitud es de dos aspectos. En vista de que es la masa del aire y no el volumen, vital para el funcionamiento de la torre, el primer efecto es que debido a la altitud y su correspondiente reducción en la densidad del aire, se toma un volumen más grande para obtener las libras requeridas. Por el otro lado debido a la mas alta presión parcial del agua la cual incrementa la tendencia evaporativa, la masa actual de aire requerida para el servicio se reduce. Aún cuando esto fue reconocido por muchos de los fabricantes de torres de enfriamiento, para la mayoría de las condiciones de operación, el más significativo de estos dos efectos es el evaporativo, esto generalmente supone que es suficiente para ignorar la elevación en el cálculo de volumen de aire y considerar solamente la presión estática reducida y la reducción en el caballaje correspondiente a la más baja densidad del aire. -- (Nota: Aún cuando enfriando al nivel del mar de alta temperatura reflejará -

<u>Alt. relativa al nivel del mar</u>	<u>Presión Barométrica</u> in Hg	<u>Densidad relativa a</u>		
		30°F	60°F	90°F
8,000 pies abajo	40.7	1.44	1.36	1.28
2,000 pies abajo	32.4	1.15	1.08	1.02
1,000 pies abajo	31.2	1.10	1.04	1.984
Nivel del mar	30.0	1.06	1.00	0.945
1,000 pies arriba	26.9	0.951	0.896	0.847
6,000 pies arriba	24.0	0.850	0.801	0.757
10,000 pies arriba	20.6	0.730	0.688	0.533

VARIACION DE LA DENSIDAD DEL AIRE CON
LA ALTITUD

una reducción de volumen a gran altitud, bajos bulbos húmedos con pequeños -- rangos pueden realmente necesitar un ligero aumento en el volumen del aire).

La mayoría de los cálculos comerciales para torres de enfriamiento no consideran el factor altitud hasta cerca de 3000 ft. arriba del nivel del mar.

En sitios donde existen bajos valores de presión barométrica - (en altas altitudes), el valor de la entalpía de el aire para una temperatura dada se incrementa, reduciendo así el valor de la "característica" de la torre ($K_a V/L$) requerido para una relación L/G dada. Al mismo tiempo una reducción en la presión total reduce la densidad del aire e incrementa el volumen de aire requerido para un valor dado de G' ; donde G' es el flujo de aire en lb/hr. y G es la masa velocidad del aire en lb/hr ft².

Una reducción en la densidad también incrementará las pérdidas de presión obtenidas para un valor dado de G' .

El resultado del cambio del volumen específico del aire es originado por las diferencias de altitudes ya que a mayor altitud decrece el volumen específico y un efecto compensante ocurre debido a las altas fuerzas directoras disponibles para una temperatura del agua dada a mayor altitud, comparada con el nivel del mar. Esto es, para aire saturado hay un incremento en la entalpía para una presión barométrica reducida y para altitudes abajo del nivel del mar ocurre el efecto opuesto.

METODOS DE ANALISIS

"The Cooling tower Institute" estudió cuatro métodos para el análisis de las condiciones de funcionamiento a grandes alturas sobre el nivel del mar y encontró que de esos cuatro métodos unicamente dos pueden dar un uso satisfactorio.

Los cuatro métodos estudiados fueron los siguientes:

1. Entalpia equivalente a la temperatura media del agua.
2. Pendiente equivalente a la temperatura media del agua.
3. Razón equivalente del cambio de pendiente a la temperatura media.
4. Entalpia equivalente a t_1 y t_2 o sea temperatura del agua caliente y del agua fría.

No entraremos en la discusión de los métodos de análisis y nos limitaremos a describir el método que se emplea en este trabajo. Las gráficas 1, 2 y 3 de la Fig. 26 muestran la diferencia en las curvas de operación al nivel del mar y a grandes alturas. La fig. 7 muestra los resultados en aproximación a la curva de bulbo húmedo para la gran altitud estando abajo de las curvas al nivel del mar, es decir una torre de características de funcionamiento más bajo encontrará los requerimientos de servicio para un L/G dado. La Fig. 4 es una ilustración gráfica del método de entalpia equivalente a la temperatura media del agua. La Fig. 5 es para el método de pendiente equivalente. La Fig. 6 muestra el método de entalpia equivalente a la temperatura-

del agua fría y agua caliente.

De los métodos arriba descritos el "Cooling Tower Institute" descartó el de Razón equivalente de cambio de pendiente y el de Entalpia equivalente a t_1 y t_2 ; como métodos insatisfactorios.

El método de pendiente equivalente aunque dá un uso satisfactorio, su aplicación es un poco más complicada que para el método de entalpia equivalente. Para proveer las herramientas necesarias para el uso de cualquiera de estos dos métodos, se dan curvas para valores de temperatura comparables a elevaciones variantes. Y para completar los datos requeridos para capacidad a altas elevaciones también se incluyeron:

- a) Fig. 29 y 30 temperatura - vs - entalpia a elevación variante.
- b) Fig. 31 temperatura - vs - volumen específico o elevación variante.
- c) Fig. 32 temperatura - vs - razón de densidad a elevación variante.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El procedimiento más acertado para usarse en el cálculo de la capacidad de la torre para gran altitud sobre la base de la temperatura media del agua equivalente es resumida como sigue:

- a) Usando la Fig. 27, encontrar el nuevo bulbo húmedo de diseño -

al nivel del mar.

- b) Usando la Fig. 27, encontrar la nueva temperatura media del agua al nivel del mar.
- c) Usando el rango de diseño, calcular las nuevas temperaturas de agua fría y caliente al nivel del mar.
- d) Encontrar el L/G basado en esas nuevas condiciones para la torre deseada (o el factor de diseño de la nomenclatura propia de los fabricantes).
- e) Determinar la entalpia del aire de salida por balance de calor.

$$h_2 = \frac{L}{G} R + h_{wb} \qquad R = \text{agua de reposición}$$

donde h_{wb} es el bulbo húmedo de diseño correcto de alta elevación y no el valor modificado al nivel del mar.

- f) Encontrar la temperatura del aire a la salida, de la fig. 29 o Fig. 30, usando h_2 de (e).
- g) Encontrar el volumen específico de la fig. 31.
- h) Encontrar el factor de corrección de densidad de la fig. 32.
- i) Calcular el volumen correcto de la ecuación

$$\text{volumen} = \text{cfm} = \frac{\text{G.P.M.} \times 8.34 \times \text{volumen específico}}{L/G}$$

" EFFECT OF ALTITUDE ON COOLING TOWER RATING ILLUSTRATIVE GRAPHS

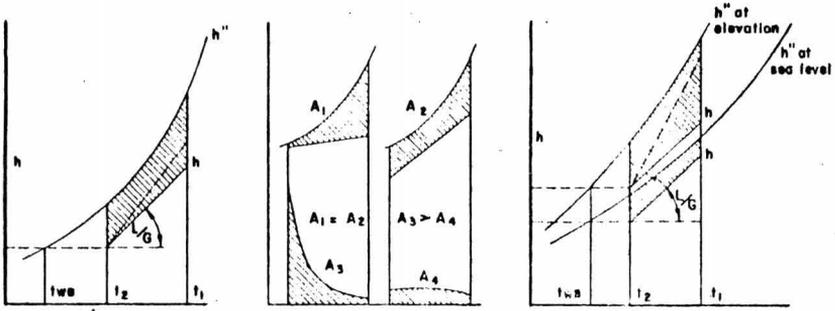


FIG. 1

FIG. 2

FIG. 3

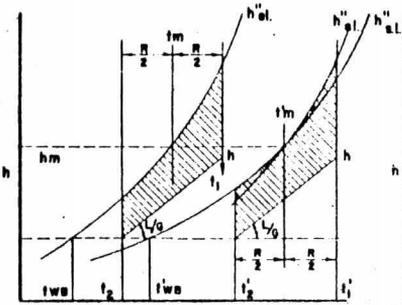


FIG. 4

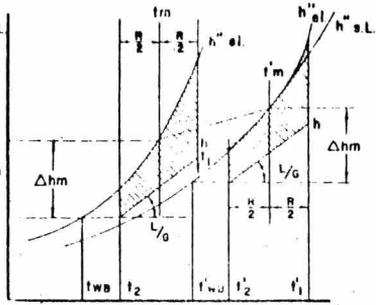


FIG. 5

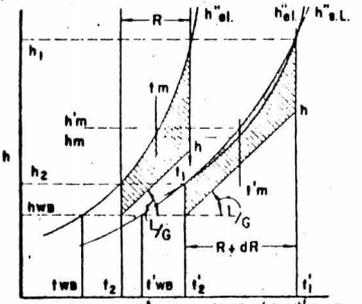


FIG. 6

$$\frac{K_a V}{L} = \left(\frac{K_a V}{L} \right)_{s.l.} \times \frac{R}{R + dR}$$

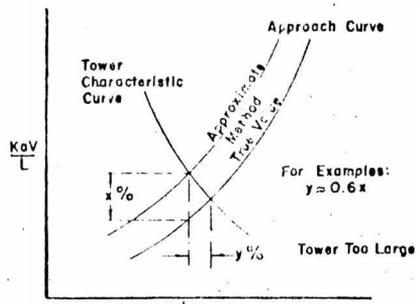


FIG. 7

FIG. 26 GRAFICAS ILUSTRATIVAS DEL EFECTO DE LA ALTITUD EN TORRES DE ENFRIAMIENTO.

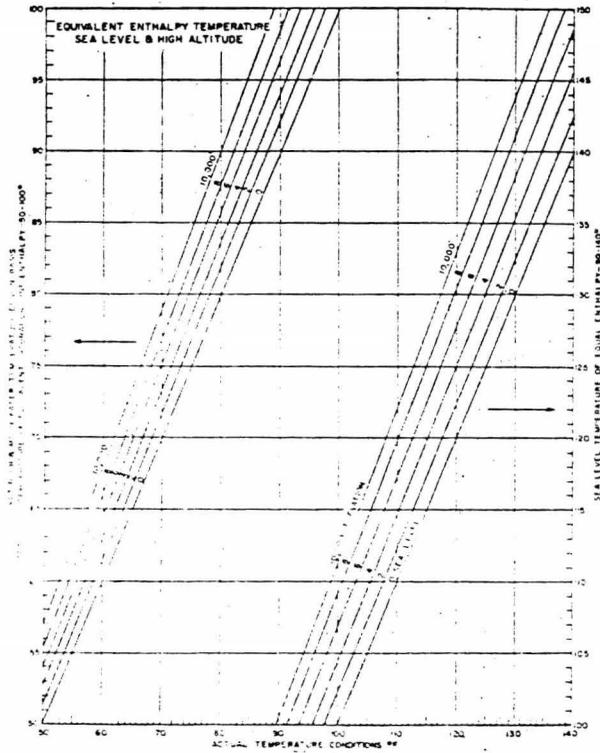


FIG. 27

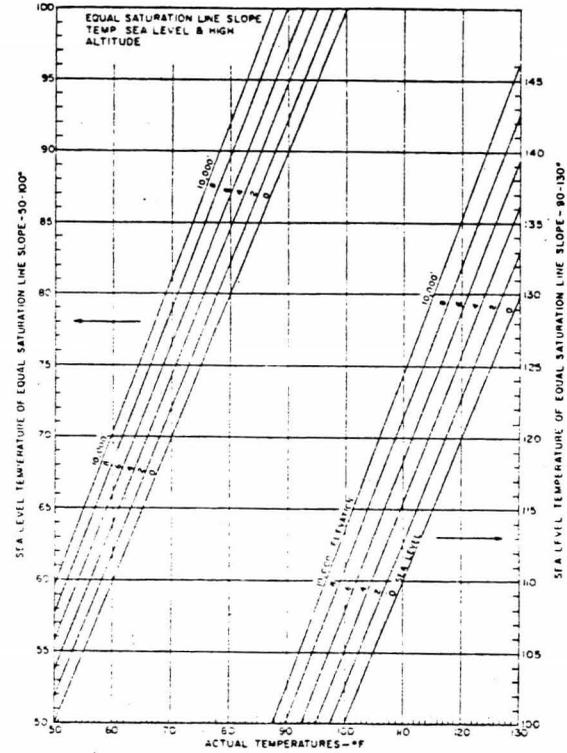


FIG. 28

TEMPERATURA AL NIVEL DEL MAR & GRAN ALTITUD.

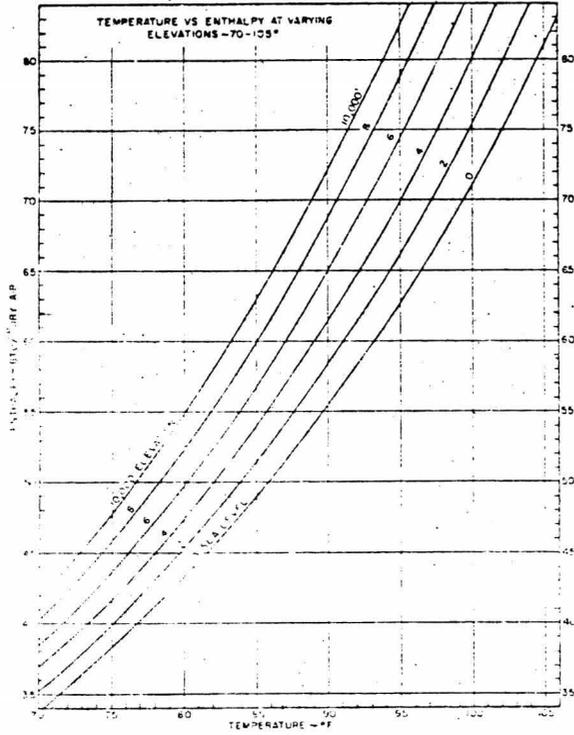


FIG. 29

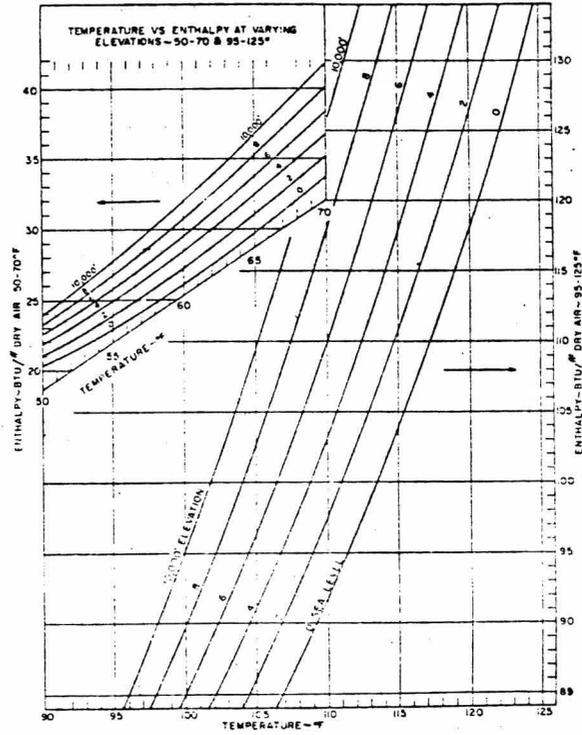


FIG. 30

TEMPERATURA CONTRA ENTALPIA A ELEVACION VARIANTE.

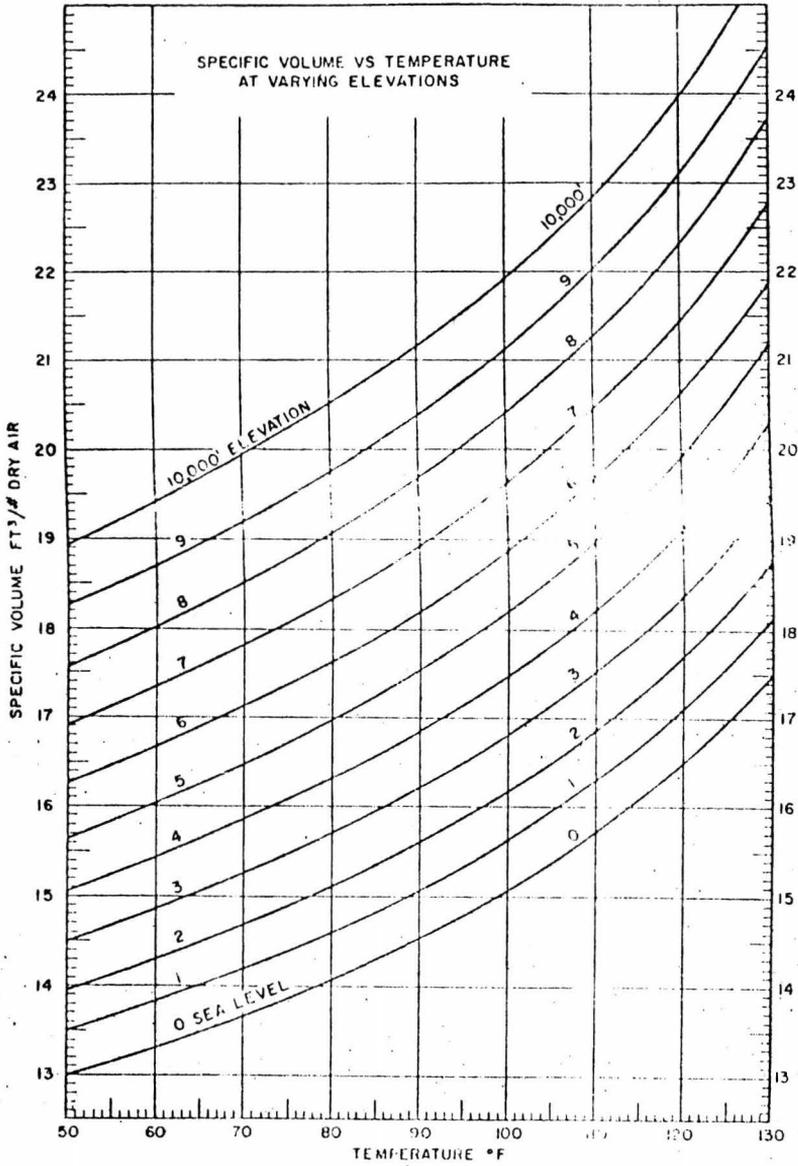


FIG. 31 TEMPERATURA - VS - VOLUMEN ESPECIFICO A ELE. EN VARIANTE.

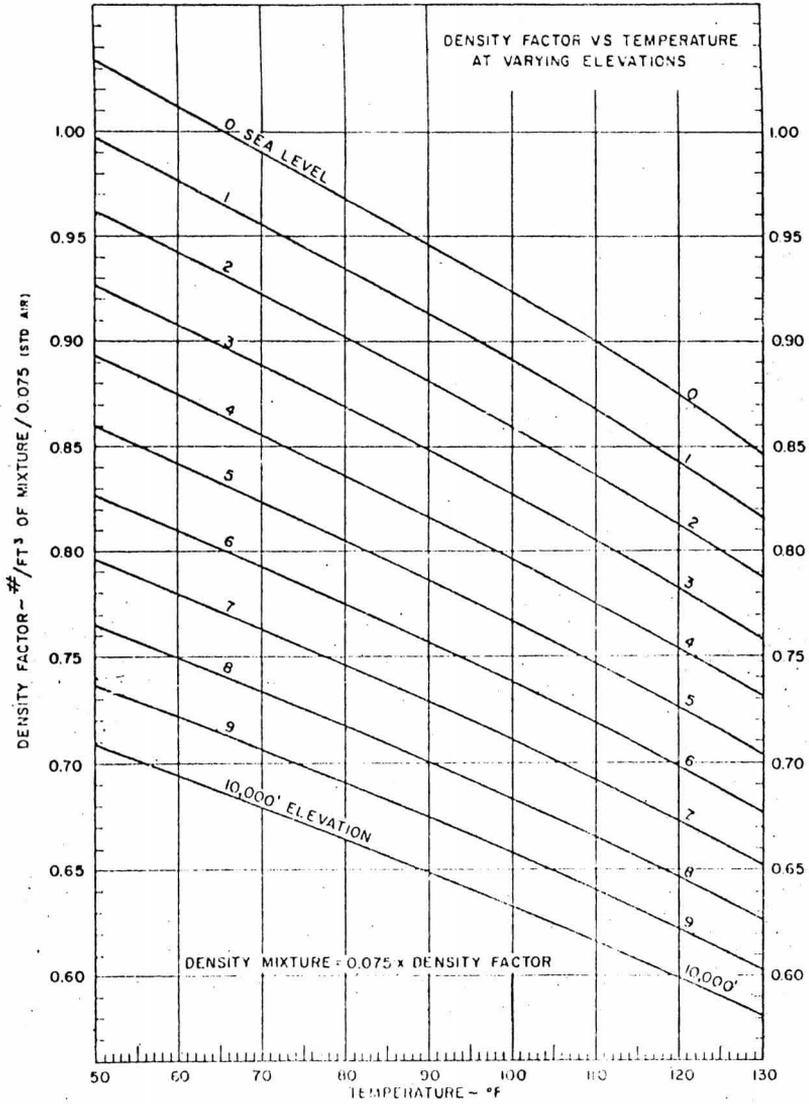


FIG. 32 TEMPERATURA - VS - RAZON DE DENSIDAD A ELEVACION VARIANTE.

- j) Reducir la presión estática para los cálculos de caballaje por el factor de densidad de la elevación de temperatura, fig. 32.

Ahora analizaremos algunos efectos causados por las continuas variaciones climatológicas.

IV.1. EFECTOS DE LA PRECIPITACION FLUVIAL, ARRASTRE Y VIENTOS

Todos los sistemas de enfriamiento con excepción de estanques o torres con circuito de agua cerrado pueden provocar una precipitación continua de llovizna en las cercanías. En grandes instalaciones esta llovizna puede extenderse a distancias considerables, siendo esto un hecho que puede traer como consecuencia que la corrosión en los equipos de acero aumenten por lo que los costos de mantenimiento se verán afectados.

Este efecto varía considerablemente de acuerdo con la estación, el tiempo y la carga. En verano una torre de tiro natural se ajusta a si misma en su funcionamiento ya que trabajara con bajas velocidades de aire y consecuentemente habrá un menor arrastre. En esta época debido a las altas temperaturas y bajas velocidades del aire, este tendrá una mayor capacidad para absorber calor y por lo tanto se requerirá un menor gasto de aire.

El tamaño de las gotas de agua que causan estos efectos tienen un diámetro medio de 0.011 pulgadas. A una velocidad del viento de 10 km/hr estas gotitas caerán casi a 850 ft alejados de la torre a partir de una altura de 200 pies arriba de la misma.

En el invierno el tamaño de las partículas será probablemente más grande y la velocidad de caída será mas rápida por lo que el lugar donde la llovizna será más fuerte se localiza en las cercanías de la torre.

Las dos posibles causas que originan la formación de llovizna son:

- a) Condensación del agua evaporada en la torre cuando el aire caliente que sale de la torre se pone en contacto con el aire -- atmosférico frío.
- b) El arrastre, que son las gotas de agua que entran con el flujo de aire a través de la torre.

Examinando la cantidad total media de pérdidas de agua en torres - de enfriamiento, se encuentra que la cantidad de agua perdida por evaporación es mayor; esto es totalmente obvio puesto que la mayor parte del calor disipado es extraído como calor latente del agua evaporada.

Si la cantidad de agua evaporada que lleva consigo el aire de salida es descargada a gran altura la cantidad de agua que se precipite sobre la tierra será mucho menor.

Efectos del Arrastre y su Eliminación.

Experimentalmente se ha comprobado que con un rango de enfriamiento de 10°C y con una velocidad del aire de 1.3 m/seg. en una torre con un siste

tema de distribución de rociado se pierden de 10 a 20 g de agua por m^3 de aire por concepto de evaporación y de 1 a 2 g por arrastre. Podemos considerar que el arrastre es casi un 10% de la pérdida total aunque este calor puede verse afectado por la carga de aire y además dependerá de la velocidad del aire y de las condiciones climatológicas.

Para evitar el arrastre debemos tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Se deben tener condiciones de flujo pelicular absoluto y la velocidad del aire debe mantenerse constante para que no ocasione arrugas a la película.
- b) La velocidad con que caen las gotas del sistema de distribución debe ser mayor que la velocidad con que sube el aire (considerando condiciones de flujo a contra corriente como en las torres de tiro inducido).

El arrastre es directamente proporcional a la velocidad con que el aire circule por la torre.

La ecuación de que el arrastre es aproximadamente igual a la (cantidad de aire)^{2.5} se adapta a resultados experimentales; considerando esto como un hecho una reducción del 25% de aire reduciría el arrastre a 1/2 y una reducción del 40% de la velocidad del aire reduciría el arrastre a casi 1/10.

La forma mas común para reducir este efecto es el empleo de los -- llamados "eliminadores de niebla" que han sido usados, por muchos años en la industria química en las torres de tiro mecánico.

El uso de estos eliminadores dió como resultado un incremento en - el costo total de la torre pero fue contrarrestado por el aumento en la efi-- ciencia además de que podían usarse mas altas velocidades de aire con mayor - seguridad.

IV.2) RECIRCULACION.

Llamamos recirculación en una torre de enfriamiento a la trayecto-- ria seguida por el aire que después de haber entrado a la torre y debido a la escasez del aire atmosférico causado por la inmovilidad de este vuelve a en-- trar a la torre, atraído por las masas de aire aspiradas por los ventiladores.

Para minimizar la recirculación debemos tomar en cuenta los siguien-- tes aspectos:

a) Enviar el aire de salida hasta una altura en que no pueda ser-- recirculado, esto se logra con mayor facilidad en las torres de tiro mecánico, donde este efecto es logrado a expensas de la potencia del ventilador.

b) Considerar cuidadosamente la localización de la torre en rela-- ción a sus alrededores y tomar en cuenta el efecto que podrían tener los vien--

tos dominantes.

Eliminar por completo la recirculación es casi imposible y cada tipo de instalación se caracteriza por un factor de recirculación, este puede expresarse por medio de la siguiente ecuación:

$$Cr = \frac{Gt - Ga}{Gt}$$

donde: Cr = factor de recirculación

Gt = cantidad total de aire que fluye a través de la torre en

$$\frac{lb}{hr}$$

Ga = cantidad de aire atmosférico adicionado en lb/hr.

La determinación de este factor corresponde a un análisis experimental particular.

Las torres de enfriamiento serán más sensibles a la recirculación si Cr es pequeño y esto ocurrirá si:

- 1) El acercamiento es pequeño, particularmente si la temperatura de bulbo húmedo ambiente es baja.
- 2) El rango es grande.
- 3) La entalpia es baja.
- 4) La relación L/G es alta.

Si el factor de recirculación aumenta, habrá por consecuencia un incremento en la temperatura del agua que se está enfriando por lo que disminuirá la eficiencia con que está operando la torre.

En el diseño de las torres de enfriamiento deben considerarse las condiciones críticas, por ejemplo en verano el factor de recirculación es muy pequeño, pero en invierno puede sufrir un incremento considerable por lo que el valor de la relación L/G aumentará para dicho diseño.

V) TRATAMIENTO DE AGUA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO.

En este capítulo se discutirá el tratamiento que debe dársele al agua ya que esta, al ser obtenida de diferentes fuentes como ríos, lagos, pozos, etc. puede contener diferentes contaminantes que afecten el funcionamiento de las torres de enfriamiento, por lo que un tratamiento adecuado reducirá los costos de mantenimiento y la vida de los equipos será mayor.

V.1) AGUA DE ENFRIAMIENTO

El agua de enfriamiento empleada en las instalaciones industriales debe reunir determinadas características en lo que respecta a la concentración y tipos de compuestos que normalmente la acompañan, sin embargo, dichos compuestos son característicos de las fuentes de suministro y de la época del año.

Las diferentes fuentes de suministro podemos dividir las fundamentalmente en cuatro tipos:

- a) Agua de lluvia.
- b) Aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas, etc).
- c) Agua de mar.
- d) Aguas del subsuelo (manantiales y pozos).

a) Agua de lluvia. Debería estar libre de contaminantes, pero a medida que se aproxima a la superficie terrestre va contaminándose con los gases atmosféricos (O_2 , N_2 , CO , CO_2) y humos en suspensión, así como de microorganismos, polvo, etc.

Cuando comienza su proceso de percolación a través de las capas superficiales, absorbe más CO_2 formando el hipotético ácido carbónico, ocasionando un aumento en su potencia solvente, y por lo tanto disolverá los compuestos inorgánicos y orgánicos constituyentes de las diferentes capas por los cuales atraviesa y que serán los que le confieran las características con que finalmente se le encuentre.

b) Aguas superficiales. Se constituyen en su mayor parte, por el agua de lluvia, de aquí que los contaminantes que lo impurifican sean los característicos de las diferentes zonas por las que atravieza como se mencionó anteriormente.

Las aguas de estanques y lagos son susceptibles de purificarse así mismas cambiando su calidad, debido sobre todo al reposo parcial a que están sujetas.

c) Agua de mar. Representa las más altas concentraciones de sólidos disueltos y materia orgánica, de aquí que su uso esté muy limitado, debido principalmente al alto costo de tratamiento, pues los métodos de evaporación instantánea requieren en la actualidad de enormes inversiones, haciendo como antes se ha dicho que su uso sea limitado.

d) Aguas del subsuelo. Proviene de pozos poco profundos pueden ser blandas o duras, dependiendo de la composición del agua que les rodea. La filtración natural, hace que estas aguas estén relativamente libres de turbidez y de materia orgánica. Este tipo de agua, generalmente es más blanda que el agua de pozo profundo, pues ésta tiene una alta concentración de sólidos disueltos.

En general el agua de pozo es clara e incolora, no así el agua de manantiales que generalmente es afectada por los contaminantes normales de la superficie.

El agua de superficie (ríos, lagos, etc) generalmente tiene temperaturas acordes con la época del año, en cambio el agua de pozos, se encuentra a aproximadamente medio grado centígrado por cada 64 pies de profundidad arriba de la temperatura promedio anual del aire.

IMPUREZAS PRESENTES EN UNA FUENTE DE AGUA CRUDA.

Las impurezas que pueden estar presentes en una fuente de suministro de agua, las podemos dividir en dos fundamentalmente: Sólidos disueltos-

y solidos en suspensión.

En la siguiente tabla se enlistan las impurezas más comunes, así como el estado en que se encuentran y los problemas que puede ocasionar su presencia.

IMPUREZAS	ESTADO	PROBLEMA OCASIONADO
Fangos, arcillas	suspensión	Olor, incrustaciones-
sedimentos	coloidal	depósitos
Olor	Gases disueltos	
Desperdicios	Suspensión	Corrosión, Incrusta--
	Coloidal	ción, ensuciamiento.
Bacterias	Solución	Enfermedades, produc-
	Suspensión	tos de corrosión y en
	Coloidal	suciamiento.
Algas	Solución	Taponeamiento, olor,-
	Suspensión	color, ensuciamiento.
	Coloidal	
H ₂ S	Solución	Corrosión, olor, aci-
		dez
Oxígeno	Solución	Corrosión general y -
		localizada
Ca (HCO ₃) ₂	Solución	Incrustación
Ca (CO ₃)	Solución	Incrustación
Ca SO ₄	Solución	Coagulos insolubles
mg (HCO ₃) ₂	Solución	Incrustación

IMPUREZAS	ESTADO	PROBLEMA OCACIONADO
mg (CO ₃)	Solución	Incrustación
mg SO ₄	Solución	Coágulos, insolubles
mg Cl ₂	Solución	Incrustación, Corrosión
SiO ₂	Suspensión Coloidal	Incrustación
Na ₂ SiO ₃	Solución	Incrustación
Aceite	Suspensión Emulsión	Ensuciamiento
NaHCO ₃	Solución	Alcalinidad Corrosión
Na ₂ CO ₃	Solución	Alcalinidad Corrosión
NaOH	Solución	Alcanidad Corrosión
NaCl	Solución	Corrosión

Las principales fuentes de suministro en las instalaciones industriales, están constituidas por vasos de captación en ríos o por agua de pozos.

El agua proveniente de los vasos de captación, generalmente es sometida a un tratamiento de clarificación o filtración, con objeto de eliminarles ciertos sólidos en solución y la casi totalidad de las impurezas en suspensión o emulsión.

ESPECIFICACIONES DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

Las especificaciones que debe reunir una agua de enfriamiento varían mucho ya que dependerán de la fuente y del uso industrial a que sean destinadas, así como del material del equipo de enfriamiento.

En términos generales podemos considerar que el agua de enfriamiento debe reunir las siguientes especificaciones generales.

1. No debe ser corrosiva, 2. No debe formar incrustaciones. 3. No debe causar taponeamientos ni depósitos orgánicos e inorgánicos en el equipo.

V.2) CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO

Como muchas veces esta fuera de nuestras manos el controlar algunos de los factores que afectan el ensuciamiento, se hace necesario el empleo de agentes de superficie, los cuales tienen por objeto prevenir el depósito de lodos, arcillas, algas, fibras, etc., sobre la superficie metálica, este tipo de agentes han sido llamados agentes auxiliares para el tratamiento del agua de enfriamiento, ya que complementan a los inhibidores de corrosión a la vez que evitan en cierto grado la incrustación y ensuciamiento de las superficies metálicas en contacto con el agua.

Los agentes de este tipo los podemos clasificar por su acción en: Quelatos, secuestrantes, dispersantes y coagulantes.

Los quelatos basan su acción en la atracción electrónica con los iones metálicos presentes en el agua como calcio y magnesio, sosteniéndolos unidos a la estructura anular de la molécula; ejemplos de este tipo de agentes son el ácido nítrico y el ácido etilendiamino-tetracético.

Los agentes secuestrantes tienen su acción en el intercambio electrónico con los materiales que causan depósitos, manteniéndolos en solución: - ejemplos de este tipo son los polifosfatos.

Los agentes dispersantes tienen una acción parecida a la de los -- Quelatos, pero la fuerza de unión entre partícula y agente son mucho mas débiles que en el caso de los Quelatos.

Generalmente estos agentes absorben los iones o partículas en su capa superficial, neutralizando las fuerzas de unión entre iones o partículas y superficie metálica, manteniendo a las partículas dispersas y evitando así su depósito; ejemplo de este tipo de agentes son los taninos y ligninas.

Los agentes coagulantes funcionan como agentes de atracción de las partículas, formando, grandes masas con dichas partículas, neutralizando también las fuerzas de unión entre dichas partículas y la superficie metálica; - agentes de este tipo son las poliacriloamidas.

Una vez seleccionado el tratamiento más adecuado; este deberá cumplir ampliamente los siguientes objetivos.

1. Deberá controlar la formación de incrustaciones en la superficie de enfriamiento.

2. Deberá prevenir la corrosión del metal en contacto con el agua de enfriamiento.

3. Deberá evitar el ensuciamiento de las superficies de enfriamiento.

4. Deberá evitar el deterioro de la madera de las torres de enfriamiento.

Entre los tratamientos contra la corrosión, se encuentran los inhibidores anódicos como los cromatos y polifosfatos cuyas dosificaciones varían de 0.5 - 2 ppm., dependiendo del tipo de agente y de la turbidez del agua de circulación.

El ácido sulfúrico es uno de los mejores agentes para el control del PH en aguas alcalinas, ya que no solamente nos permite llegar al PH de trabajo de los inhibidores de corrosión mencionados, sino que a la vez nos transforma las sales insolubles de calcio y magnesio a los sulfatos respectivos que son más solubles.

Entre los tratamientos contra los microorganismos, se encuentra el empleo de cloro, por ser un biocida de amplio espectro y cuya dosificación se hace en forma intermitente con dosis de 0.5 a 1 Ppm. como cloro residual,-

siendo el tiempo de cloración normalmente de 1 - 2 horas por cada turno de 8- horas.

De acuerdo con lo anterior para los sistemas de enfriamiento ahora usados se proponen los siguientes tratamientos.

TRATAMIENTO I

Agente Químico	Función	Dosis inicial	Control
Cromato de sodio	Inhibidor de corrosión	25-30 Ppm	12-16 Ppm como CrO ₄
Sulfato de Zinc	Inhibidor de corrosión	10-12 Ppm	5-10 Ppm.
H ₂ SO ₄	Control pH	pH.6.6-7.0	6.6 - 7.0
Tanino	Preu. ensuc.	2-3 Ppm	1-2 Ppm
Cloro	Biocida	1 Ppm	0.5 - 1Ppm residual.

TRATAMIENTO II

Dicromato de sodio	Inhibidor de corrosión	30-40 Ppm	15-20 Ppm como CrO ₄
Hexametáfosfato de Sodio	Inhibidor de Corrosión	5-10 Ppm	2-4 Ppm como PO ₄
Sulfato de Zinc	Sinergista	5-10 Ppm	5-10 Ppm.
H ₂ SO ₄	control pH	6.5 - 7.0	6.5 - 7.0

Tanino	Prev. ensuc.	1-2 Ppm	1 Ppm
Cloro	Biocida	1 Ppm	0.5-1 Ppm residual.

TRATAMIENTO III

Agente Químico	Función	Dosis inicial	Control
Dicromato de sodio	Inhibidor de corrosión	25-50 Ppm	20-25 Ppm como CrO_4
Sulfato de Zinc	Inhibidor de corrosión	10-12 Ppm	10 Ppm
H_2SO_4	control pH	6.5 - 7.0	6.5 - 7.0
Taninos	Prev. ensuc.	2-3 Ppm	1-2 Ppm.
Cloro	Biocida	1 Ppm	0.5 Ppm residual

TRATAMIENTO IV

Hexametáfosfato de sodio	Inhibidor de corrosión	30-40 Ppm	20-30 Ppm como PO_4
Sulfato de Zinc	Inhibidor de corrosión	5-10 Ppm	8 Ppm
H_2SO_4	control pH	6-6.5	6-6.5
Cloro	Biocida	1 Ppm	0.5-1 Ppm residual

De estos tratamientos, los tres primeros se pueden usar en sistemas de enfriamiento con capacidades mayores a 5 000 galones.

El sistema IV, se puede emplear en sistemas de baja capacidad cuya agua de repuesto no tenga una alta concentración de sales de calcio y magnesio,

pues se ha demostrado que cuando los polifosfatos se sostienen largo tiempo - en un sistema de gran capacidad, sufren una reversión a ortosfatos, precipitando el ortofosfato tricalcico.

Estos tratamientos bien aplicados, dan protecciones a nuestros --- equipos contra la corrosión del orden de 1-2. MPA, con mínimos depósitos de - incrustación.

Para tener la máxima economía tanto en reactivos como en agua de - repuesto es necesario operar nuestros sistemas a los máximos ciclos de concentración, los cuales estarán limitados por la máxima solubilidad del compuesto limitante:

Condiciones de operación:

Temperatura agua de enfriamiento	80° - 120°F
pH " "	
Compuesto limitante	máxima solubilidad
CaSO ₄	2000 Ppm
CaCO ₃	30 Ppm
Dureza total como CaCO ₃	460-380 Ppm
S ₁ O ₂	(con tratamiento de fosfatos)
	150-200 Ppm
	(con tratamiento de dispersan <u>tes</u>).

SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

La máxima cantidad permisible de sólidos totales disueltos, estará determinada por su valor correspondiente al del compuesto limitante, o bien, en ausencia de los compuestos limitantes anteriores.

La dosificación inicial de cualquiera de los tratamientos anteriores, comprende un período de 3 a 4 días con el objeto de que se forme la protección adecuada en los equipos de enfriamiento, ya que la supuesta película anticorrosiva, consume inicialmente para su terminación una dosis mayor de agente anticorrosivo de lo normal.

La dosificación normal o de control esta calculada para la máxima protección, tanto contra la corrosión general como para la corrosión localizada, sin embargo, para el caso de los cromatos o dicromatos, en cualquiera de los tratamientos anteriores, su dosificación puede reducirse a 8-12 Ppm, pues se ha demostrado que existe una verdadera interacción entre dicromato -zinc, pues a bajos valores de dicromatos basta con elevar la conc. de sulfato de zinc, para mejorar las características anticorrosivas del par dicromato -zinc mejorando en mucho la corrosión localizada.

Los tratamientos I y III son los mas efectivos asi como los más económicos, ya que pueden usarse en dosis normales de 8-12 Ppm como cromato y 10-15 Ppm como sulfato de Zinc.

Estos tratamientos exigen que se tenga un buen control del pH del-

pH del agua entre 6.5 y 7, de lo contrario a pH superior a 7.5 empezará la precipitación de cromato básico de Zinc, enturbiando el agua de enfriamiento y causando los problemas vistos anteriormente.

V.3) NATURALEZA DE LA CORROSION INCRUSTACION Y ENSUCIAMIENTO

Corrosión.- Podemos definir a la corrosión como la destrucción de un metal ya sea por la acción química directa o por la acción electrolytica del metal y el medio que lo rodea.

La corrosión en medio acuoso (que es la que nos importa en este caso), es explicada por la teoría electrolytica como una reacción de óxido-reducción o intercambio de electrones entre diferentes sistemas. Este intercambio obedece a la tendencia de los electrones a adquirir un estado de menor energía potencial o sea de mayor estabilidad. Esta tendencia la podemos expresar cuantitativamente haciendo uso de la ecuación de Nernst:

$$\text{En donde: } E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln (m)$$

E = Potencial entre el metal y la solución que contiene sus iones, en volts.

E_o = Potencial normal del metal en volts

R = Constante general de los gases

T = Temperatura absoluta °K

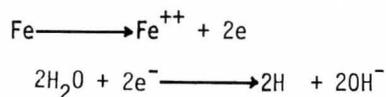
N = Valencia del ión del metal en solución

F = Constante de Faraday

M = Concentración iónica del metal.

Entre más bajo sea el valor de E, mayor será la tendencia del metal a ceder electrones, es decir a disolverse, desde luego que esta tendencia solo será posible cuando haya presente otro sistema (agua y sales en nuestro caso)- que esté en posibilidades de recibirlos por tener un potencial mayor.

En la corrosión en presencia de humedad el catión que recibe los electrones es el ión H⁺ el cual al descargarse forma hidrógeno atómico y posteriormente hidrógeno molecular, desprendiéndose en el cátodo en forma gaseosa.



El agua pura tiene una concentración de iones H⁺ igual a 1×10^{-7} y aplicando la ecuación de Nernst, encontramos que el potencial (a 25°C) es de -0.413, de aquí que solo se disolverán los metales con un potencial menor y si observamos la tabla electromotriz de los metales, vemos que a medida que aumenta el potencial del metal, más pronto se llega al equilibrio, y solo los metales alcalinos se disolverán totalmente.

Tipos de Corrosión. De acuerdo con la clasificación de champión, en términos generales podemos considerar dos tipos de corrosión: corrosión general y corrosión localizada o pitting.

1. La corrosión general es aquella que se presenta uniformemente en la superficie metálica expuesta al medio.

2. La corrosión por pitting o localizada es aquella que se presenta en pequeñas áreas localizadas, donde el ancho del ataque es igual o menor a la profundidad del ataque.

Hay otro tipo de corrosión llamada corrosión por grietas o hendiduras y ocasionada por celdas de concentración.

Sin embargo, debido a la dificultad de los investigadores en ponerse de acuerdo sobre la clasificación de la corrosión, la consideramos más como general o por pitting.

La corrosión por pitting, es la mas peligrosa, ya que puede llegar a perforar el equipo ocasionando fugas en el sistema.

Incrustación.- Podemos definir a la incrustación como un recubrimiento denso de materiales predominantemente inorgánicos (SiO_2 , Ca, Mg, $\text{CO}_3^{=}$, etc.) Sobre una superficie metálica, causada por una sobresaturación de sales inorgánicas solubles en el agua de enfriamiento. Así una incrustación -- "pura" estará constituida por mezclas de productos químicos unicamente.

Las superficies metálicas generalmente presentan rugosidad, y debido a las fuerzas electrostáticas y de cohesión tanto de las partículas de la superficie, metálica como de las impurezas incrustantes del agua, hacen que al

ponerse en contacto éstas con las pequeñas rugosidades se formen verdaderos - agregados intercrystalinos, difíciles de eliminar por medios mecánicos.

V.4) ANALISIS DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

Una vez conocido el control de nuestros sistemas de enfriamiento - se hace necesario saber si dicho control se esta llevando en forma eficiente, para ello necesitamos calcular lo siguiente:

1. Eficiencia del tratamiento
2. Eficiencia de los ciclos de concentración
3. Eficiencia del uso del agua
4. Eficiencia económica

1. La eficiencia del tratamiento la calcularemos en base a la can tidad óptima de tratamiento contra corrosión e incrustación recomendada por - el tratamiento seleccionado y la cantidad de tratamiento que realmente se es- ta empleando:

$$E_F - \text{trat.} = \frac{\text{p.p.m. óptimo trat.}}{\text{p.p.m empleados}} \times 100$$

2. La eficiencia de la concentración estará dada como la razón en tre las p.p.m. del compuesto limitante presente en el agua en circulación y - las p.p.m. máximas permisibles de dicho compuesto en el agua en circulación, - multiplicada por 100.

Esta eficiencia nos indicará cuanta agua estamos purgando y si podemos operar el sistema con mayores concentraciones. Esta eficiencia de la concentración es llamada eficiencia de la purga, pues mientras más se purge un sistema menor será la concentración del compuesto limitante en el agua en circulación.

3. La eficiencia del uso del agua, estará dada por el aprovechamiento de la misma y la podemos calcular con la siguiente ecuación.

$$E_{F. \text{ uso de agua}} = 100 - \frac{D}{M_o} \times 100$$

Donde:

$$M_o = E + W + Bm.$$

$$D = \left(1 - \frac{E_{F. \text{ Conc.}}}{100}\right)$$

M_o = Agua de repuesto en G.P.M.

E = Velocidad de evaporación en G.P.M.

W = Pérdidas por viento en G.P.M.

Bm = Purga teórica necesaria para mantener la concentración de S.T.D. en G.P.M.

D = Exceso de agua purgada en G.P.M.



De aquí podemos deducir si estamos empleando realmente bien el agua de repuesto o cuanto estamos drenando innecesariamente.

4. La eficiencia económica estará dada por el producto de la eficiencia del tratamiento por la eficiencia de la concentración o purga, dividi

do entre 100.

$$E_F. \text{ Económica} = \frac{\% E_F. \text{ trat.} \times \% E_F. \text{ Conc.}}{100}$$

Esta eficiencia solo será comparativa para tratamientos con igual costo o igual eficacia.

V.5) AHORROS POTENCIALES

Después de cierto tiempo de operación con un tratamiento X y calculadas las eficiencias de nuestro sistema, podemos operar bajo los siguientes métodos.

1. Continuar el tratamiento actual y reducir las purgas a su valor óptimo (si estan excedidas).
2. Continuar con las mismas purgas y reducir el tratamiento a su valor óptimo (en caso de que nos hayamos excedido en el tratamiento).
3. Operar a tratamiento óptimo y purga óptima.

Los ahorros potenciales estarán dados en pesos por día ó pesos por 1×10^7 BTU.

1. A óptima purga

$$T C = \frac{(T_c \times WE)}{100}$$

2. A óptimo tratamiento

$$SC = \frac{(sc \times TE)}{100}$$

3. A óptimo tratamiento y purga

$$(PH + A) - (PH + A) \frac{WE}{100} + SC - \frac{(SC \times EE)}{100}$$

donde:

C = costo total

PH = costo del ácido para control del PH

SC = costo de reactivos contra la corrosión e incrustación

A = costo de reactivos para control de microorganismos.

WE = eficiencia del uso del agua

TE = eficiencia del tratamiento

EE = eficiencia económica.

V.6) FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ENFRIAMIENTO DEL AGUA

El enfriamiento del agua depende de:

1. La temperatura con que llega el agua a la torre.
2. El área de contacto entre el aire y el agua, al aumentar el --

área aumenta también la cantidad de agua que se evapora, bajando más rápido a la temperatura del líquido.

3. El flujo de aire, ya que si no se renueva el aire dentro de la torre pronto llegará a un punto en el que no admita más agua en estado de gas.

4. La temperatura del aire también es un factor importante, ya que a mayor temperatura el aire admite más agua en forma de gas antes de llegar a la saturación.

5. La humedad del aire. Aún cuando no la veamos, en el aire existe agua en forma de gas; habremos notado después de una noche fría que los vidrios de las ventanas se cubren de pequeñas gotitas de agua, esto nos muestra la existencia de agua en el aire, y también nos muestra que el aire tiene un grado de saturación para la cantidad de agua que puede admitir como gas. A mayor temperatura el aire admite más agua, al disminuir la temperatura del aire, la humedad que excede a su nuevo punto de saturación es desalojada del gas en forma de líquido, como en el caso del agua que cubre los vidrios en las noches frías.

La humedad del aire también influye en las torres de enfriamiento debido a que si el aire tiene una cantidad de humedad cercana a su saturación poca agua podrá evaporarse en la torre de enfriamiento.

INSPECCION DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Durante la operación de las torres de enfriamiento se deberá revisar que los vertederos no estén tapados ni obstruidos, que la cubierta de distribución y las diversas parrillas se encuentren en su sitio y cumpliendo correctamente su función; las persianas deberán encontrarse en su lugar y el ventilador operando correctamente.

El ensuciamiento también obedece a las fuerzas electrostáticas de atracción y cohesión, sin embargo, la intensidad de éstas no es tan alta como en la incrustación, ya que no llega a formar agregados intercrystalinos y puede eliminarse fácilmente por medios mecánicos.

El ensuciamiento puede ser natural o artificial. El natural es causado por materiales que existen en el sistema de enfriamiento como resultado de factores externos al mismo, tales como: lodos, arcillas, sedimentos, etc.

El artificial es el causado por las características del sistema y obedece a variaciones indeseables en la operación del mismo. Materiales de este tipo son: productos de corrosión, arrastres del clasificador, crecimientos microbiológicos, etc.

V.7) FACTORES QUE AFECTAN LA CORROSION, INCRUSTACION Y ENSUCIAMIENTO.

Todos los factores que afectan a la corrosión, incrustación y ensuciamiento están concatenados unos con otros, pero para propósitos de ilustra-

ción haremos una división tentativa de los mismos.

1) Factores que afectan la corrosión. Los factores que afectan la corrosión son de muy diversa índole, pero para su estudio los dividiremos en dos tipos principalmente:

1a) Factores debidos a la característica mineral del agua.

Puesto que la corrosión en medio acuoso es un fenómeno netamente electroquímico, la concentración de sales disueltas en el agua desempeñan un papel primordial; desde luego que mientras mas conductor sea el medio acuoso, mayor será la corrosión metálica ya que de acuerdo con la ley de Faraday la cantidad de electricidad que fluye a través de una celda electrolítica es equivalente a la cantidad de corrosión metálica.

Los ácidos, bases o sales altamente ionizables disueltos en agua - de enfriamiento serán los factores determinantes de la corrosión.

Las sales disueltas en el agua actúan como electrolitos y en superficies metálicas con impurezas, formarán celdas locales, en donde las impurezas actúan como cátodo y el metal como ánodo sufriendo este último la disolución electrolítica.

1b) Factores que no dependen de la característica mineral del agua.

a) Metales disímiles.

b) Turbiedad y materia suspendida.

- c) Contaminantes de proceso.
- d) Contaminantes microbiológicos.

a) Es muy común el uso de metales disímiles en un sistema de enfriamiento, sin embargo, este uso conduce a serios problemas de corrosión ya que dan origen a las llamadas celdas galvánicas de corrosión y como se mencionó anteriormente, altas concentraciones de sólidos disueltos en el agua tornarán estas celdas en altamente activas.

Metales que normalmente son catódicos pueden también corroerse por el depósito de sales en su superficie formando celdas de concentración localizada.

b) La turbidez y materia en suspensión, se debe a la pobreza del agua de enfriamiento o a la mala operación de los clarificadores o ablandadores.

Al depositarse la materia en suspensión en la superficie metálica (generalmente en zonas de baja velocidad) entrapa determinados electrolitos dando como resultado celdas de corrosión.

c) Muchas veces ocurre que el agua se contamina con algunas corrientes propias del proceso ya sea por fugas en el equipo o fallas en la operación, amén de que estos contaminantes pueden ser de por sí corrosivos.

d) Los microorganismos en un sistema de enfriamiento generalmente son tomados del aire atmosférico empleado por los ventiladores.

Debido a la importancia de estos microorganismos haremos una clasificación puramente funcional:

Hongos:	Hohos
	Levaduras
Algas :	Verdes
	Azul-verdes
	Depositadoras de SiO_2
Bacterias:	Formadoras de babaza
	Sulfato reductoras
	Depositadoras de fierro
	sin problemas

Las condiciones de un sistema de enfriamiento, son tales que permiten el crecimiento y desarrollo de todos estos tipos de microorganismos, y es difícil encontrar un sólo tipo o especie dada.

Los hongos son microorganismos extremadamente grandes comparados con las bacterias.

Las algas, son capaces de generar sus propios alimentos, en tanto, los hongos y las bacterias no.

Podemos considerar que las bacterias sulfato - reductoras son los organismos que más contribuyen a la corrosión pues se caracterizan por su habilidad en emplear los compuestos de azufre para su proceso metabólico -

produciendo sulfuros.

La acción de las bacterias sulfato - reductoras, es semejante a la de un despolarizador en el proceso de corrosión, estas bacterias reducen los sulfatos a sulfuros y como toda ecuación química a la reducción corresponderá una oxidación, tanto los ácidos orgánicos como los hidrocarburos e hidrógeno-presentes en el sistema, actuarán como materiales oxidables.

2) Factores que afectan la incrustación.

Los principales factores que la afectan son entre otros:

- a) Velocidad
- b) Clima
- c) Agua de repuesto
- d) Aire
- e) Madera de las torres: ataque químico, ataque biológico.

a) La velocidad específicamente en los cambiadores de calor es un factor determinante para el ensuciamiento, ya que a bajas velocidades del flujo de agua el propio asentamiento natural de la materia suspendida ocasiona los depósitos.

b) Las variaciones del clima debido a los cambios de estación juegan un papel importante en el ensuciamiento, así por ejemplo la descomposición de los hongos tipo levadura u otros vegetales, en el otoño o invierno incrementan el contenido natural orgánico del agua.

c) Las variaciones en las características del agua de repuesto de bidas a fuentes externas tales como operaciones de limpieza, drenaje, contami nación, etc. Contribuyen grandemente a depositar estos materiales en el sistema de enfriamiento.

d) El aire atmosférico que circula en la torre de enfriamiento es factor importante en el ensuciamiento, ya que está constantemente renovándose y lavándose, depositando en el agua; tierra, fibras, microorganismos, gases, etc., que a la postre ocasionarán ensuciamientos en el equipo.

e) El deterioro de la madera de las torres es también un factor - considerable en el ensuciamiento, ya que está constantemente sujeta al ataque químico y biológico de los contaminantes del agua.

La madera de las torres, generalmente esta constituida por 50% de celulosa, 30% de lignina y 20% de extractos.

La madera es sometida a un tratamiento para preservarla del ataque químico y biológico, sin embargo, debido a los enormes volúmenes de agua que maneja una torre, con el transcurso del tiempo el agua va lavando los extractos que la protegen, tornándose así susceptible al ataque.

ATAQUE QUIMICO

La lignina que constituye a la madera es casi insoluble en el agua pero en presencia de agentes oxidantes (cloro, biocidos o oxidantes) o de al-

tas concentraciones de alcalinidad (CO_3^- , HCO_3^- NaOH) forma compuestos que -- son solubles en el agua, dando por resultado una deslignificación superficial de la madera dándole a la misma un aspecto blanquesino y fibroso.

El cloro empleado en concentraciones superiores a 0.75 ó 1 ppm es uno de los principales agentes para el ataque químico de la madera, ya que -- clora la lignina haciéndola soluble en el agua.

ATAQUE BIOLÓGICO

Los microorganismos como los hongos son los responsables del ataque biológico a la madera, ya que algunos emplean en su metabolismo celulosa o hemicelulosa secretando productos enzimáticos que ocasionan una posterior putrefacción de la madera y si estos productos de descomposición junto con -- las algas, son lavados por el agua, ocasionarán problemas serios de taponamiento y ensuciamiento en el sistema de enfriamiento.

Las maderas que han estado sujetas al ataque biológico generalmente muestran un aspecto negruzco con agrietamientos.

El efecto combinado del ataque químico y biológico a la madera es de funestas consecuencias para un sistema de enfriamiento, tanto desde el punto de vista del ensuciamiento y taponamiento del equipo, como de la madera de las propias torres ya que se han reportado casos de torres cuyas maderas normalmente deberían tener una duración promedio de 10 a 15 años, hayan sido cambiadas totalmente en menos de 5 años.

Problemas ocasionados por la presencia de corrosión, incrustación-ensuciamiento en un sistema de enfriamiento.

De acuerdo con lo visto anteriormente, saltan a la vista los problemas que ocasionan la presencia de la corrosión, incrustación y ensuciamiento, en cualquier sistema de enfriamiento, sin embargo, los mencionaremos para tenerlos presentes y darnos cuenta del papel que desempeñan estos sistemas en nuestras instalaciones industriales:

- a) Reducción del área de flujo.
- b) Reducción del área de intercambio de calor.
- c) Incrementan el uso del agua de enfriamiento.
- d) Incrementan los costos de bombeo.
- e) Fallas en el equipo.
- f) Paros no programados en el equipo.
- g) Reducen la vida del equipo.
- h) Evitan el funcionamiento de los inhibidores de corrosión.

Todos estos problemas llevan a la pérdida de tiempo y sobre todo de dinero.

V.8) CONTROL DE LA CORROSION, INCRUSTACION Y ENSUCIAMIENTO EN UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

En virtud de que es practicamente imposible encontrar una fuente -

natural de suministro de agua, que reúna las especificaciones generales mencionadas con anterioridad, para el agua de enfriamiento, se hace necesario el uso de sustancias químicas que minimicen dichos efectos nocivos en toda instalación industrial.

1) Control de la corrosión:

Como ya conocemos el mecanismo mediante el cual se lleva a cabo -- la corrosión, es fácil determinar las características que debe reunir un inhibidor de la misma, pues en síntesis debe ser un pasivador de la superficie metálica en contacto con el medio de enfriamiento.

Desde este punto de vista, podemos controlar la corrosión por:

- a) Polarización anódica
- b) Polarización catódica
- c) Polarización Combinada

a) Anteriormente vimos que la corrosión en medio acuoso, se lleva a cabo por disolución del metal en las áreas anódicas, es decir:



Los iones liberados por el metal en el ánodo son transferidos al cátodo por conducción metálica, siendo consumidos por los cationes presentes en la solución quedando así establecido un flujo de corriente en la celda, --

precisamente aquí es donde debe intervenir el inhibidor, retardando la reacción anódica, causando la llamada polarización anódica y deteniendo el flujo electrónico.

En general cuando se incrementa la polarización anódica, se disminuye la corrosión del metal, de tal suerte que un inhibidor anódico será tanto mas efectivo cuanto mayor sea su habilidad para inducir la polarización anódica a los más bajos valores de corriente.

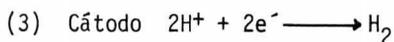
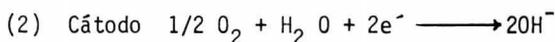
Si se emplean bajas concentraciones de inhibidores anódicos con el objeto de reducir los áreas anódicas en un sistema de reacciones, catódicas, se tendrá como resultado una concentración de la corrosión en dichas áreas, intensificándose el ataque localizado. De aquí que estos inhibidores anódicos deben emplearse en cantidades suficientes para asegurar protección completa y minimizar el ataque localizado, ya que se ha comprobado que los inhibidores de este tipo, en bajas concentraciones actúan como despolarizantes catódicas y en altas concentraciones actúan como polarizantes anódicos o sea en este caso como verdaderos pasivadores de la superficie metálica.

Entre las sustancias químicas más importantes como inhibidores anódicos tenemos a: Cromatos, fosfatos, ferrocianuros, carbonatos, silicatos de metales alcalinos.

b) Polarización catódica

Los sistemas de enfriamiento son altamente aereados, de aquí que -

la presencia de oxígeno sea inevitable, actuando este como un despolarizante -
llevando a cabo la reacción de reducción:



La reacción (2) se efectúa en el cátodo cuando el agua es neutra -
o alcalina, la reacción (3) se efectúa en el cátodo cuando el agua es ácida.

Los inhibidores de tipo catódico, serán los que tiendan a reducir-
o neutralizar las reacciones (2) y (3). De aquí que al no haber reacción ca-
tódica por efecto del inhibidor (polarizante), el potencial se desplazará ha-
cia el ánodo, dando por resultado que tanto el potencial anódico como el cató-
dico converjan a un valor muy bajo de corriente, minimizando la corrosión.

Las áreas catódicas no serán atacadas durante la corrosión ya que
el metal no intervendrá químicamente en las reacciones catódicas, teniendo --
por consecuencia que los inhibidores catódicos aún cuando se empleen en bajas
concentraciones no produzcan la corrosión localizada.

Entre los principales inhibidores catódicos tenemos: bicarbonatos,
sales de níquel o magnesio y cationes metálicos.

c) Polarización Combinada.

Este fenómeno consiste en la polarización simultánea de las áreas-

anódicas y catódicas en un sistema metálico, empleando inhibidores que tienen dicha función dual.

Se cree que los inhibidores de este tipo basan su acción anticorrosiva en la formación de una película de interfase entre el metal y el líquido, causando un decremento en la velocidad de difusión de las sustancias corrosivas hacia el metal, efecto debido a la alta velocidad de los inhibidores de polarización combinada.

Entre los principales inhibidores de este tipo tenemos: Gelatina, Cola, Dextrinas, Aceites solubles y otros compuestos orgánicos de alto peso molecular.

Sinergistas.

Cuando se emplea un agente químico puro para el control de corrosión, son necesarias dosis altas para que el tratamiento sea efectivo, así por ejemplo cuando se emplean únicamente cromatos, es necesario una dosis de 200- a 500 p.p.m. para tener una protección efectiva en el sistema, sin embargo -- cuando se usan combinaciones de agentes anticorrosivos con un sinergista, las dosis necesarias disminuyen notablemente.

Podemos definir a un sinergista como aquel agente químico capaz de mejorar las propiedades o eficiencias de otro agente químico.

Así por ejemplo cuando empleamos fosfatos para un tratamiento se -

usan dosis de 60 a 80 p.p.m., sin embargo cuando lo combinamos con 5 a 10 p.p.m. de ferrocianuro se requieren solamente de 30 a 40 p.p.m. de fosfatos, para obtener el mismo resultado.

Entre los sinergistas mas conocidos tenemos: los ferrocianuros, -- sales de zinc, molibdeno, cobalto, etc.

Se ha demostrado que algunos agentes sinergistas no tienen propiedades protectoras contra la corrosión cuando se usan solos.

2) Control de Incrustación.

Anteriormente se habló de la naturaleza de la incrustación en términos generales y de los factores que la afectan.

Para conocer cuantitativamente la tendencia incrustante o corrosiva de un agua, hacemos uso de los índices de Langelier o saturación y de Ryznar o de Estabilidad.

Ambos índices se basan en la estimación cuantitativa de las siguientes características del agua: temperatura, ph, sólidos disueltos, alcalinidad dureza al calcio, los cuales nos servirán para calcular el ph de saturación -- del agua, y efectuando los siguientes cálculos conoceremos los índices anteriores:

$$PH_s = (9.30 + A + B) - (C + D)$$

Indice de saturación o

$$\text{Langelier} = \text{PHr} - \text{PHs} = \text{Is}$$

Indice de Estabilidad o

$$\text{Ryznar} = 2 \text{PHr} - \text{PHs} = \text{Ie}$$

Donde:

PHs = PH de saturación del agua.

A, B, C, D = valores de correlación de: sólidos totales (A), temperatura (B), dureza al calcio (C) y alcalinidad (D), que contribuyen al PH de saturación del agua.

PHr = PH real del agua a las condiciones de la determinación.

Indice de Langelier (Is)

Si el agua da un valor de $\text{Is} = 0$ estará químicamente balanceada

Si el agua da un valor de $\text{Is} > 0$ tendrá tendencia incrustante

Si el agua da un valor de $\text{Is} < 0$ tendrá tendencia corrosiva

Indice de Ryznar (Ie)

Este índice es mucho más exacto para el control del agua de enfriamiento, debiéndose interpretar de la manera siguiente:

Si el agua da un índice de $I_e > 6$ tendrá tendencia incrustante

Si el agua da un índice de $I_e < 6$ tendrá tendencia corrosiva

El control de la incrustación en un agua de enfriamiento, estará basado precisamente en regular la cantidad de sólidos con tendencia incrustante presentes en el agua de enfriamiento.

Como es prácticamente incosteable eliminar estos compuestos por medios químicos, debido principalmente a las grandes cantidades de agua de enfriamiento que se usan en estos sistemas, existen otros métodos para su control, contándose entre ellos el empleo de agentes químicos de superficie que por su acción podríamos decir detergentes (como los polifosfatos), evitan que tales compuestos precipiten y se mantengan en solución hasta cierto límite, o bien el empleo de ácidos para transformar ciertos compuestos insolubles a otros más solubles.

El método de control más empleado para la incrustación es el método ácido ya que a la vez que nos permite ajustar el pH del agua al nivel de trabajo de los inhibidores de corrosión, nos transforma las sales de calcio y magnesio en compuestos más solubles permitiéndonos mayores concentraciones de estas sales en el agua, logrando con ello un mayor aprovechamiento de la misma ya que la hace más estable.

El ácido comúnmente empleado es el ácido sulfúrico, ya que es el más barato y sus sales de calcio y magnesio son mucho más solubles que los carbonatos respectivos.

De acuerdo con esto el índice de estabilidad del agua será una herramienta muy útil para su control.

3) Control Microbiológico

El control microbiológico consistirá en evitar el crecimiento y -- desarrollo de los microorganismos existentes en el agua de enfriamiento con - el objeto de abatir los costos de operación del sistema, mas no con el objeto de mantenerlo estéril ya que ello sería practicamente imposible además de cos toso y no necesario.

El medio más adecuado para este control lo constituyen las substancias químicas.

Se ha demostrado que en algunos sistemas de enfriamiento, donde - se han empleado cromato de sodio, sulfato de zinc o de cobre como inhibidores de corrosión, disminuye la incidencia de los hongos en la madera de los Torres, efecto debido a que estos agentes químicos se difunden en la madera de la torre combinándose con los arsénicos (existentes del pretratamiento a que es so metida la madera de las torres antes de su uso).

Constituyendo compuestos cristalinos letales a estos tipos de mi-- croorganismos.

El control de algas y bacterias se puede llevar a cabo con cloro o pentaclorofenatos, o bien sulfato de cobre si en el sistema no hay material - de aluminio en contacto con el agua de enfriamiento.

Cuando se use cloro se debe tener cuidado en su dosificación ya que remanentes mayores a 1 p.p.m. causan ataque a la madera.

VI) CALCULOS Y ASPECTOS SOBRE INGENIERIA

En este capítulo se analizarán varios métodos de cálculo con el objeto de determinar cual es el que más se apega a la realidad.

Se efectuarán los cálculos a partir de la información obtenida durante la práctica y se harán las siguientes estimaciones.

a) Se calcularán temperaturas promedio y se rediseñarán las torres con los diferentes métodos propuestos para comparar los diferentes métodos y seleccionar el más eficiente.

b) Una vez seleccionado este método se harán los rediseños a partir de las temperaturas máximas y mínimas, con el objeto de poder determinar la variación que existe en la operación de las mismas como consecuencia de cambios en las condiciones de operación.

La metodología de cálculo en todos los casos será la misma, la única variación existente reside en el cálculo del número de unidades de transferencia, debiéndose hacer notar que la variación del número de unidades de

transferencia repercutirá en el cálculo de la altura empacada de la torre; -- por lo que sólo se hará la comparación de los cálculos con respecto a las alturas.

Como hemos visto en capítulos anteriores, la altura de la torre (z) es igual al producto del número de unidades de transferencia por la altura de una unidad de transferencia. El número de unidades de transferencia se calcula a partir de las siguientes expresiones:

$$a) \quad (N.U.T.)_G = \int_{H_{yb}}^{H_{yd}} \frac{dH_y}{H_{yi} - H_y}$$

Que es usada para el cálculo del número de unidades de transferencia del gas, y de

$$b) \quad (N.U.T.)_L = \int_{T_b}^{T_d} \frac{dT}{H_{yi} - H_y}$$

Para el cálculo del número de unidades de transferencia del líquido.

Para el cálculo de la altura de la unidad de transferencia también disponemos como en el caso anterior, de dos ecuaciones dependiendo de si queremos calcularla para el gas ó para el líquido como se muestra a continuación:

$$c) \quad (A.U.T.)_G = \frac{G}{k_a A}$$

y

$$d) (A.U.T.)_L = \frac{L}{k_a} A$$

En la expresión para el número de unidades de transferencia se encuentra la entalpia en la interfase agua-aire, H_{yi} , que se supone que es igual a la entalpia del aire saturado a la temperatura del agua ($T_x = T_i$), y la entalpia del aire H_y .

La variación de la primera con la temperatura del agua viene dada por la línea de operación. Los valores de equilibrio (saturación) pueden tomarse de las cartas psicométricas puesto que se supone que la temperatura del agua representa la temperatura de bulbo húmedo con respecto a H_{yi} . A una determinada presión corresponde únicamente una línea de equilibrio.

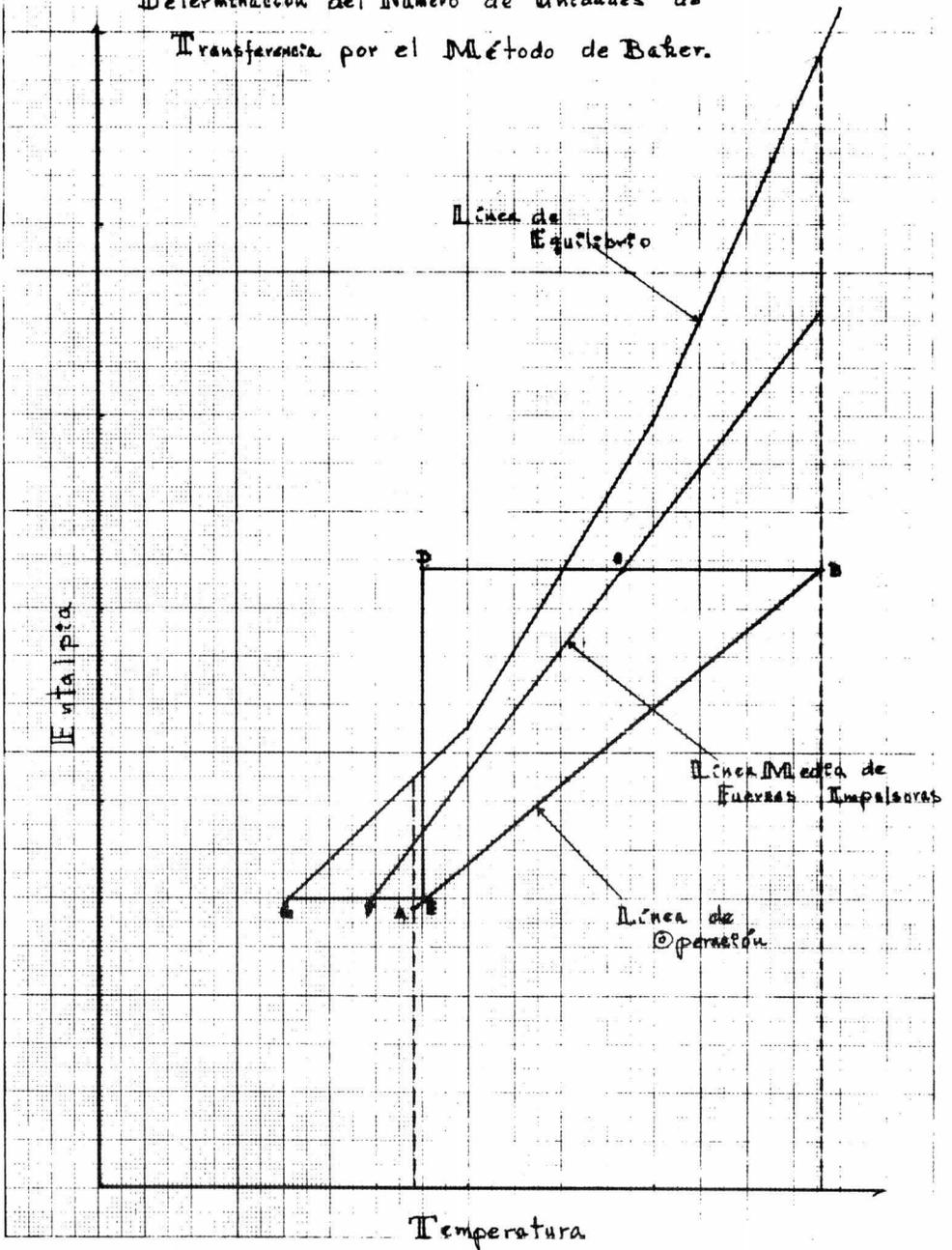
Como en absorción y en otros procesos de transferencia de materia en contracorriente, el número de unidades de transferencia puede determinarse de varias maneras. Para la evaluación del número de unidades de transferencia del gas (N.U.T.) G podemos emplear los métodos siguientes:

1) Método gráfico de Baker.

En este método se localizan los puntos medios de las fuerzas impulsoras, es decir, de los valores $H_{yi} - H_y$, uniendo dichos puntos mediante una línea (línea media).

Desde el punto de vista de operación de la parte superior, B, de coordenadas (H_{yd} vs. T_{xd}) se traza una paralela al eje de abscisas hasta la

Determinación del Número de Unidades de Transferencia por el Método de Baker.



línea media, punto C, y se prolonga de forma que BC=CD.

Desde el punto D se traza una perpendicular a BD hasta la línea de operación, punto E. El escalón BDE representa una unidad de transferencia del gas. Se repite el procedimiento empezando en E.

Se obtiene un valor fraccionario de una unidad de transferencia, -- igual a EF/EG.

2) Integración Gráfica.

Por definición

$$(N.U.T.)_G = \int_{Hyb}^{Hyd} \frac{dHy}{Hyi-Hy}$$

El valor de la integral puede determinarse graficamente representando $(Hyi - Hy)^{-1}$ frente a Hy y midiendo el área bajo la curva entre los límites Hyd y Hyb.

3) Integración Numérica.

Con tal que los incrementos ΔHy no sean demasiado grandes, la ecuación para el cálculo de $(N.U.T.)_G$ puede expresarse así:

$$(N.U.T.)_G = \sum_{Hyb}^{Hyd} \frac{\Delta Hy}{(Hyi-Hy) \text{ medio}}$$

es decir, como la suma de los valores finitos

$$\Delta H_y / H_{yi} - H_y.$$

La altura empacada de la torre puede determinarse también basando - los cálculos en el número de unidades de transferencia del líquido. En este caso no se puede utilizar el método gráfico de Baker, puesto que los incrementos y la fuerza impulsora no están expresados en función de la misma variable Sin embargo si se pueden aplicar los métodos de integración gráfica y numérica'

a) Integración Gráfica.

Por definición

$$(N.U.T.)_l = \int_{T_b}^{T_d} \frac{dT}{H_{yi} - H_y}$$

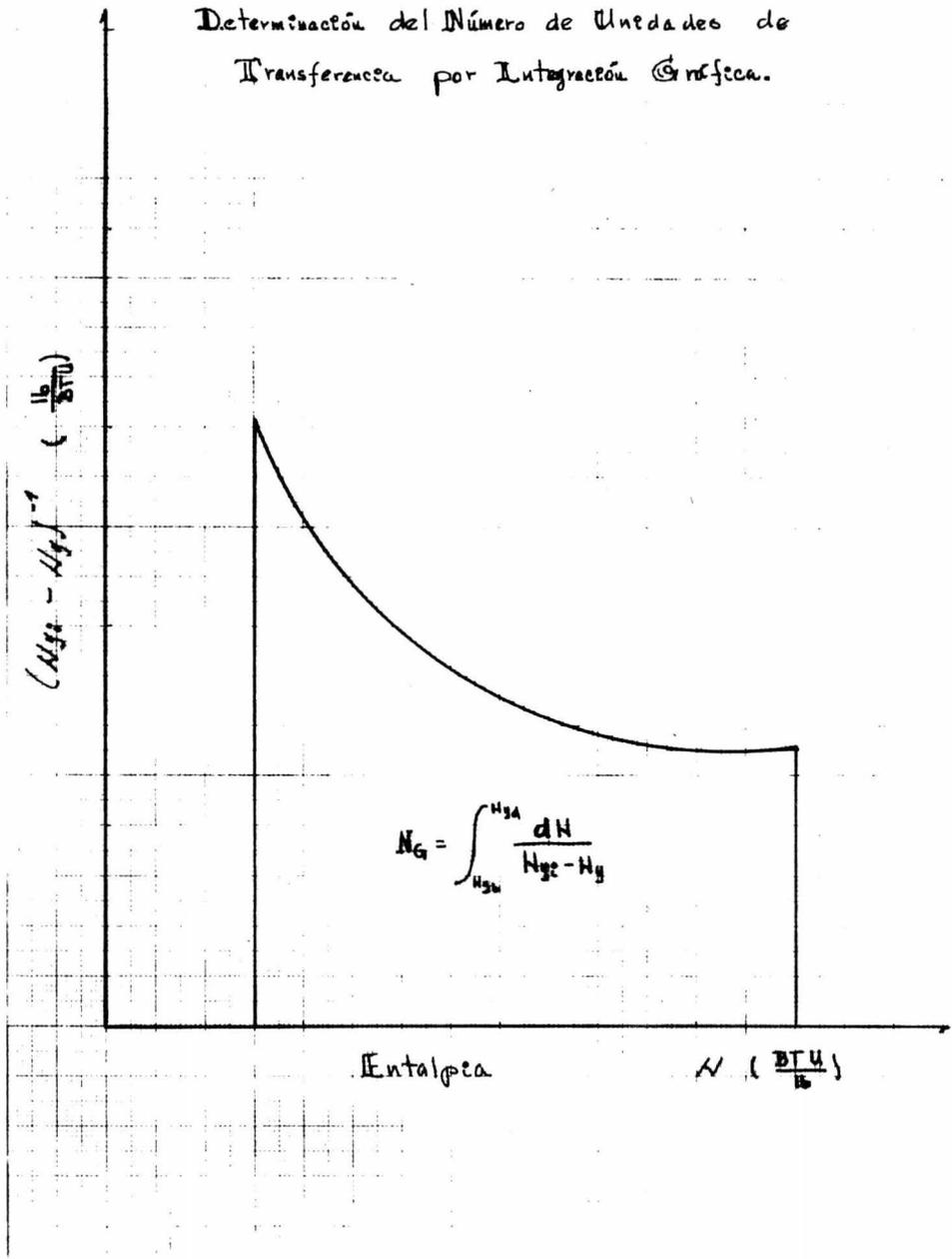
El valor de la integral puede obtenerse gráficamente representando $(H_{yi} - H_y)^{-1}$ frente a T y midiendo el área bajo la curva entre los límites T_b y T_d .

b) Integración Numérica.

Como antes:

$$(N.U.T.)_l = \sum_{T_b}^{T_d} \frac{\Delta T}{(H_{yi} - H_y)_{medio}}$$

Determinación del Número de Unidades de Transferencia por Integración Gráfica.



4) Uso de la Fuerza Impulsora Media Logarítmica

Puesto que la línea de equilibrio es convexa hacia la línea de operación, el uso de la fuerza impulsora media logarítmica, que se supone una línea de equilibrio recta en el intervalo de operación, daría un valor bajo para el mínimo de unidades de transferencia. Su aplicación está justificada sólo cuando el intervalo de enfriamiento no excede de 12°C, y no debe emplearse para operaciones fuera de este intervalo.

Las ecuaciones que se utilizan en este método son las siguientes:

$$(H_{yi}-H_y)_{m1} = \frac{(H_{yi} - H_y)_d - H_{yi} - H_y)_b}{/n (H_{yi}-H_y)_d / (H_{yi}-H_y)_b}$$

Ahora bien, para el número de unidades de transferencia del gas y del líquido tenemos:

$$(N.U.T.)_G = \frac{H_{yd} - H_{yb}}{(H_{yi} - H_y)_{m1}}$$

$$(N.U.T.)_L = \frac{(T_s - T_b)}{(H_{yi} - H_y)_{m1}}$$

M E T O D O D E C A L C U L O

1) Cálculo de la Carga Térmica.

$$Q = m \text{ cp } \Delta T \quad \text{donde:}$$

Q = Carga térmica en BTU/hr

m = Masa de agua en lb/hr

cp = Capacidad calorífica del agua en BTU/lb °F

ΔT = La diferencia de $T_{xd} - T_{xb}$ en °F

2) Cálculo del Número de Unidades de Transferencia

$$\int_{Hyb}^{Hyd} \frac{dHy}{Hy^* - Hy} = \text{N.U.T.}$$

nde: Hyd = es la entalpia del aire a la salida de la torre en $\frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$
 Hyb = es la entalpia del aire a la entrada de la torre $\frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$
 Hy^* = es la entalpia del aire entre los puntos T_{xd} y T_{xb} , en $\frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$.

3) Cálculo del (L/V) operación.

Siendo L/V la relación de los gastos agua/aire.

$$\frac{L}{V} = \frac{Hyd - Hyb}{T_{xd} - T_{xb}}$$

Para conocer el gasto de aire despejamos V de la ecuación anterior y obtenemos:

$$V = \frac{L (T_{xd} - T_{xb})}{Hyd - Hyb}$$

4) Cálculo de la masa velocidad del aire y del agua.

$$G_y = \frac{V}{A} \quad \text{donde:}$$

$$G_y = \text{masa velocidad del aire en } \frac{lb}{hrft^2}$$

$$V = \text{Gasto de aire en } \frac{lb}{hr}$$

$A =$ Sección transversal de la torre en ft^2

$$G_x = \frac{L}{A}$$

$$G_x = \text{Masa velocidad del agua en } \frac{lb}{hrft^2}$$

$$L = \text{gasto de agua en } \frac{lb}{hr}$$

5) Cálculo de la altura de la Unidad de Transferencia

$$AUT = \frac{G_y}{K_y a}$$

donde:

AUT = altura de la unidad de transferencia en ft

Kya = coeficiente de transferencia en $\frac{/b}{hr ft^3 \Delta y}$

6) Cálculo de la Altura de la Torre.

$$Z_T = NUT * AUT$$

donde: Z_T = es la altura total de la torre en ft.

7) Cálculo del Número de Celdas.

Puesto que las celdas son de módulos de (6x6) se busca una combinación de números que al multiplicarlos por los módulos de las celdas y este a su vez multiplicado por un cierto número de celdas nos dé la sección transversal de la torre.

8) Cálculo de la Potencia del Ventilador.

a) Caída de Presión en la Zona Empacada

$$\Delta P' = N' B G_a^2 \left(\frac{0.0675}{\rho G} \right) + N' C' b_F (L') G_E^2 \left(\frac{0.0675}{\rho G} \right)$$

donde:

$\Delta P'$ = caída de presión en la zona empacada.

N' = Número de pisos.

G_a = Es la masa velocidad del aire obtenida a partir de la nueva sección transversal de la torre.

- B = Constante que depende del tipo de piso.
- ρ_g = Densidad promedio del aire.
- C' = Constante que depende del tipo de piso
- S_F = Constante que depende del tipo de piso
- L' = Es la masa velocidad del agua obtenida a partir de la nueva-sección transversal de la torre.
- G_E = Masa velocidad de equilibrio para caída de presión entre aire y gotas de agua que descienden (/b/ hr ft²).

b) Caída de Presión en las Persianas.

$$V_F = \frac{V'}{\rho_G * A_p}$$

donde:

- V_F = Velocidad Frontal en ft/min.
- V' = Velocidad del aire seco en /b/hr.
- A_p = Area de la persiana en ft².

Una vez calculado el valor de la velocidad frontal en una gráfica - de V_F vs. ΔP en in H₂O obtenemos la caída de presión correspondiente.

c) Caída de Presión en los Eliminadores de Niebla.

Con el valor real de G_a que calculamos anteriormente, en una gráfica de G_a vs. ΔP en H₂O obtenemos la caída de presión en los eliminadores de niebla.

La caída de Presión Total estará dada por:

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta P_p + \Delta P_{e.n.} \quad \text{donde:}$$

ΔP_T = caída de presión total.

ΔP_e = caída de presión en el empaque.

ΔP_p = caída de presión en las persianas.

$\Delta P_{e.n.}$ = caída de presión en los eliminadores de niebla.

Para calcular los BHP totales aplicamos la siguiente ecuación:

$$\text{BHP} = \frac{V' * P_T}{(60) (\rho_{yd}) (6356)\eta} \quad \text{donde:}$$

BHP = Potencia al freno.

ρ_{yd} = Densidad del gas en el domo de la torre.

η = Eficiencia

Ahora bien para obtener los BHP por celda, bastará dividir los BHP totales entre el número de celdas de la torre:

$$\frac{\text{BHP totales}}{\text{No. de celdas}} = \frac{\text{BHP}}{\text{celda}}$$

VI. 2) Selección de la Torre de Enfriamiento.

Cuando se encara el problema del diseño de una torre de enfriamiento, se debe disponer de los siguientes datos:

- 1) Conocer la cantidad total de calor que debe disiparse en la torre, así como el gasto de agua a tratar.
- 2) La temperatura de entrada del agua a la torre.
- 3) La temperatura a la que debe salir el agua de la torre.
- 4) La variación de la temperatura de bulbo húmedo en las diferentes estaciones.
- 5) La variación de la temperatura de bulbo seco en las diferentes estaciones.
- 6) Dirección y velocidad del viento dominante.
- 7) Distribución de las temperaturas de bulbo húmedo durante los períodos en que no hay viento.
- 8) Distribución de las temperaturas de bulbo seco durante los períodos en que no hay viento.
- 9) Lugar donde va a ser instalada la torre.

Una vez conocidos los datos anteriores, es importante desarrollar un análisis económico; para esto las siguientes especificaciones deben estudiarse ya sea que se tenga una experiencia previa, por una investigación experimental ó del conocimiento de las condiciones particulares del sitio.

- 10) El costo del terreno.

- 11) El costo de energía eléctrica.
- 12) El costo de la construcción.
- 13) Factores de resistencia para varios materiales, de acuerdo al tipo de torre seleccionada.

Si todo esto es disponible, puede diseñarse y construirse una torre de enfriamiento que satisfaga las especificaciones más estrictas dentro de un cierto margen de tolerancia. Con un diseño adecuado se obtienen grandes ahorros.

Los requerimientos industriales individuales y las condiciones locales dan los factores necesarios que influyen en la selección de un tipo particular de torre de enfriamiento, así como del equipo requerido para llevar a cabo eficientemente el servicio a que está destinada.

La industria química, la del petróleo y otras industrias de proceso en general tienen una gran variedad de requerimientos, por lo que el equipo auxiliar que necesitan varía y por lo tanto es difícil generalizar.

Generalmente una torre de enfriamiento es seleccionada inicialmente por referencia de curvas establecidas que nos muestran su comportamiento, estas curvas son preparadas por diversos fabricantes para su uso particular y las cuales trazan para todos los tipos de torres y empaques. Usualmente estos diagramas consisten en cartas que muestran el acercamiento y la temperatura de bulbo húmedo para diferentes condiciones atmosféricas y varios rangos, así como características del funcionamiento de la torre como son el $Ka V/L$ y

el factor de enfriamiento L/G usados como ordenados.

Estas curvas permiten hacer una estimación razonable para la velocidad del aire que debe ser usado.

R E P O R T E D E D A T O S

A continuación mostramos una serie de tablas que contienen las diferentes temperaturas que fueron tomadas durante un lapso de dos meses en las torres de enfriamiento de el Complejo Petroquímico de Cosoleacoque en Veracruz, la Refinería de Ciudad Madero en Tamaulipas y la Refinería 18 de Marzo en el Distrito Federal.

Mediante estos datos se analizó el comportamiento de las torres y se constataron las diferencias de temperaturas de bulbo seco y húmedo que se registraron en estos lugares en diferentes condiciones climatológicas y a diferentes altitudes. Además con el uso de estas temperaturas se efectuarán -- los rediseños de las torres estudiadas, así como también los cálculos de sus respectivas eficiencias.

TORRE DE ENFRIAMIENTO No. 4.
DE LA REFINERIA 18 DE MARZO EN EL DISTRITO FEDERAL
TEMPERATURAS EN °C

	txd	txb	Tbhe	Tybe	Tbhs	Tybs
1	27	20	14.7	19.5	23.3	23.3
2	26	19.5	14.5	19	23.2	23.5
3	27	21	15.8	20.5	23	23
4	27	19.5	14	17.8	22.5	22.8
5	24	18.8	14.3	18.8	19	19.5
6	28	20.5	14	18.8	23	23
7	27	19.3	13.5	19.3	21.5	21.5
8	26	20	15.8	24	20	20.5
9	28	20	15	19	23	23.3
10	28	19.4	14.5	20.5	22.5	22.5
11	28	20	15	19.8	23.3	23.3
12	27	20.5	14.5	24	22.5	23
13	27	21	15.2	21	23.3	23.8
14	27	20	15	24.5	22	22.3
15	28	20.5	14.5	19	23	23
16	28	20	15	19.5	23	23.3
17	27	20	14.5	24	23	23
18	28	20	15	19	23.3	23.3
19	26	19.5	14	19	23	23.5
20	27	19.5	14.5	17.5	22.5	23
21	26	20	15.5	23	20	20.5
22	28	20	14	19	23	23
23	27.5	20.5	14.5	23	23	23
24	24	19	14	18.8	19	19.5
25	28	20	14.5	19	23	23.5
26	27	21	15	21	23	23.5
27	26	20	15	24	20	20.5
28	27	19	13.5	19.5	21.5	21.5
29	28	19	15	20.5	22.5	22.5
30	28	20	15.5	19.5	23	23.3

TORRE DE ENFRIAMIENTO No. 2.
 DEL COMPLEJO PETROQUIMICO DE COSOLEACOQUE VER.
 TEMPERATURAS EN °C

	txd	txb	Tbhe	Tybe	Tbhs	Tybs
1	42	31	20	22.6	23.5	24
2	43	33	23	32.2	28.6	36
3	41.7	32	17	19	22	23.7
4	41.5	34.6	18.8	22	22.6	25.3
5	41	30.5	18	22	27	29
6	44.3	35	19.8	24	27.3	30
7	43	33	19.8	22.8	26.5	30.5
8	45	35	21.3	28.5	28.8	33
9	43	35	21	24.5	28	32
10	45	35	23.5	28.3	30	33.5
11	43	33	22	24.5	28.3	32.5
12	45	36	24	28.5	31.8	33
13	44.5	35	24	26.5	29	34
14	45.5	36	24	26.5	32	34
15	45	37.5	26	30.5	32.5	35
16	41.5	34.6	18.8	19	22	24
17	43	33	10	23	26.5	30.5
18	45	35	24	28.3	30	32
19	43	35	21	24.5	28	32
20	41	30.5	18	22	27	29
21	43	33	22	25	28	32
22	43	33	23	24.5	28.5	32
23	44.3	35	20	24	27	29
24	41.7	32	17	19	22	23.7
25	41	30.5	18	22	27	29
26	43	33	19.8	24	27.3	30
27	44.3	34.5	19	24	28	30
28	44.5	35	24	26.5	32	33
29	43	33	20.5	23	26	31
30	45	35	24	28	30	32

TORRE DE ENFRIAMIENTO "MP"
 DE LA REFINERIA "MADERO" TAMPS.
 TEMPERATURAS EN °C

	Txd	Txb	Tbhe	Tybe	Tbhs	Tybss
1	37	25.1	21	25.2	33.2	33.9
2	38	25.0	20.3	21.0	33.5	33.94
3	38	25.0	21	22.0	33.3	33.7
4	36.5	25.0	21.6	23.3	33.0	33.9
5	36.1	26.1	21.2	22.0	33.0	33.8
6	37.5	27.5	22	26.0	32.8	33.7
7	37.5	27.5	21.9	25.2	32.7	33.7
8	35.9	26.1	22.4	24.4	32.7	33.5
9	35.9	26.1	22.1	23.0	32.5	33.1
10	37.0	26.6	22.7	26.6	32.6	33.5
11	36.0	26.5	22.2	24.0	32.7	33.6
12	36.0	26.5	22.0	23.5	32.9	33.8
13	37.0	26.9	23	26.5	33.0	33.9
14	37.0	26.9	24	28.0	32.8	33.6
15	35.5	26.2	19	21.2	32.4	33.2
16	35.5	26.2	17	19.0	31.9	32.8
17	37.1	27.5	19.5	24.0	31.9	32.7
18	37.1	27.5	17.7	22.7	32.0	32.8
19	37.1	27.2	22.0	23.0	32.3	33.2
20	37.1	27.2	21.0	22.0	32.5	33.4
21	39.0	28.5	23.3	27.7	32.8	33.7
22	39.0	28.5	24.4	27.7	38.8	33.6
23	38.7	28.5	23.0	27.7	32.3	33.2
24	38.7	28.5	22.8	26.8	32.0	32.0
25	39.0	28.6	22.5	26.3	31.9	32.8
26	39.0	28.6	22.2	26.0	31.7	32.4
27	38.6	27.8	22	23.0	31.5	32.4
28	36.0	27.8	21.7	23.3	31.3	32.3
29	36.0	27.5	22.2	21.0	31.6	32.5
30	36.5	27.8	19.8	22.0	31.2	32.1
31	36.1	27.0	18.0	23.3	31.0	32.0

VI. 3) Rediseños de las Torres Analizadas.

Rediseño de la Torre de Enfriamiento

Ubicada en la Refinería de Ciudad Madero.

Los datos promedio obtenidos durante dos meses de estudio a esta torre son:

$$\begin{array}{ll} \text{Kya} = 183.96 \frac{\text{/b}}{\text{hrft}^3} \text{ Ay} & \text{Txd} = 98.54^\circ\text{F} \\ \text{Tbhs} = 92^\circ\text{F} & \text{Txb} = 80.20^\circ\text{F} \\ \text{Tybs} = 93^\circ\text{F} & \text{Tbhe} = 70.56^\circ\text{F} \\ \text{N} = 3,000,000 \text{ gal/hr} & \text{Tybe} = 75.20^\circ\text{F} \\ \text{A} = 10,623.65 \text{ ft}^2 & \end{array}$$

1) Cálculo de la Carga Térmica.

$$\begin{aligned} m &= 3,000,000 \frac{\text{gal}}{\text{hr}} * \frac{3.785 \text{ lt}}{\text{gal}} * \frac{\text{ft}^3}{28.321} * \frac{62.00/\text{b}}{\text{ft}^3} = \\ m &= 24,905,620.76 \text{ /b/hr} \end{aligned}$$

Considerando el cp del agua aproximadamente igual a la unidad obtenemos:

$$Q = m \text{ cp } \Delta T = 24,905,620.76 \frac{\text{/b}}{\text{hr}} * 1 \frac{\text{BTU}}{\text{/b}^\circ\text{F}} * (98.54 - 80.20)^\circ\text{F}$$

$$Q = 4.5676 * 10^8 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

2) Cálculo del Número de Unidades de Transferencia.

De acuerdo a la siguiente ecuación tenemos:

$$\int_{Hyb}^{Hyd} \frac{dHy}{Hy^* - Hy} = N. U. T.$$

Si resolvemos la ecuación anterior por medio de una integración gráfica obtenemos lo siguiente:

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})$ prom.	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})$ prom.
80.20	36	26.5	0.1053	—	—	—
84.79	41	32.51	0.1178	0.1116	6.01	0.6703
89.38	46	38.52	0.1337	0.0258	6.01	0.7561
93.97	53	44.53	0.1181	0.1259	6.01	0.7567
98.54	60	50.53	0.1056	0.1119	6.01	0.6725
						<u>2.8556</u>

$$N. U. T. = \sum \Delta Hy \left(\frac{1}{Hy^* - Hy} \right)_{prom.} = 2.8556$$

3) Cálculo de la relación $\frac{agua}{aire}$ de operación:

$$\frac{L}{v} = \frac{Hyd - Hyb}{Txd - Txb} \quad \text{despejando } v = \frac{L (Txd - Txb)}{Hyd - Hyb}$$

$$V = \frac{24 \cdot 905620.76 \frac{/b}{Hr} (98.54^{\circ}F - 80.20^{\circ}F)}{(50.5 \frac{BT^{\mu}}{lb} - 27 \frac{BT^{\mu}}{lb})}$$

$$V = 19,436,982.33 \frac{/b}{hr}$$

Por lo tanto como conocemos el valor de L y V obtenemos:

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{op.} = 1.28$$

4) Cálculo de la Masa Velocidad del Aire y del Agua.

$$G_y = \frac{V}{A} = \frac{19,436,982.33 \frac{/b}{hr}}{10,623.65 \text{ ft}^2} = 1829.60 \frac{/b}{hr \text{ ft}^2}$$

$$G_x = \frac{L}{A} = \frac{24,905,620.76 \frac{/b}{hr}}{10,623.65 \text{ ft}^2} = 2344.36 \frac{/b}{hr \text{ ft}^2}$$

5) Cálculo de la Altura de la Unidad de Transferencia.

$$A.U.T. = \frac{G_y}{K_y a} = \frac{1829.60 \frac{/b}{hr \text{ ft}^2}}{183.96 \frac{/b}{hr \text{ ft}^3 \Delta y}} = 9.95$$

6) Cálculo de la Altura Total de la Torre.

$$Z_T = NUT * AUT$$

$$Z_T = 2.8556 * 9.95 = 28.41 \text{ ft}$$

$$Z_T = 28.41 \text{ ft}$$

7) Cálculo del Número de Celdas.

Si utilizamos módulos de (6x6) ft tenemos lo siguiente:

$$(6 \times 6) (6 \times 6) = 1080 \text{ ft}^2$$

$$10 * 1080 = 10,800 \text{ ft}^2$$

Por lo tanto:

$$\text{Ancho de la torre} = 60 \text{ ft}$$

$$\text{Largo de la torre} = 180 \text{ ft}$$

a) Recálculo de (Gx) y (Gy).

$$G_x = L' = \frac{24,905,620.76 \frac{/b}{hr}}{10,800 \text{ ft}^2} = 2,306.08 \frac{/b}{hr \text{ ft}^2}$$

$$G_y = G_a = \frac{19,436,982.33 \frac{/b}{hr}}{10,800 \text{ ft}^2} = 1799.72 \frac{/b}{hr \text{ ft}^2}$$

8) Cálculo de la Potencia del Ventilador.

a) Caída de presión en la zona empacada.

$$\Delta P' = N' B G_a^2 \left(\frac{0.0675}{v_G} \right) + N' C' b_F (L') G_E \left(\frac{0.0675}{v_G} \right)$$

Considerando que la torre tiene el piso tipo D tenemos:

$$s_F = 6.0$$

$$B = 0.40 * 10^{-8}$$

$$C' = 0.11 * 10^{-12}$$

Puesto que necesitamos conocer el valor de la densidad del gas, calculamos un volumen húmedo promedio y le sacamos el inverso como se muestra a continuación:

$$V_H = 0.730 \frac{T_{yb}}{P} (0.0345 + 0.0556 Y') \text{ donde}$$

$$V_H = \text{Volumen húmedo en ft}^3/\text{lb}$$

$$T_{yb} = \text{Temperatura de bulbo seco en } ^\circ\text{R}$$

$$P = \text{Presión atmosférica en atm.}$$

$$Y' = \text{Humedad Absoluta en } \frac{\text{/b H}_2\text{O}}{\text{/b a.s.}}$$

$$V_{Hb} = (0.730) \frac{535.2^\circ\text{R}}{1 \text{ atm}} (0.0345 + 0.0556 (0.015))$$

$$V_{Hb} = 13.80 \frac{\text{ft}^3}{\text{/b}} \quad \text{lb} = 0.0724 \frac{\text{/b}}{\text{ft}^3}$$

$$V_{Hd} = (0.730) \frac{552^\circ\text{R}}{1 \text{ atm}} (0.0345 + 0.0556 (0.032))$$

$$V_{Hd} = 14.61 \frac{ft^3}{/b} \quad \epsilon_d = 0.0684 \frac{/b}{ft^3}$$

Por lo que la densidad promedio del gas será:

$$\epsilon_G = 0.0701 \frac{/b}{ft^3}$$

$$\Delta P' = (10) (0.40 * 10^8) (1799.72) \left(\frac{0.0675}{0.0704} \right) + 10 (0.14 * 10^{12})$$

$$\sqrt{6} (2306.08) (5100)^2 \left(\frac{0.0675}{0.0704} \right)$$

$$\Delta P' = 0.1190 + 0.1972$$

$$\Delta P' = 0.3162 \text{ in } H_2O$$

b) Caída de presión en las persianas

$$V_F = \frac{V'}{\epsilon_G * A_P}$$

$$A_P = \left(\frac{36 \text{ ft}}{\text{celda}} \right) (10 \text{ celdas}) \left(\frac{2 \text{ lados}}{\text{celda}} \right) (6 \text{ ft})$$

$$A_P = 4320 \text{ ft}^2$$

$$V_F = \frac{19,436,982.33 \frac{/ba.s.}{hr}}{\left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \right) \left(0.0724 \frac{/b}{ft} \right) (4320 \text{ ft}^2)} = 1035.75 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

La ΔP en las persianas la obtenemos de la gráfica de V_F vs. ΔP y obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{0.32 - 0.02}{0.32 - \Delta P_p} = \frac{1600 - 400}{1600 - 1035.75}$$

$$\Delta P_p = 0.1784 \text{ in H}_2\text{O}$$

c) Caída de Presión en los eliminadores de Niebla.

De la gráfica de G_a vs. ΔP en in de H_2O obtenemos:

$$\frac{2000 - 800}{2000 - 1799.72} = \frac{0.07 - 0.01}{0.07 - \Delta P_{e.n.}}$$

$$\Delta P_{e.n.} = 0.0600 \text{ in H}_2\text{O}$$

La caída de presión total será:

$$\Delta P_T = 0.3162 + 0.1784 + 0.0600$$

$$\Delta P_T = 0.5546 \text{ in H}_2\text{O}$$

$$BHP = \frac{V' * P_T}{(60) (\text{gpd}) (6356) (\eta)}$$

$$\text{BHP} = \frac{19,436,982.33 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} * 0.5546 \text{ in H}_2\text{O}}{(60) (0.0724) (6356) (0.5)}$$

$$\text{BHP} = 780.85$$

Por lo tanto para cada celda tenemos:

$$\frac{\text{BHP}}{\text{celda}} = \frac{780.85}{10}$$

$$\frac{\text{BHP}}{\text{celda}} = 78.08$$

Rediseño de la Torre de Enfriamiento de la planta de amoníaco ubicada en el Complejo Petroquímico de Cosoleacaque en el estado de Veracruz.

Los datos promedio obtenidos durante dos meses de estudio a esta torre son:

$$\begin{aligned}
 K_{ya} &= 19.37 \frac{\text{/b}}{\text{hr ft}^3 \text{Ay}} \\
 T_{xd} &= 109.09^\circ\text{F} & T_{bh_s} &= 82.14^\circ\text{F} \\
 T_{xb} &= 93.40^\circ\text{F} & T_{yb_s} &= 87.02^\circ\text{F} \\
 T_{bhe} &= 70.66^\circ\text{F} & W &= 2,860,000 \text{ gal/hr} \\
 T_{ybe} &= 77.88^\circ\text{F} & A &= 12,127 \text{ ft}^2
 \end{aligned}$$

1) Cálculo de la Carga Térmica.

$$\begin{aligned}
 m &= 2,860,000 \frac{\text{gal}}{\text{hr}} * \frac{3.785 \text{ l}}{\text{gal}} * \frac{\text{ft}^3}{28.32 \text{ l}} * \frac{61.99 \text{ /b}}{\text{ft}^3} \\
 m &= 23695195.84 \frac{\text{/b}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

Considerando el Cp del agua aproximadamente igual a la unidad obtenemos:

$$\begin{aligned}
 Q &= m c_p \Delta t = 23695195.84 \frac{\text{/b}}{\text{hr}} * 1 \frac{\text{BTU}}{\text{/b } ^\circ\text{F}} * (109.09 - 93.40) ^\circ\text{F} \\
 Q &= 3.7177 * 10^8 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

2) Cálculo del número de unidades de transferencia.

$$\int_{Hyb}^{Hyd} \frac{dHy}{Hy^* - Hy} = N. U. T.$$

Si resolvemos la ecuación anterior por medio de una integración obtenemos lo siguiente:

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$
93.40	51	27.0	0.04167	—	—	—
97.32	58	29.75	0.0354	0.03853	2.75	0.10595
101.24	65	32.5	0.03077	0.03308	2.75	0.09097
105.16	72.2	35.25	0.02685	0.02881	2.75	0.07922
109.09	81	38.0	0.02326	0.02502	2.75	0.06888

$$N.U.T. = \sum \Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.} = 0.3450$$

3) Cálculo de la relación agua/aire de operación:

$$\frac{L}{V} = \frac{Hyd - Hyb}{Txd - Txb} \quad \text{despejando} \quad V = \frac{L (Txd - Txb)}{Hyd - Hyb}$$

$$V = \frac{23,695,195.84 \frac{/b}{hr} (109.09^\circ F - 93.40^\circ F)}{(38 \frac{BTU}{/b} - 27 \frac{BTU}{/b})}$$

$$V = 26,555,000 \frac{/b}{hr}$$

Por lo tanto como conocemos el valor de L y V obtenemos:

$$\left(\frac{L}{V} \right)_{op.} = 0.892$$

4) Cálculo de la masa velocidad del aire y del agua.

$$G_y = \frac{V}{A} = \frac{26,555,000 /b/hr}{12,127 ft^2} = 2189.74 \frac{/b}{hr ft^2}$$

$$G_x = \frac{L}{A} = \frac{23,695,195.84 /b/hr}{12,127 ft^2} = 1953.92 \frac{/b}{hr ft^2}$$

5) Cálculo de la Altura de la Unidad de Transferencia.

$$A.U.T. = \frac{G_y}{K_{ya}} = \frac{2189.74 \frac{/b}{hr ft^2}}{19.37 \frac{/b}{hr ft^3 Ay}} = 113.04$$

6) Cálculo de la Altura de la Torre.

$$Z_T = NUT * AUT$$

$$Z_T = 0.3450 * 113.04 = 38.99 ft$$

Por lo tanto: $Z_T = 39 \text{ ft}$

7) Cálculo del Número de Celdas.

Si utilizamos módulos de (6x6) ft tenemos lo siguiente:

$$(6 \times 6) (6 \times 6) = 1296 \text{ ft}^2$$

$$10 * 1296 = 12,960 \text{ ft}^2$$

Por lo tanto:

ancho de la torre = 72 ft

largo de la torre = 180 ft

a) Recálculo de (Gx) y (Gy)

$$G_x = L' = \frac{23,695,195.84 \frac{/b}{hr}}{12,960 \text{ ft}^2} = 1828.33 \frac{/b}{hr \text{ ft}^2}$$

$$G_y = G_a = \frac{26,555,000 \frac{/b}{hr}}{12,960 \text{ ft}^2} = 2049 \frac{/b}{hr \text{ ft}^2}$$

8) Cálculo de la Potencia del Ventilador.

a) Caída de presión en la zona empacada

$$\Delta P' = N' B G_a^2 \left(\frac{0.0675}{\rho G} \right) + N'e' b_F (L') G_E^2 \left(\frac{0.0675}{\rho G} \right)$$

Considerando que la torre tiene el piso tipo A obtenemos:

$$sf = 3.0$$

$$B = 0.34 * 10^8$$

$$C' = 0.11 * 10^{12}$$

Puesto que necesitamos conocer el valor de la densidad del gas, calcularemos un volumen húmedo promedio y le sacaremos el inverso como se muestra a continuación:

$$VH = 0.730 \frac{T_{yb}}{P} (0.0345 + 0.0556 Y') \quad \text{donde:}$$

VH = Volumen húmedo en ft^3/lb

T_{yb} = Temperatura de bulbo seco en $^{\circ}R$

P = Presión atmosférica en atm.

Y' = Humedad absoluta en $\frac{lb H_2O}{lb a.s.}$

$$VHb = (0.730) \frac{537.88 \text{ }^{\circ}R}{1 \text{ atm.}} [0.0345 + 0.0556 (0.0168)]$$

$$VHb = 13.91 \frac{ft^3}{lb} \quad \text{por lo tanto} \quad \rho_b = 0.07187 \frac{lb}{ft^3}$$

$$VHd = (0.730) \frac{547.02 \text{ }^{\circ}R}{1 \text{ atm}} [0.0345 + 0.0556 (0.027)]$$

$$VHb = 14.37 \frac{ft^3}{lb} \quad \text{por lo tanto} \quad \rho_d = 0.06956 \frac{lb}{ft^3}$$

Por lo que la densidad del gas será:

$$\rho_G = 0.0707 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$\Delta P' = 11 (0.34 \cdot 10^8) (2049)^2 \left(\frac{0.0675}{0.07072} \right) + 11 (0.11 \cdot 10^{12}) \sqrt{3} (1828.38)$$

$$(4050)^2 \left(\frac{0.0675}{0.07072} \right)$$

$$\Delta P' = 0.14987 + 0.05998$$

$$\Delta P' = 0.20985 \text{ in H}_2\text{O}$$

b) Caída de presión en las persianas;

$$V_F = \frac{V'}{G \cdot A_p}$$

$$A_p = \left(36 \frac{\text{ft}}{\text{celda}} \right) (10 \text{ celdas}) \left(\frac{2 \text{ lados}}{\text{celda}} \right) (6 \text{ ft})$$

$$A_p = 4320 \text{ ft}^2$$

$$V' = G_a \cdot = 2049 \frac{\text{lb}}{\text{hr ft}} \cdot 12,960 \text{ ft} = 26,555.040 \frac{\text{lb a.s.}}{\text{hr}}$$

$$V_F = \frac{26,555,040 \frac{\text{lb a.s.}}{\text{hr}}}{\left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \right) \left(0.07187 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) (4320 \text{ ft}^2)} = 1425.49 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

Por medio de la gráfica de V_F vs. ΔP obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{0.32 - 0.02}{0.32 - \Delta P_p} = \frac{1600 - 400}{1600 - 1425.49}$$

$$\Delta P_p = 0.2764 \text{ in de H}_2\text{O}$$

c) Caída de presión en los eliminadores de niebla.

De la gráfica de G_a vs. ΔP en in de H_2O obtenemos la relación:

$$\frac{2000 - 800}{2000 - 2049} = \frac{0.07 - 0.01}{0.07 - \Delta P_{e.n.}}$$

$$\Delta P_{e.n.} = 0.0725 \text{ in de H}_2\text{O}$$

La caída de presión total será:

$$\Delta P_T = 0.20985 + 0.2764 + 0.0725$$

$$\Delta P_T = 0.55875 \text{ in de H}_2\text{O}$$

$$BHP = \frac{V' * P_T}{(60) (1 \text{ yd}) (6356) \eta}$$

$$\text{BHP} = \frac{26,555,040 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} * 0.55875 \text{ in H}_2\text{O}}{(60) (0.07187) (6356) (0.5)}$$

$$\text{BHP} = 1082.71$$

Por lo tanto para cada celda tenemos:

$$\frac{\text{BHP}}{\text{celda}} = \frac{1082.71}{10}$$

$$\frac{\text{BHP}}{\text{celda}} = 108.27$$

Rediseño de la Torre de Enfriamiento de la Refinería 18 de Marzo en México, D.F.

Los datos promedio obtenidos durante dos meses de estudio a esta -- torre son:

$$\begin{aligned}
 Kya &= 108.50 \frac{/b}{hr \text{ ft}^3 \text{ Ay}} \\
 Txd &= 80.60^\circ\text{F} & Tbhs &= 72.17^\circ\text{F} \\
 Txb &= 68.7^\circ\text{F} & Tybs &= 72.7^\circ\text{F} \\
 Tbhe &= 58.8^\circ\text{F} & W &= 1,500,000 \text{ gal/hr} \\
 Tybe &= 69.9^\circ\text{F} & A &= 5,368.25 \text{ ft}^2
 \end{aligned}$$

1) Cálculo de la Carga Térmica.

$$m = 1,500,000 \frac{\text{gal}}{\text{hr}} * \frac{3.785 \text{ l}}{\text{gal.}} * \frac{\text{ft}^3}{28.32 \text{ l}} * \frac{69.30/\text{b}}{\text{ft}^3}$$

$$m = 12,490,700.40 \frac{/b}{hr}$$

Considerando el Cp del agua aproximadamente igual a la unidad obtenemos:

$$Q = m \text{ cp AT} = 12,490,700.40 \frac{/b}{hr} * 1 \frac{\text{BTU}}{/b^\circ\text{F}} * (80.60^\circ\text{F} - 68.7^\circ\text{F})$$

$$Q = 1.4863 * 10^8 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

2) Cálculo del número de unidades de transferencia.

De acuerdo con la siguiente ecuación tenemos que:

$$\int_{Hyb}^{Hyd} \frac{d Hy}{Hy^* - Hy} = N. U. T.$$

Si resolvemos la ecuación anterior por medio de una integración gráfica obtenemos lo siguiente:

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$
68.7	29.6	20	0.1041	—	—	—
71.68	33	23.5	0.1052	0.1046	3.5	0.3664
74.66	36	27.5	0.1176	0.1114	4	0.4456
77.67	39.7	30.5	0.1087	0.1131	3	0.3393
80.62	43	34	0.1111	0.1099	3.5	0.3846

$$N. U. T. = \Sigma \left[\Delta Hy \left(\frac{1}{Hy^* - Hy} \right)_{prom.} \right] = 1.5356$$

3) Cálculo de la relación agua/aire de operación:

$$\frac{L}{V} = \frac{Hyd - Hyb}{Txd - Txb} \quad \text{Despejando } V = \frac{L (Txd - Txb)}{Hyd - Txb}$$

$$V = \frac{12,490,700 \text{ /b/hr } (80.60^{\circ}\text{F} - 68.70^{\circ}\text{F})}{\left(34 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} - 20 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} \right)}$$

$$V = 10,620,000 \frac{\text{/b}}{\text{hr}}$$

Por lo tanto como conocemos el valor de L y V obtenemos:

$$\left(\frac{L}{V} \right)_{\text{op.}} = 1.18$$

Cálculo de la masa velocidad del aire y del agua:

$$G_y = \frac{V}{A} = \frac{10,620,000 \frac{\text{/b}}{\text{hr}}}{5,368.25 \text{ ft}^2} = 1978.3 \frac{\text{/b}}{\text{hr ft}^2}$$

$$G_x = \frac{L}{A} = \frac{12,490,700.4 \frac{\text{/b}}{\text{hr}}}{5,368.25 \text{ ft}^2} = 2,326.77 \frac{\text{/b}}{\text{hr ft}^2}$$

5) Cálculo de la altura de la unidad de transferencia.

$$A. U. T. = \frac{G_y}{K_y a} = \frac{1978.3 \frac{\text{/b}}{\text{hr ft}^2}}{108.5 \frac{\text{/b}}{\text{hr ft}^3 \text{Ay}}} = 18.23$$

6) Cálculo de la Altura Total de la Torre

$$Z_T = NUT * AUT$$

$$Z_T = 1.5356 * 18.23 = 28 \text{ ft}$$

Por lo tanto $Z_T = 28 \text{ ft}$

7) Cálculo del Número de Celdas

Si utilizamos módulos de (6x6) ft tenemos:

$$(6 \times 6) (4 \times 6) = 864$$

Por lo tanto: $6 * 864 = 5184 \text{ ft}$

ancho de la torre = 48 ft

largo de la torre = 108 ft

a) Recálculo de (Gx) y (Gy).

$$G_x = L' = \frac{12,460,700.40 \frac{/b}{hr}}{5184 \text{ ft}} = 2409.74 \frac{/b}{hr \text{ ft}}$$

$$G_y = G_a = \frac{10,620,000 \frac{/b}{hr}}{5184 \text{ ft}} = 2048.61 \frac{/b}{hr \text{ ft}}$$

8) Cálculo de la Potencia del Ventilador.

a) Caída de presión en la zona empacada.

$$\Delta P' = N'B G_a^2 \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right) + N'C' b_F (L') G_E^2 \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right)$$

Considerando que el piso de la torre es del tipo A tenemos:

$$S_f = 3.0$$

$$B = 0.34 * 10^8$$

$$C' = 0.11 * 10^{12}$$

Puesto que necesitamos conocer el valor de la densidad del gas, --
 calcularemos un volumen húmedo promedio y le sacaremos el inverso como se --
 muestra a continuación:

$$V_H = 0.730 \frac{T_{yb}}{P} (0.0345 + 0.0556 Y') \text{ donde:}$$

V_H = Volumen húmedo en ft³/lb

T_{yb} = Temperatura de Bulbo seco en °R

P = Presión Atmosférica en atm.

Y' = Humedad absoluta en $\frac{\text{lb } H_2O}{\text{lb a.s.}}$

$$V_{Hb} = 0.730 \frac{528.7 \text{ } ^\circ\text{F}}{0.7705 \text{ atm}} \left[(0.0345) + 0.0556 (0.008) \right]$$

$$V_{Hb} = 17.50 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}} \text{ por lo tanto } \rho_b = 0.0571 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$V_{Hd} = 0.730 \frac{532.7 \text{ } ^\circ\text{R}}{0.7705 \text{ atm}} \left[0.0345 + 0.0556 (0.023) \right]$$

$$V_{hd} = 18.05 \frac{ft^3}{/b} \text{ por lo tanto } \rho_d = 0.0554 \frac{/b}{ft^3}$$

Por lo que la densidad del gas será:

$$\rho_G = 0.05625 \frac{/b}{ft^3}$$

$$\Delta P' = 12 (0.34 * 10^8) (2048.61)^2 \left(\frac{0.0675}{0.05625} \right) + 12 (0.11 * 10^{12}) \sqrt{3}$$

$$(2409.47) (4050)^4 \left(\frac{0.0675}{0.05625} \right)$$

$$\Delta P' = 0.20547 + 0.108429$$

$$\Delta P' = 0.3139 \text{ in H}_2\text{O}$$

b) Caída de presión en las persianas.

$$V_F = \frac{V'}{\rho_G * A_P}$$

$$A_P = \left(36 \frac{ft}{celda} \right) (6 \text{ celdas}) \left(\frac{2 \text{ lados}}{CELDA} \right) (a \text{ ft})$$

$$A_P = 2592 \text{ ft}^2$$

$$V_F = \frac{10619994.24 \frac{/b \text{ a.s.}}{hr}}{\left(\frac{60 \text{ min}}{hr} \right) (0.0571 \frac{/b}{ft^3}) (2592 \text{ ft}^2)} = 1,195 \frac{ft}{min}$$

Por medio de la gráfica de V_F vs. Δp obtenemos la siguiente relación :

$$\frac{0.32 - 0.02}{0.32 - \Delta P_p} = \frac{1600 - 400}{1600 - 2592}$$

$$\Delta P_p = 0.22 \text{ in de H}_2\text{O}$$

C) Caída de Presión en los eliminadores de niebla.

De la gráfica de G_a vs. ΔP en in de H₂O obtenemos la relación:

$$\frac{2000 - 800}{2000 - 2048.61} = \frac{0.07 - 0.01}{0.07 - \Delta P_{e.n.}}$$

$$\Delta P_{e.n.} = 0.0689 \text{ in de H}_2\text{O}$$

La caída de presión total será

$$\Delta P_T = 0.3139 + 0.22 + 0.0689$$

$$\Delta P_T = 0.6028 \text{ in de H}_2\text{O}$$

$$\text{BHP} = \frac{V' * P_T}{(60) (yd) (6356)_n}$$

$$\text{BHP} = \frac{10619994.24 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} * 0.6028 \text{ in H}_2\text{O}}{(60) (0.0554) (6356) n}$$

$$\text{BHP}_{\text{TOT}} = 606.013$$

Por lo tanto para cada celda tenemos:

$$\frac{\text{BHP}}{\text{celda}} = \frac{606.013}{6}$$

$$\frac{\text{BHP}}{\text{celda}} = 101 \text{ HP}$$

Cálculo de las Alturas por el Método Gráfico de Baker:

De acuerdo con la ecuación por el cálculo de la altura:

$$Z_T = N. U. T. * A.U.T.$$

Procederemos a calcularlos para cada torre.

1) Torre No. 4 de la Refinería 18 de Marzo (D.F.)

De acuerdo a la gráfica número 1 el N. U. T. calculado por el método gráfico de Baker es : N. U. T. = 2.48 y de cálculos anteriores el valor de A. U. T. obtenido fue de: A. U. T. = 18.23 por lo tanto la altura total será:

$$Z_T = 1.19 * 18.23 = 21.69 \text{ ft}$$

2) Torre de Enfriamiento de la Refinería de Ciudad Madero (Tams).

Siguiendo los pasos antes mencionados el valor del N. U. T. obtenido de la gráfica número 2 es de N.U.T. = 2.38 y el valor de la A.U.T. = 9.95- la altura será de:

$$Z_T = 2.40 * 9.95 = 23.88 \text{ ft}$$

3) Torre de Enfriamiento de la Planta de Amoniaco No.2 del Complejo Petroquímico de Cosoleacoque (Veracruz).

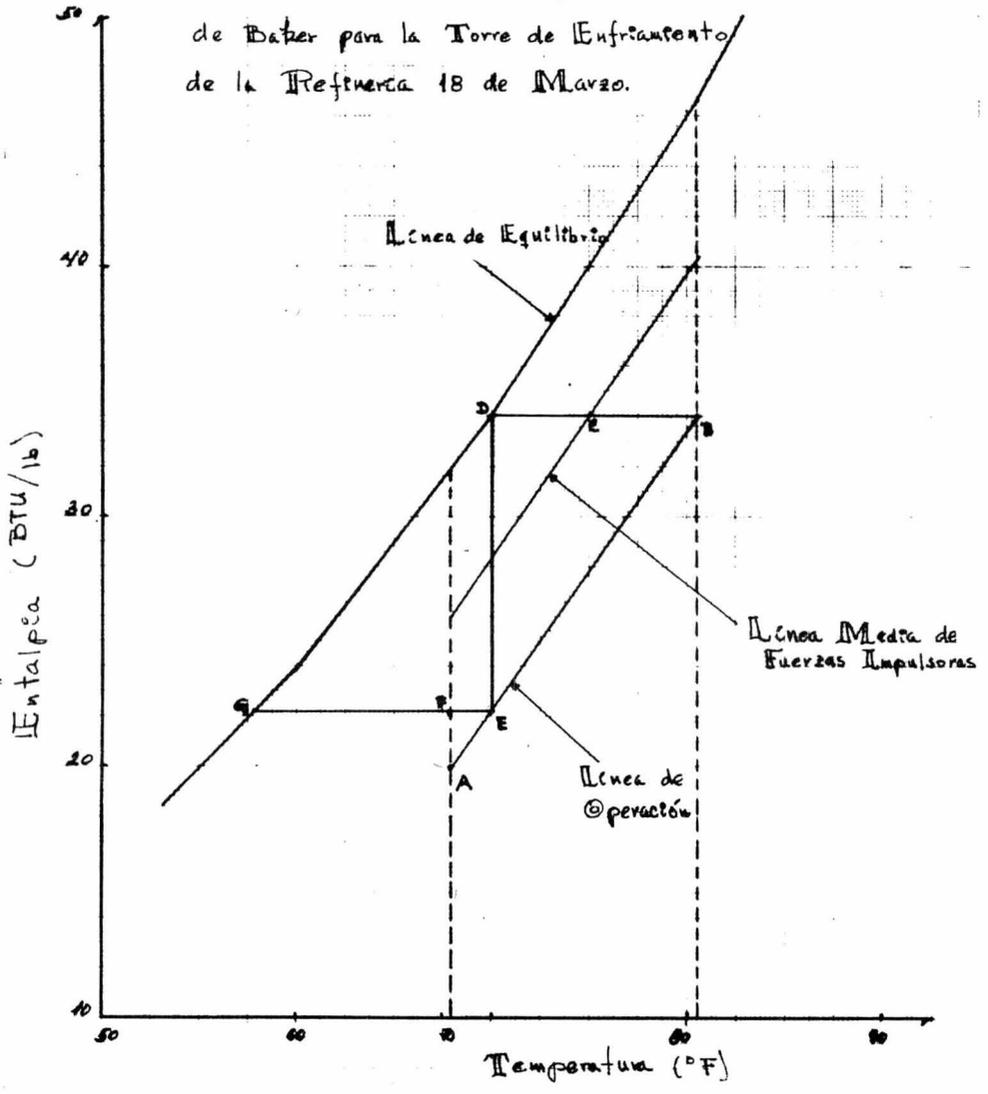
Los valores obtenidos son:

De la gráfica número 3 el valor de N.U.T. = 0.5614

y la A. U. T. = 113.04 por lo que la altura será de:

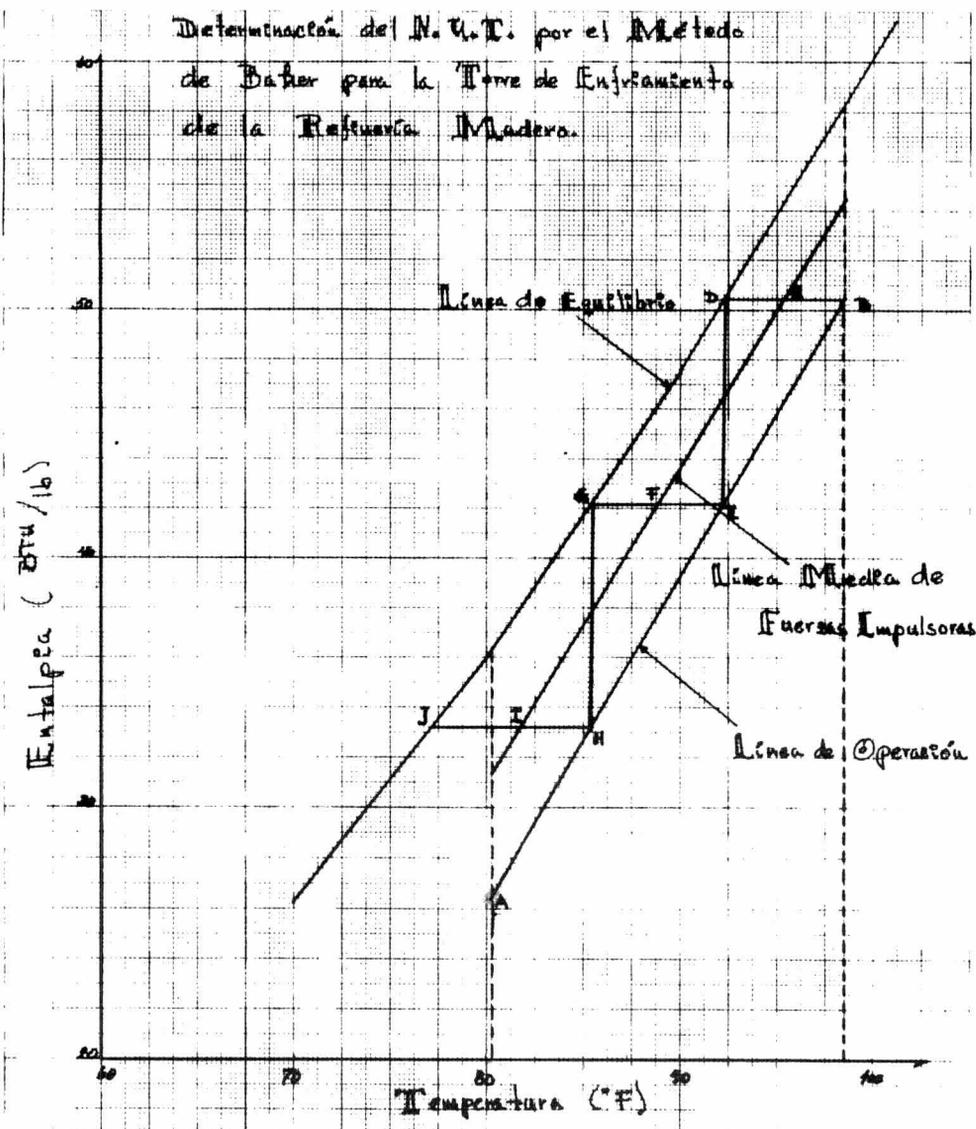
$$Z_T = 0.5614 * 113.04 = 63.46 \text{ ft}$$

Determinación del N. U. T por el Método de Baker para la Torre de Enfriamiento de la Refinería 18 de Marzo.



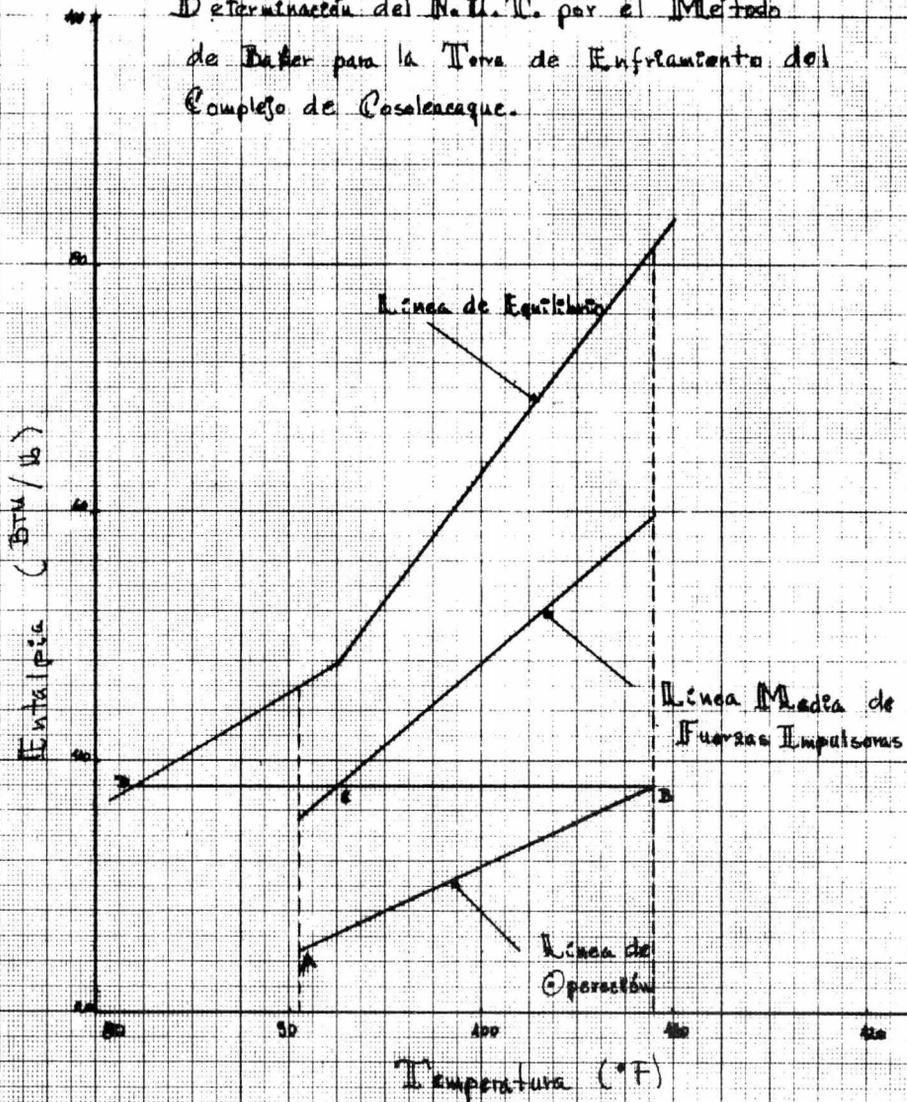
$$NUT = 1 + \frac{EF}{EG} = 1 + \frac{0.9}{4.8} = 1.19$$

Determinación del N. U. T. por el Método de Bader para la Torre de Enfriamiento de la Refinería Madero.



$$NUT = 2 + \frac{HI}{HJ} = 2 + \frac{0.14}{0.34} = 2.40$$

Determinación del N.U.T. por el Método de Buffer para la Torre de Enfriamiento del Complejo de Casalecaque.



$$NUT = \frac{B \cdot a}{b \cdot b} = \frac{6 \cdot 4}{10 \cdot 85} = 0.56$$

Cálculo del Número de Unidades de Transferencia a partir de la Fuerza Impulsora Media Logarítmica.

1) Torre de la Refinería 18 de Marzo (D.F.)

Como se explicó anteriormente las ecuaciones son las siguientes:

$$(H_{yi} - H_y)_{m1} = \frac{(H_{yd} - H_y)_b - (H_{yi} - H_y)_b}{/n \left[(H_{yd} - H_y)_d / (H_{yi} - H_y)_b \right]}$$

$$(H_{yi} - H_y)_{m1} = \frac{\left(43 \frac{\text{BUT}}{/b} - 34 \frac{\text{BUT}}{/b} \right) - \left(29.6 \frac{\text{BUT}}{/b} - 20 \frac{\text{BUT}}{/b} \right)}{/n \left[(43 - 34) / (29.6 - 20) \right]}$$

$$(H_{yi} - H_y)_{m1} = 9.2965$$

$$(N. U. T.)_G = \frac{H_{yd} - H_{yb}}{(H_{yi} - H_y)_{m1}}$$

$$(N. U. T.)_G = \frac{34 - 20}{9.2965} = 1.5059$$

$$(N. U. T.)_G = 1.5059$$

Por lo tanto la altura de la torre será:

$$Z_T = (N.U.T.)_G * A.U.T. = 1.5059 * 18.23 = 27.45 \text{ ft}$$

2) Torre de la Refinería de Ciudad Madero (Tams.)

$$(H_{yi} - H_y) \text{ ml} = \frac{(60 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} - 50.53 \frac{\text{BTU}}{\text{b}}) - (36 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} - 26.5 \frac{\text{BTU}}{\text{b}})}{/n \left[(60-50.53) / (36-26.5) \right]}$$

$$(H_{yi} - H_y) \text{ ml} = 9.4936$$

$$(\text{N.U.T.})_g = \frac{50.53 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} - 26.5 \frac{\text{BTU}}{\text{b}}}{9.4936} = 2.53$$

Por lo tanto la altura de la torre es:

$$Z_T = 2.53 * 9.95 = 25.17 \text{ ft}$$

3) Torre del Complejo Petroquímico de Cosoleacoque (Veracruz).

$$(H_{yi} - H_y) \text{ ml} = \frac{(81 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} - 38 \frac{\text{BTU}}{\text{b}}) - (51 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} - 27 \frac{\text{BTU}}{\text{b}})}{/n \left[(81-38) / (51-27) \right]}$$

$$(H_{yi} - H_y) \text{ ml} = 10.6045$$

$$(\text{N. U. T.})_G = \frac{38 \frac{\text{BTU}}{\text{b}} - 27 \frac{\text{BTU}}{\text{b}}}{10.6045} = 1.03$$

La altura de la torre es:

$$Z_T = 1.03 * 113.04 = 117.25 \text{ ft}$$

Cálculo de la Altura de la Torre de Enfriamiento de la Refinería 18 de Marzo (D.F.) utilizando la temperatura de bulbo húmedo máxima para su diseño.

$$\begin{aligned}
 T_{xd} &= 27^{\circ}\text{C} = 80.6^{\circ}\text{F} \\
 t_{xb} &= 21^{\circ}\text{C} = 69.8^{\circ}\text{F} \\
 t_{bhe} &= 15.8^{\circ}\text{C} = 60.44^{\circ}\text{F} \\
 t_{ybe} &= 20.5^{\circ}\text{C} = 68.9^{\circ}\text{F} \\
 t_{bhs} &= 23^{\circ}\text{C} = 73.4^{\circ}\text{F} \\
 t_{ybs} &= 23^{\circ}\text{C} = 73.4^{\circ}\text{F}
 \end{aligned}$$

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom}$
69.8	32	22.8	0.1087	—	—	—
72.5	35	25.8	0.1087	0.1087	3.0	0.3261
75.2	38.3	28.8	0.1052	0.10695	3.0	0.3208
77.9	42	32.3	0.1031	0.10415	3.5	0.3645
80.6	45	36	0.1111	0.1071	3.7	0.3962

$$NUT = \sum \left[\Delta Hy \left(\frac{1}{Hy^* - Hy} \right)_{prom.} \right] = 1.407$$

Por lo tanto:

$$Z_T = N.U.T. * A.U.T.$$

$$A.U.T. = 18.23$$

$$Z_t = 1.407 * 18.23 = 25.65 \text{ ft}$$

Cálculo de la Altura de la Torre de Enfriamiento de la Refinería 18 de Marzo (D.F) utilizando la temperatura de bulbo húmedo mínima para su diseño..

Tbhe min. = 13.5 °C = 56.30°F
 txd = 27 °C = 80.64°F
 txb = 19.3 °C = 66.74°F
 tybe = 19.3 °C = 66.74°F
 tbhs = 21.5 °C = 70.70°F
 tybs = 21.5 °C = 70.70°F

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$
66.74	28	19.8	0.12195	—	—	—
70.22	32.0	22.3	0.10308	0.11252	2.5	0.2880
73.70	36.0	25.8	0.098	0.10054	3.5	0.3518
77.18	40.5	28.8	0.0854	0.09170	3.0	0.2751
80.64	44.5	32.0	0.08	0.0827	3.2	0.2646

$$N.U.T. = \sum \left[\Delta Hy \left(\frac{1}{Hy^* - Hy} \right)_{prom.} \right] = 1.179$$

Por lo tanto:

$$Z_T = N.U.T. * A.U.T.$$

$$A.U.T. = 18.23$$

$$Z_T = 1.179 \times 18.23 = 21.49 \text{ ft}$$

$$Z_T = 21.49 \text{ ft}$$

Cálculo de la Altura de la Torre de Enfriamiento de la Refinería de Cd. Madero (Tamps). utilizando la temperatura de bulbo húmedo máxima para su diseño.

$$t_{xd} = 39 \text{ }^{\circ}\text{C} = 102.2 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$t_{xb} = 28.5^{\circ}\text{C} = 83.3 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$t_{bhe} = 24.4^{\circ}\text{C} = 75.92^{\circ}\text{F}$$

$$t_{ybe} = 27.7^{\circ}\text{C} = 81.86^{\circ}\text{F}$$

$$t_{bhs} = 32.8^{\circ}\text{C} = 91.04^{\circ}\text{F}$$

$$t_{ybs} = 33.6^{\circ}\text{C} = 92.48^{\circ}\text{F}$$

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$
83.3	39.5	32	0.1333	—	—	—
88.03	45	35.5	0.1052	0.1192	3.5	0.4172
92.76	51.5	39.5	0.0833	0.0942	4.0	0.3768
97.49	57.5	44.5	0.0769	0.0801	5.0	0.400
102.2	67	49.5	0.05714	0.0602	5.0	0.301

$$N. U. T. = \sum \left[\Delta Hy \left(\frac{1}{Hy^* - Hy} \right)_{prom} \right] = 1.495$$

Por lo tanto:

$$Z_T = N.U.T. \times A.U.T.$$

$$A.U.T. = 9.95$$

$$Z_T = 1.495 \times 9.95 = 14.875 \text{ ft}$$

Cálculo de la Altura de la Torre de Enfriamiento de la Refinería de Cd. Madero (tamps.) utilizando la temperatura de bulbo mínima para su diseño.

txd = 35.5 °C = 95.9 °F
 txb = 26.2 °C = 79.16°F
 tbhe = 17 °C = 62.6 °F
 tybe = 19 °C = 66.2 °F
 tbhs = 31.9 °C = 89.42°F
 tybs = 32.8 °C = 91.04°F

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom}$	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})$
79.16	35.5	20.5	0.0666	————	——	————
83.35	39.5	26	0.074	0.0703	5.5	0.3866
87.54	44.5	32	0.08	0.077	6.0	0.4620
91.73	50.0	38.5	0.0869	0.0834	6.5	0.5421
95.9	56.0	47	0.1111	0.099	8.5	0.8415

$$N. U. T. \sum \left[\Delta Hy \left(\frac{1}{Hy^* - Hy} \right)_{prom.} \right] = 2.23$$

Por lo tanto:

$$Z_T = N.U.T. * A.U.T.$$

$$A.U.T. = 9.95$$

$$Z_T = 2.23 \times 9.95 = 22.19 \text{ ft.}$$

Cálculo de la Altura de la Torre de Enfriamiento del Complejo Petroquímico de Cosoleaocoque (Ver.) utilizando la temperatura de bulbo húmedo máxima para su diseño.

$$t_x = 45 \text{ } ^\circ\text{C} = 113 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{xb} = 37.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 99.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{bhe} = 26 \text{ } ^\circ\text{C} = 78.8 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{ybe} = 32.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 86.9 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{bhs} = 32.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 90.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{ybs} = 35 \text{ } ^\circ\text{C} = 95 \text{ } ^\circ\text{F}$$

T_x	H_{y^*}	H_y	$\frac{1}{H_{y^*} - H_y}$	$(\frac{1}{H_{y^*} - H_y})_{prom}$	ΔH_y	$\Delta H_y (\frac{1}{H_{y^*} - H_y})_{prom}$
99.5	62	34	0.03571	—————	—	—————
102.87	68	37.5	0.03279	0.03425	3.5	0.11988
106.25	75	40.5	0.02899	0.03089	3.0	0.09267
109.62	82	44.5	0.02667	0.02783	4.0	0.1113
113	90	48	0.02381	0.0224	3.5	0.07840

$$N. U. T. = \sum \left[\Delta H_y \left(\frac{1}{h_{y^*} - H_y} \right)_{prom.} \right] .40225$$

Por lo tanto:

$$Z_T = N.U.T. * A.U.T.$$

$$A.U.T. = 113.04$$

$$Z_T = .40225 \times 113.04 = 45.47 \text{ ft.}$$

Cálculo de la Altura de la Torre de Enfriamiento del Complejo Petroquímico de Cosoleacoque (Ver.) utilizando la temperatura de bulbo húmedo mínima para su diseño.

- txd = 41.7°C = 107.06°F
- txb = 32 °C = 89.6 °F
- tbhe = 17 °C = 62.6 °F
- tybe = 19 °C = 66.2 °F
- tbhs = 22 °C = 71.6 °F
- tybs = 23 °C = 74.6 °F

Tx	Hy*	Hy	$\frac{1}{Hy^* - Hy}$	$(\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$	ΔHy	$\Delta Hy (\frac{1}{Hy^* - Hy})_{prom.}$
89.6	46	20.5	0.03922	————	——	————
93.95	53.3	22	0.0319	0.03556	1.5	0.05334
98.3	59.8	24	0.02793	0.02942	2.0	0.05984
102.65	67	25.8	0.02427	0.02610	1.8	0.04698
107.06	76	27	0.02041	0.02234	1.2	0.02681

$$N. U. T. = \sum \left[\Delta Hy \left(\frac{1}{Hy^* - Hy} \right)_{prom.} \right] = .1870$$

Por lo tanto:

$$Z_T = N.U.T. * A.U.T.$$

$$A.U.T. = 113.04$$

$$Z_T = 0.1870 \times 113.04 = 21.14 \text{ ft.}$$

VI. 4) Cálculo de las Eficiencias.

Este método se basa en el empleo del número de unidades térmicas -- que están definidas por la siguiente ecuación.

$$U_T = (F_1) (F_2) L \quad \text{donde}$$

U_T es el número de unidades térmicas; el factor F_1 es función de -- la temperatura de bulbo húmedo y del acercamiento; el factor F_2 es función -- del rango y del acercamiento y L es el gasto de agua.

Los valores de estos factores (F_1 y F_2) nos fueron proporcionados por la compañía Marley de México S.A., pero no se nos suministraron las -- tablas de donde se obtienen estos factores debido a que es información privada de la compañía razón por la cual no se publican en esta tesis.

La fórmula general para el cálculo de las eficiencias es la siguiente:

$$n = \frac{ (U_T)_o }{ (U_T)_D } * 100 \quad \text{donde:}$$

(U_T)_o = Es el número de unidades térmicas evaluado de acuerdo a las condiciones de operación, y

(U_T)_D = Es el número de unidades térmicas evaluado de acuerdo a las condiciones de diseño.

Cálculo de la Eficiencia de la Torre de Enfriamiento No. 4 ubicada en la Refinería 18 de Marzo en el Distrito Federal.

Los datos de diseño y operación son los siguientes:

Diseño	Operación
L = 25,000 g.p.m.	L = 25,000 g.p.m.
R = 35°F	R = 11.9°F
A = 20°F	A = 9.9 °F
Tbh = 65°F	Tbh = 58.8°F
L/G = 1.18	L/G = 1.18
Q = 4.375 * 10 ⁸ BTU/hr	Q = 1.4863 * 10 ⁸ BTU/hr
U _T = (F1) (F2) L	U _T = (F1) (F2) L
U _{T_D} = (1.118) (0.402) (25,000)	U _{T_O} = (1.302) (0.342) (25,000)
U _{T_D} = 11,235.9	U _{T_O} = 11.132.1

$$n = \frac{11,132.1}{11,235.9} * 100$$

Por lo tanto n = 99.08 %

Cálculo de la Eficiencia de la Torre de Enfriamiento ubicada en la Refinería de Cd. Madero Tams.

Los datos de diseño y de operación son los siguientes:

Diseño	Operación
L = 50,000 g.p.m.	L = 50,000 g.p.m.
R = 13.32°F	R = 18.34°F
A = 5 °F	A = 9.64°F
Tbh = 85°F	Tbh = 70.56°F
L/G = 1.13	L/G = 1.39
Q = 3.33 * 10 ⁸ BTU/hr	Q = 4.5676 * 10 ⁸ BTU/hr
U _T = (F ₁) (F ₂) L	U _T = (F ₁) (F ₂) L
U _{TD} = (0.710) (0.6405) (50.000)	U _{To} = (0.9895) (0.48) (50,000)
U _{TD} = 22.737.75	U _{To} = 20,748

$$n = \frac{20,748}{22,737.75} * 100$$

Por lo tanto n = 91.24 %

Cálculo de la Eficiencia de la Torre de Enfriamiento No. 2 de la --
 Planta de Amoniaco Ubicada en el complejo Petroquímico Cosoleacoque en Vera--
 cruz.

Los datos de diseño y operación son los siguientes:

Diseño	Operación
L = 51,000 g.p.m.	L = 47.666.67 g.p.m.
R = 20°F	R = 15.67°F
A = 11°F	A = 22.74°F
Tbh = 82.4°F	Tbh = 70.66°F
L/G = 0.9544	L/G = 0.892
Q = 6.375 * 10 ⁸ BTU/hr	Q = 3.7346 * 10 ⁸ BUT/hr
$U_T = (F_1) (F_2) L$	$U_T = (F_1) (F_2) L$
$U_{TD} = (0.815) (0.600) (51,000)$	$U_{To} = (0.7865) (0.481) (51,000)$
$U_{TD} = 24,939$	$U_{To} = 19,293.63$

$$n = \frac{19,293,63}{24,939} * 100$$

Por lo tanto $n = 53.51 \%$

VI. 5) Diseño Estructural de Torres de Enfriamiento

En la construcción de torres de enfriamiento existen infinidad de formas y tamaños posibles así como de materiales de construcción.

Para seleccionar la torre adecuada, en primer lugar un estudio preliminar debe ser hecho; principalmente sobre las consideraciones térmicas y económicas así como también de las ventajas y desventajas que ofrece cada posibilidad.

Suponiendo que este estudio preliminar ya se ha realizado, el diseño de la estructura cae en las siguientes categorías.

- 1) Factores que influyen en la elección del modelo (forma).
 - a) Torres de Tiro Mecánico y Atmosféricas.
 - b) Torres de Tiro Natural.
 - c) Estanques.

- 2) Elección del material de Construcción.
 - a) Madera
 - b) Concreto.
 - c) Otros materiales.

- 3) Diseño Estructural Teórico

- a) Todos los tipos de torres de madera
- b) Torres de tiro mecánico de concreto
- c) Torres de tiro natural de concreto
- d) Estanque.
- e) Cimientos.

1) Forma de la Torre.

Es absolutamente necesario preveer el flujo máximo de aire, así como también la forma de la base ya que estos factores afectan directamente la eficiencia en la operación de la torre

En la mayoría de los casos, para una altura dada el espacio abierto para la entrada del aire depende de la relación entre el perímetro y la superficie de la base.

La ventaja práctica que dá el poner las paredes en serie es que cada pared es común a dos celdas,

Las torres de tiro mecánico son bastante altas y utiliza grandes -- ventiladores.

En el caso de las torres atmosféricas la ubicación del terreno es -- usualmente condicionada por la dirección y la intensidad con que se mueven -- los vientos dominantes. Normalmente son rectangulares con el lado más largo -- perpendicular a la dirección en que sopla el viento.

La altura y el espacio de las persianas para la entrada del aire es determinada por el tipo de torre seleccionada.

2) Materiales de Construcción.

Los materiales de construcción más comunmente usados en la fabricación de torres de enfriamiento son: madera, metal, plástico, asbesto cemento concreto, cerámica y combinaciones de los mismos.

En un tiempo el material empleado para la construcción de las primeras torres fue única y exclusivamente la madera sin importar el tipo de torre ó el sitio donde iba a ser instalada.

Debido a que en las torres de enfriamiento la madera está sujeta a un ciclo continuo que consiste en secarse y humedecerse, la vida de la misma va a verse afectada ya que con el tiempo tenderá a pudrirse.

Otro factor importante que influye en este aspecto es el sitio donde va a ser instalada, ya que las condiciones climatológicas reinantes afectarán también a la vida de la torre.

La madera puede deteriorarse además por dos formas de ataque: a) uno químico y b) otro biológico.

- a) El químico es debido a la alcalinidad del agua por la presencia de sales, tales como: bicarbonato y carbonato de sodio; los cuales remueven la lignina. Este efecto se acentuará por la pre--

sencia de oxidantes, como el cloro y el bromo.

Este tipo de ataque se presenta en las secciones inundadas de la torre y en otras áreas salpicadas ocasionalmente; como son las persianas, eliminadores de rocío y los cubos de los ventiladores.

- b) El ataque biológico puede efectuarse en dos formas: superficial e interno.

El superficial es debido al movimiento selectivo de celulosa -- desde la superficie de la madera por microorganismos que son capaces de degradar la celulosa en moléculas más pequeñas y emplear el carbono como alimento.

El ataque biológico interno es el movimiento selectivo de celulosa desde el interior de la madera por microorganismos que produce una putrefacción interna.

Ambos tipos de ataque se presentan principalmente en las secciones inundadas como son el empaque, paredes interiores de la cubierta y miembros estructurales.

Otro material que se utiliza para la construcción de las torres de enfriamiento es el asbesto-cemento.

El concreto es un material que se usa principalmente para la construcción de los estanques de almacenamiento y para la cubierta de las torres.

El uso del concreto no es muy amplio ya que presenta las siguientes desventajas:

- a) Las torres construidas de concreto están propensas a atacarse por bacterias.
- b) El tiempo requerido para su construcción es bastante largo.
- c) Para construir las torres de este material los trabajos de mano de obra son costosos.
- d) Las demoliciones ó modificaciones son también muy costosas.

Los plásticos han encontrado una gran aplicación en la construcción de torres de enfriamiento, debido a su resistencia natural al ataque atmosférico y condiciones de operación.

Los plásticos que normalmente se emplean en la construcción son: - poliestireno, polipropileno, polietileno de alta densidad, cloruro de polivinilo y fibra de vidrio reforzada.

Cuando hay posibilidades de contaminación del agua por aceites y -- solventes, se debe emplear un material como el cloruro de polivinilo ó el pro

sileno.

Algunas ventajas de los plásticos son:

- 1) Son inertes a una amplia gama de condiciones de operación.
- 2) No se desgastan con facilidad.
- 3) De una manera natural no favorecen las incrustaciones ni el crecimiento de algas.
- 4) Algunos plásticos como el cloruro de polivinilo tienen menos riesgo a incendiarse que la madera.

Algunas desventajas de los plásticos son:

- 1) No se mojan fácilmente.
- 2) Algunos plásticos no deben estar en contacto con solventes ó aceites en solución.
- 3) Algunos plásticos son muy inflamables como el poliestireno.
- 3) Diseño Estructural.

Existen tres tipos de arreglo estructural en las torres de enfriamiento, y estos son:

- I) Cuando el empaque es totalmente independiente de las paredes.
- II) Cuando el empaque es soportado exclusivamente de las paredes.
- III) Cuando el peso del empaque es distribuido parcialmente sobre -- las paredes y sobre la base ó estanque.

El primer tipo es recomendado para torres de tiro natural y torres de tiro mecánico, debido al diseño estructural que presentan estos equipos.

Para el caso en que el empaque es soportado exclusivamente de las - paredes, se tienen tres desventajas principales que son:

- a) El empaque puede caerse debido a los grandes ensambles que existen entre los puntos de soporte.
- b) Cuando es usado equipo mecánico no se tiene la facilidad necesaria para absorber las vibraciones.
- c) El peso a lo largo de la periferia no está bien distribuido.

Para el caso de celdas pequeñas la mejor alternativa es cuando el - peso total del empaque está distribuido parcialmente sobre las paredes y so-- bre la base, debido a la forma de la estructura de interconexión de las vi-- gas y columnas; por lo que la torre será más fuerte y resistente y el empaque tendrá más estabilidad.

VI. 6) Operación y Mantenimiento de Torres de Enfriamiento.

Todos los equipos y en este caso las torres de enfriamiento necesitan de una operación y mantenimiento adecuados, ya que esto incrementará la vida y eficiencia de los mismos por lo que consideramos necesario hacer referencia a este tema.

Los procedimientos de operación claramente escritos y las inspecciones programadas además de elevar la eficiencia de operación como se mencionó anteriormente, ayudarán a conservar bajos los costos de mantenimiento.

Antes del Arranque.

Antes de poner una torre de enfriamiento en servicio, se deberá verificar cuidadosamente los siguientes detalles:

- Un sistema de distribución limpio y las boquillas u orificios - deberán estar correctamente instalados.
- Los estanques deben estar limpios y libres de desperdicios.
- La coladera de succión limpia y en su posición correcta sobre - el colector.
- La válvula del flotador para el agua de repuesto del estanque - deberá estar operando libremente.

- Todos los pernos deberán estar correctamente apretados, especialmente los del conjunto del ventilador y otros equipos mecánicos.
- Los reductores de velocidad llenados a su nivel correcto, con aceite limpio del grado adecuado y el escape de respiración deberá estar libre de obstrucciones.

Lubricación Correcta de los Motores.

- El ventilador debe girar libremente en ambas direcciones y con la corriente normal, gira en sentido de las manecillas del reloj.
- Las conexiones eléctricas deberán ser seguras en las condiciones de operación de la torre.
- Los motores y unidades motrices deberán funcionar sin ruido excesivo ó calentamiento.
- Después de que cada uno de los pasos anteriores se ha verificado, el estanque colector se puede llenar con agua y poner la torre en operación. Para eliminar la posibilidad de que la madera se seque y se encoja, el agua se deberá circular diariamente desde el momento en que se termina de instalar la torre.

Operación en Clima Frío.

El mantenimiento correcto de la torre en los meses de invierno es la mejor preparación para la operación en verano cuando las temperaturas se acercan a la temperatura de bulbo húmedo para la cual se ha diseñado la torre.

El mejor método de operar una torre de enfriamiento en condiciones de ambiente de clima frío depende de numerosos factores además de la temperatura ambiente: el valor del agua fría; el número de bombas de circulación, el costo de los caballos de fuerza de los ventiladores y bombas; de si los motores son de una ó de dos velocidades; y el efecto que los cambios en condiciones de ambiente pueden tener en la carga térmica ó la necesidad de agua fría cuando pueden intervenir contaminaciones de corrientes.

En tiempo de congelación, una torre de enfriamiento nunca deberá operarse sin una carga térmica. A medida que baja la temperatura del aire, y la necesidad de agua más fría se vuelva secundaria, los ventiladores deben reducirse a media velocidad para permitir que se mantengan las temperaturas del agua de enfriamiento. Para evitar daños al reductor de velocidad, el motor siempre deberá desenergizarse, antes de que se cambie la dirección de velocidad, sosteniendo el botón de "parada" por lo menos durante un minuto. Un relevador de retardo de tiempo puede efectuar esta función automáticamente.

Un ventilador a media velocidad entrega la mitad del aire con un octavo de los caballos de fuerza. Es probable que una torre equipada con mo-

tores de dos velocidades puede operar la mayor parte del invierno con todos - sus ventiladores a media velocidad. Si la torre tiene únicamente motores de una velocidad, los ventiladores primero se tendrán que parar.

El sistema de circulación de agua se puede usar con frecuencia para combatir la formación de hielo.

Si hay más de una bomba de circulación, se puede parar una bomba pa - ra incrementar la elevación de temperatura del agua, así como para reducir el consumo de corriente.

Las celdas no deberán operarse con relación de flujo reducido. Si - se reduce el caudal total, algunas celdas deberán pararse para conservar bien inundadas aquellas celdas que queden en operación.

Las celdas deberán pararse en orden de la primera a la última de ma - nera que el agua circule pasando fuera de las celdas inactivas antes de des - cargar en la torre.

Cuando se trate de torres Múltiples y se desee quitar de servicio - una torre entera, la relación de flujo a través de las torres restantes se - puede incrementar substancialmente quitando alguna boquilla en el sistema de distribución.

Si se ha formado hielo alrededor de las lumbreras de la torre, el - primer paso para removerlo es parar los ventiladores uno por uno durante un

período breve. Esto sirve para un doble propósito: con el ventilador parado la temperatura del agua subirá y sin el flujo de aire, el agua tibia (ó ca---liente) se moverá hacia la cara de la lumbrera, invadiendo el área.

En condiciones más severas de formación de hielo, los ventiladores se pueden hacer girar en reversa para forzar todavía más el agua caliente y el aire sobre las lumbreras. La duración y la frecuencia de esta práctica se puede establecer por experimentación. Un ciclo típico es de 10 a 15 minutos cada 8 horas.

En condiciones muy extremas de clima (-20°F y más bajas) puede == que sea necesario correr el ventilador en reversa a toda velocidad para controlar la formación de hielo.

Los ventiladores se deberán arrancar cuidadosamente en clima helado porque se puede acumular el hielo y la nieve sobre ellos y desbalancearlos. El hielo se puede quitar con vapor ó con agua caliente.

En torres de contracorriente, las entradas de abertura se pueden reducir ajustando las lumbreras. En torres de flujo cruzado, la remoción de -- los distribuidores de agua en el lado de las lumbreras del estanque de agua -- caliente incrementará el flujo del agua caliente sobre el área de las lumbreras.

Los procedimientos de operación deben escribirse de manera que se - limiten las decisiones que tengan que tomar los operadores. Estos procedi---

mientos deberán ponerse al día cada año para tomar en cuenta la tendencia de una torre para helarse ó para compensar los cambios en las condiciones de operación.

Procedimiento de Parada.

Durante una parada, cualquiera que sea su duración, el ventilador, y el conjunto de engranes y motor se deben revisar virtualmente. El aceite en el reductor de velocidad deberá inspeccionarse viendo que el nivel esté correcto y asegurarse de que esté libre de agua.

Cada celda que se vaya a tener fuera de operación más de una semana deberá arrancarse y correrse por lo menos una vez a la semana durante 10 minutos; el sistema de distribución también deberá inspeccionarse y limpiarse, y el estanque de la torre deberá drenarse.

Control del Tratamiento de Agua.

Hay tres áreas de cuidado en el tratamiento de agua: control de pH, inhibidores para prevenir la corrosión de la tubería y los permutadores y -- agentes para prevenir el crecimiento de microorganismos y para disminuir los taponamientos.

El pH, que se controla por la adición de ácido sulfúrico ó de sosa,

se deberá mantener en 6 a 7. Un pH más alto resulta en la remoción de la lignina que mantiene unidas las fibras y por lo tanto es causa de deterioro de las maderas. Los inhibidores de corrosión se seleccionan en base de los productos químicos que se encuentren en el agua de respuesta y los materiales -- del equipo permutador de calor.

Generalmente los algicidas y los fungicidas se necesitan inyectar - de golpe para mantener el nivel de agentes químicos. La primera inyección de -berá ser a 5 p.p.m. durante un período de 15 a 20 minutos, seguido de una re- lación más baja para mantener la concentración en 0.5 a 1 p.p.m. durante --- otras dos horas.

Generalmente, este procedimiento deberá repetirse dos ó tres veces - a la semana.

VII) ASPECTOS ECONOMICOS EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

La selección de una torre de enfriamiento esta basada en el equilibrio económico existente entre el funcionamiento óptimo y bajos costos de capital y operación.

Las limitaciones impuestas por el cliente y ciertos aspectos de diseño y de operación del sistema, al cual la torre de enfriamiento va a integrarse, dará como resultado que el diseño de algunos tipos de torres son más convenientes que otros. De ahí que un costo inicial de capital, pueda no ser la selección más económica con respecto a los costos de mantenimiento y operación, para lo que deberá tomarse en cuenta el costo anual por enfriamiento de agua.

Estimación del costo anual de la Torre.

El costo anual de la torre está integrado por el costo anual del capital invertido y el costo anual de operación, siendo este último la suma del costo de la energía requerida, para hacer circular el aire a través de la

torre (costo de la energía del ventilador) y el costo por concepto del bombeo del agua hasta la parte superior del empaque (costo del bombeo del agua).

El costo anual del capital invertido se toma como un porcentaje -- del capital total invertido, e incluye la amortización del mismo y los gastos por concepto de mantenimiento.

Para los fines de cálculo, pueden desglosarse en dos partes como - se muestra a continuación:

a) Aquellas cuyo costo es una función del área de la torre, pero independiente de la altura empacada.

y

b) Aquellas cuyo costo dependen de la altura del empaque.

El grupo (a) comprenderá aspectos tales como estructura externa, - estanque, ventiladores, motores, distribuidor del líquido, etc., y para una to rre de sección transversal determinada, su costo será independiente de la razón aire - agua, es decir, permanecerá constante durante el cálculo de la razón óptima aire - agua.

El grupo (b) comprende solamente el empaque de la torre. Puesto - que el empaque junto con los distribuidores, ventiladores, motores y motores - de arranque requieren más atención que la estructura externa, estanque, etc., la carga de mantenimiento de los primeros será más elevada, y esto se traduci

rá en un costo anual del capital invertido relativamente más elevado.

Los costos que se presentan en las torres de enfriamiento pueden -
dividirse de una manera más general como sigue:

- 1) Costo del Capital Inicial.
- 2) Costo de Operación.
 - a) Agua
 - b) Químicos
 - c) Potencia
 - d) Trabajo
 - e) Provisiones
- 3) Costo de Mantenimiento
 - a) abastecimiento de materiales
 - b) Trabajos de reparación
 - c) Mantenimiento preventivo
- 4) Costos Diversos
 - a) Seguro
 - b) Impuestos
 - c) Depreciación
 - d) Supervisión
 - e) Laboratorio

El costo inicial de muchas torres de enfriamiento es a menudo el -
mismo. Una torre atmosférica puede ser más alta que una torre de tiro mecáni-
co, pero requiere muy poco equipo auxiliar. Una torre de tiro inducido puede
ser más alta que una torre de tiro inducido a flujo cruzado, pero no tiene el

flujo de aire adecuado. Se tienen preparadas una serie de curvas mediante las cuales podemos determinar el costo en una torre de tiro inducido y a flujo cruzado.

El costo más importante que afecta a las torres de enfriamiento es el costo de operación; y entre los más importantes se encuentran como se mencionó anteriormente el tratamiento químico necesario y la potencia requerida.

Dentro de los costos para el tratamiento químico se consideran los costos de:

- 1° Control de pH
- 2° Control de Corrosión
- 3° Control de formación de algas
- 4° Control del cloro

Los costos químicos para una torre de tiro natural y una de tiro mecánico con la misma carga térmica son los mismos.

Dentro de los costos para la obtención de la potencia requerida se encuentran:

- 1° Bombeo del agua a través de la torre y
- 2° Costo de operación de los ventiladores.

Obviamente que para una torre de tiro natural no hay costo de operación de los ventiladores, ya que estos equipos carecen de ellos, pero el --

costo de bombeo puede ser mayor. El arreglo del empaque y su tipo determinarán el costo de bombeo.

Para calcular la potencia de bombeo podemos emplear la siguiente ecuación:

$$Q_{wt} = \frac{3.14 W Z_d Q_e}{N_w}$$

donde:

Q_{wt} = Costo de potencia de bombeo en un cierto período

W = Galones de agua que van a ser bombeados en el mismo período

Z_d = Cabeza total en pies.

Q_e = Costo de Energía Eléctrica en \$/kwh

N_w = Eficiencia de la bomba y el motor expresada en decimales.

La siguiente gráfica nos dá una idea de los HP de bombeo requeridos. (Fig. 110)

Los costos de mantenimiento son casi iguales a los costos de obtención de la potencia requerida.

El mantenimiento tiene dos propósitos fundamentales:

1. Reparar y/o reemplazar las piezas que hayan sufrido desperfectos.
- 2° Tomar las medidas requeridas para mantener el equipo en buen estado.

Existe un gran número de torres que pueden prestar el servicio que se requiere, para el enfriamiento de una cantidad de agua a una temperatura dada y bajo ciertas condiciones atmosféricas. El problema consiste como se mencionó anteriormente en seleccionar el tipo de torres adecuada para un costo mínimo.

Costos que son idénticos para varias torres pueden ser descartados dentro de un análisis para determinar el costo límite para el enfriamiento de agua cuando lo que se busca es un diseño óptimo. Y para ésto se tendrían que tomar en cuenta los siguientes factores:

- a) La velocidad y la distribución adecuada del aire, que dependerán del área seccional de la torre.
- b) El volumen empacado
- c) La potencia de bombeo requerida
- d) La caída de presión a través de la torre.

Estos son los factores más importantes, y que deben ser estudiados minuciosamente para poder seleccionar una torre adecuada que cumpla con el servicio que sea requerido.

ANALISIS ECONOMICO

En este análisis se precisa determinar la magnitud de dos cosas -- principales: el costo anual del capital invertido y el costo anual de operación como mencionamos anteriormente el costo anual del capital invertido se considera como un porcentaje del capital total invertido, siendo en este caso del 15% del cual un 10% corresponde a la depreciación y un 5% a seguros, intereses y mantenimiento.

1) Torre de enfriamiento de la refineria de Ciudad Madero (Tams)

Para esta torre se dispone de los siguientes datos:

Número de celdas = 10 Número de Pisos = 10
Número de ventiladores = 10 Altura empacada = 25 ft
Largo = 175.83 ft
Ancho = 60.42 ft
Altura = 28.4 ft

a) Cálculo del capital total invertido.

El costo del empaque fue de \$ 73,575.00

Para calcular el costo del estanque llevaremos a cabo el siguiente análisis:

Fondo del estanque = 2 mts.

El área de las paredes laterales es:

$$2 \text{ m} * 60 \text{ m (largo)} * 2 \text{ lados} = 240 \text{ m}^2$$

$$2 \text{ m} * 19 \text{ m (ancho)} * 2 \text{ lados} = 76 \text{ m}^2$$

Para calcular el área del fondo del estanque:

$$60 \text{ m} * 19 \text{ m} = 1140 \text{ m}^2$$

por lo que el área total será de

$$240 \text{ m}^2 + 76 \text{ m}^2 + 1140 \text{ m}^2 = 1456 \text{ m}^2$$

Si suponemos paredes de 20 cm de espesor, y si el costo aproximado del m^3 de concreto es de \$ 1,200.00 obtenemos

$$1456 \text{ m}^2 * 0.20 \text{ m} = 291.2 \text{ m}^3$$

$$291.2 \text{ m}^3 * \$ 1200/\text{m}^3 = \$ 349, 440.00$$

de esta forma el costo total del estanque es de \$ 3,49, 440.00

Costo de Motores.

Ya que se utilizaron motores de 75 HP para esta torre y su costo es de \$ 28, 125.00 cada uno el costo total sería para 10 motores.

$$10 * \$ 28, 125.00 = \$ 281, 250.00$$

Los costos de los ventiladores y accesorios son:

Para una pieza = 135, 675.00 ya que la torre consta de 10 ventiladores tenemos.

$$10 * \$ 135, 675.00 = \$ 1,356, 750.00$$

El capital total invertido es de:

$$\begin{aligned} \text{C.T.I.} &= \$ 73,575.00 + \$ 349,440.00 + \$ 281,250.00 + \\ &+ \$ 1,356,750.00 \end{aligned}$$

$$\text{C.T.I.} = \$ 2,061, 015.00$$

b) Costos de Operación

Potencia consumida por los ventiladores:

$$10 \text{ motores} * 75 \text{ Hp} = 750 \text{ HP}$$

$$750 \text{ HP} * 0.7457 \frac{\text{k}\omega}{\text{HP}} = 559.28 \text{ k}\omega$$

Si suponemos un factor de servicio de 0.9, esto equivaldrá a 328 - días de trabajo.

$$328 \text{ días} * \frac{24\text{hrs.}}{\text{día}} = 7872 \frac{\text{hrs}}{\text{año}}$$

Y si el costo por k watt/hora es de \$ 0.42 tenemos

$$559.28 \text{ kw} * 7872 * \$ 0.42 = \$ 1,882,176.31$$

Los costos por tratamiento de agua y por concepto de agua de re--- puesto son \$ 50,300.00 y \$ 763,000.00 respectivamente.

Finalmente calcularemos el costo anual de la torre.

Costo final de la torre = Costo anual del capital invertido + costo
anual de operación

Costo anual del capital invertido = $0.15 (\$ 2,061,015.00)$

Costo anual del capital invertido = $\$ 309,152.25$

Costo de operación = $\$ 1,882,176.31 + \$ 50,300.00 + \$ 763,00.00$

Costos de operación = $\$ 2,008,776.31$

Costo Anual de la Torre = $\$ 2,317,928.56$

2) Torre de Enfriamiento de la refinería 18 de marzo (D.F.)

Para esta torre disponemos de los siguientes datos:

Número de celdas = 6 Altura = 28 ft

Número de ventiladores = 6 Número de Pisos = 11

Largo = 108 ft

Ancho = 48 ft

a) Cálculo del capital total invertido.

El costo del empaque fue de $\$ 44,145.00$

Para calcular el costo del estanque llevaremos a cabo el siguiente
análisis:

Fondo del estanque = 2 mts.

El área de las paredes laterales es:

$$2 \text{ m} * 35 \text{ m (largo)} * 2 \text{ lados} = 140 \text{ m}^2$$

$$2 \text{ m} * 15.5 \text{ m (ancho)} * 2 \text{ lados} = 62 \text{ m}^2$$

Para calcular el área del fondo del estanque:

$$35 \text{ mts. (largo)} * 13.5 \text{ mts. (ancho)} = 542.5 \text{ m}^2$$

por lo que el área total será de:

$$140 \text{ m}^2 + 62 \text{ m}^2 + 542.5 \text{ m}^2 = 744.5 \text{ m}^2$$

Si suponemos que las paredes tienen 20 cm de espesor y si el costo aproximado del m^3 de concreto es de \$ 1,200.00 obtenemos:

$$744.5 \text{ m}^2 * 0.20 \text{ m} = 148.9 \text{ m}^3$$

$$148.9 \text{ m}^3 * \$ 1200.00 = \$ 178,680.00$$

De esta forma el costo total del estanque será de:

$$\text{Costo total estanque} = \$ 178,680.00$$

Costo de Motores.

Ya que se utilizaron motores de 75 HP para esta torre, y su costo es de \$ 29,125.00 cada uno, el costo total será para seis motores:

$$6 * \$ 28,125.00 = \$ 168,750.00$$

Los costos de los ventiladores y accesorios serán los siguientes:

El costo de una pieza es de \$ 135,675.00 y como la torre consta de seis ventiladores tendremos lo siguiente:

$$6 * \$ 135,675.00 = \$ 814,050.00$$

De este modo el capital total invertido será de:

$$\text{C.T.I.} + \$ 44,145.00 + \$ 178,680.00 + \$ 168,750.00 + \$ 814,050.00$$

$$\text{C.T.I.} = \$ 1,205,625.00$$

b) Costos de Operación.

La potencia consumida por los ventiladores de esta torre será:

$$6 \text{ motores} * 75 \text{ HP} = 450 \text{ HP}$$

$$450 \text{ HP} * 0.7457 \frac{\text{kw}}{\text{HP}} = 335.57 \text{ kw}$$

Suponiendo un factor de servicio de 0.9, esto implicará que consideraremos un año de 328 días de trabajo.

$$328 \frac{\text{días}}{\text{año}} * \frac{24 \text{ hrs.}}{\text{día}} = 7872 \frac{\text{hrs.}}{\text{año}}$$

y si el costo por k watt/hora es de \$ 0.42 tenemos

$$335.57 \text{ kw} * 7872 \frac{\text{hrs.}}{\text{año}} * \$ 0.42 = \$ 1,109,474.96$$

Los costos por concepto de tratamiento de agua y de agua de repues-
to son \$ 50,000.00 y \$ 700,000.00 respectivamente.

Finalmente calcularemos el costo anual de la torre.

Costo anual de la torre = costo anual del capital invertido + cos-
to anual de operación

$$\text{Costo anual del capital invertido} = 0.15 (\$ 1,205,625.00)$$

$$\text{Costo anual del capital invertido} = \$ 180,843.75$$

$$\text{Costos de operación} = \$ 1,109,474.96 + \$ 50,000.00 + \$ 700,000.00$$

$$\text{Costos de operación} = \$ 1,859,474.96$$

$$\text{Por lo tanto el costo anual de la torre} = \$ 2,040,318.71$$

3) Torre de Enfriamiento de la planta de amoniaco No. 2 del comple-
jo petroquímico de cosoleacaque.

Para esta torre se dispone de los siguientes datos:

$$\text{Número de celdas} = 10 \quad \text{Altura} = 39 \text{ ft}$$

$$\text{Número de ventiladores} = 10 \quad \text{Número de pisos} = 11$$

$$\text{Largo} = 181 \text{ ft}$$

$$\text{Ancho} = 67 \text{ ft}$$

a) Cálculo del capital total invertido.

El costo del empaque fue de \$ 73,575.00

Para calcular el costo del estanque llevaremos a cabo el siguiente análisis:

Fondo del Estanque = 2 mts.

El área de las paredes laterales es:

$$2 \text{ m} * 57 \text{ mts. (largo)} * 2 \text{ lados} = 228 \text{ m}^2$$

$$2 \text{ m} * 21 \text{ mts. (ancho)} * 2 \text{ lados} = 84 \text{ m}^2$$

Para calcular el área del fondo del estanque:

$$57 \text{ mts. (largo)} * 21 \text{ mts. (ancho)} = 1,197 \text{ m}^2$$

Si suponemos que las paredes tienen 20 cm. de espesor, y si el costo aproximado del m^3 de concreto es de \$ 1,200.00 como en los casos anteriores tenemos:

$$1197 \text{ mts.}^2 * 0.20 \text{ m} = 239.4 \text{ m}^3$$

$$239.4 \text{ m}^3 * \$ 1200.00 = \$ 287,280.00$$

De esta forma el costo total será de:

Costo total del Estanque = \$ 287,280.00

Costo de Motores.

Ya que se utilizaron motores de 100 HP para esta torre y si su costo es de \$ 37,500.00 cada uno, el costo total para diez motores será de:

$$10 * 37,500.00 = \$ 375,000.00$$

Los costos de los ventiladores junto con los accesorios son los siguientes:

El costo por pieza es de \$ 135,675.00 y si la torre consta de 10 - ventiladores tendremos un total de:

$$10 * \$ 135,675.00 = \$ 1,356,750.00$$

De este modo el capital total invertido será de:

$$C.T.I. = \$ 73,575.00 + \$ 287,280.00 + \$ 375,000.00 + \$ 1,356,750.00$$

$$C.T.I. = \$ 2,092,605.00$$

b) Costos de Operación:

La potencia total consumida por los ventiladores de esta torre de enfriamiento es de:

$$10 \text{ motores} * 100 \text{ HP} = 100 \text{ HP}$$

$$100 \text{ HP} * \frac{0.7457 \text{ kw}}{\text{HP}} = 745.7 \text{ kw}$$

Suponiendo un factor de servicio de 0.91, esto implicará que vamos a considerar un año de 328 días de trabajo:

$$328 \frac{\text{días}}{\text{año}} * \frac{24 \text{ hrs.}}{\text{día}} = 7872 \frac{\text{hrs.}}{\text{año}}$$

y si el costo del k watt/hora es de \$ 0.42 entonces:

$$745.7 \text{ kw} * 7872 \frac{\text{hrs.}}{\text{año}} * \frac{\$ 0.42}{\text{kw/hr}} = \$ 2,465,463.17$$

Los costos por concepto de tratamiento de agua y de agua de repuesto son \$ 55,000.00 y \$ 650,000.00 respectivamente.

Finalmente calcularemos el costo anual de la torre:

Costo anual de la torre = costo anual del capital invertido + costo anual de operación.

$$\text{Costo anual del capital invertido} = 0.15 (\$ 2,092,605.00)$$

$$\text{Costo anual del capital invertido} = \$ 313,890.75$$

$$\text{Costos de operación} = \$ 2,465,463.17 + \$ 55,000.00 + 650,000.00$$

$$\text{Costos de operación} = \$ 3,170,463.17$$

$$\text{Por lo tanto el costo anual de la torre} = \$ 3,484,353.92$$

DISCUSION DE RESULTADOS

En este capítulo vamos a analizar los resultados obtenidos.

Comenzaremos por determinar la influencia que tiene la altitud sobre los diferentes tipos de torres de enfriamiento; para esto hacemos las siguientes observaciones:

En la literatura encontramos (4, 13) que a bajas presiones barométricas correspondiendo esto a "altas altitudes", como en el caso de la Ciudad de México, el valor de la entalpía del aire para una temperatura dada se incrementa, con respecto a su valor a bajas altitudes. Al mismo tiempo, conforme aumenta la altitud, la densidad del aire irá disminuyendo; por lo que, en base a esto, la cantidad de aire requerida para el enfriamiento de agua será menor en zonas de mayor altitud. Por esto, las Torres de Tiro Inducido a Contraflujo son las más adecuadas en estas condiciones.

Para zonas de "baja altitud" la densidad del aire será mayor, por lo que se requiere una mayor cantidad de aire y una mejor distribución; de acuerdo a esto, las Torres de Tiro Inducido a Flujo Cruzado y las Torres de Tiro Forzado son las más recomendables.

Su uso está limitado por la velocidad de los vientos dominantes.

Sobre la influencia que las condiciones climatológicas tienen en las torres de enfriamiento, analizando los resultados reportados en las páginas -- (116, 117 y 118) de este trabajo, se puede constatar que en zonas donde la temperatura de bulbo húmedo es menor, como es el caso de la Ciudad de México, se - pueden lograr mayores rangos de enfriamiento y a su vez pequeños valores de --- acercamiento.

Por lo que respecta a los vientos, éstos afectan de la siguiente mane-
ra a las torres de enfriamiento:

En zonas donde el viento alcanza grandes velocidades no tiene gran importancia el tipo de torre (10). En este caso sólo se requiere un sistema adecuado de eliminación de niebla para minimizar las pérdidas por arrastre.

De acuerdo al trabajo y a las observaciones realizadas por los auto--res de este trabajo, pudieron deducir que para zonas donde la velocidad del --viento sea baja las Torres de Tiro Forzado son las más adecuadas. Estas tie--nen la ventaja de que el ventilador está colocado en la parte inferior de la -torre, con lo cual se fuerza al viento a penetrar en ésta; y además que las -torres de tiro. Inducido a Flujo Cruzado y las de Tiro Inducido a Contraflujo no son adecuadas a bajas velocidades del viento y a que no fuerzan el aire ha--cia el interior de una manera tan drástica como ocurre con las torres de tiro--forzado.

El problema que puede presentarse en Torres de Tiro Mecánico a bajas-velocidades de viento, es la recirculación causada por la poca movilidad del -- aire (10). Este problema puede solucionarse empleando motores más potentes para que los ventiladores envíen el aire a mayor altura, con lo que disminuirá -- este efecto.

En lo que al tratamiento de agua para torres de enfriamiento se refiere, la literatura recomienda (1, 17, 18, 19) en términos generales que el agua de enfriamiento debe reunir las siguientes especificaciones:

- a) No debe ser corrosiva.
- b) No debe formar incrustaciones.
- c) No debe causar taponamientos, ni depósitos orgánicos o inorgánicos en el equipo.

Estos factores son importantes, debido a que al emplearse, mantendrá el equipo en buen estado y como consecuencia causará una disminución en los costos de operación y mantenimiento. Para esto se debe tener en cuenta que hay -- tres áreas de cuidado en el tratamiento de agua (1, 17, 18, 19):

Control de ph, inhibidores para prevenir la corrosión de las tuberías y los permutadores y agentes para prevenir el crecimiento de microorganismos y para disminuir los taponamientos.

El ph, que se controla por la adición de ácido sulfúrico o sosa, se -- deberá mantener en 6 a 7. Un ph más alto ocasionaría la remoción de la lignina que mantiene unidas las fibras y por lo tanto es causa de deterioro de la made--ra.

Los inhibidores de corrosión, se seleccionan en base a los productos-químicos que se encuentren en el agua de repuesto y los materiales del equipo - cambiador de calor.

Generalmente los algicidas y fungicidas se deben inyectar de golpe, - para mantener el nivel de agentes químicos. La primera inyección deberá ser a 5 p.p.m. durante un período de 15 a 20 minutos, seguido de una relación más baja para mantener la concentración en 0.5 a 1.0 p.p.m. durante otras dos horas. Generalmente este procedimiento deberá repetirse dos o tres veces a la semana.

Todos estos factores son de vital importancia, puesto que en las torres de enfriamiento el material más utilizado es la madera. Es el material - que bajo costo se puede usar eficientemente, aunque como se mencionó en capítu los anteriores tiene la desventaja de que es susceptible al ataque de la humedad y de microorganismo. Este problema puede ser minimizado, proporcionando a la madera el tratamiento químico adecuado y llevando un control riguroso sobre el agua de enfriamiento.

En México, las altas temperaturas hacen más desventajoso el uso de la madera.

Existen materiales que presentan mayor durabilidad que la madera, como son el concreto o el asbesto cemento; combinándolos con otros materiales que se usan para el empaque como son: el p.v.c., el acero inoxidable o la lámina galva nizada. Esta última es menos durable que los anteriores por ser susceptible a la oxidación y a la corrosión.

La gran desventaja que presentan todos estos materiales en relación con la madera es que son incosteables; tanto su construcción como su mantenimiento debido a que sus costos son relativamente más altos. En México se han instalado torres con estructura de concreto en lugares con climas calurosos y húmedos como en Coatzacoalcos, Cosoleacaque, Poza Rica, Cd. Madero, etc. con objeto de disminuir el ataque de microorganismos.

Las torres de madera se instalan con mayor facilidad y rapidez, por lo que su instalación y mantenimiento serán menos costosos.

Dependiendo del factor que consideremos más importante, será el tipo de torre que se seleccione, tomando en cuenta las ventajas y desventajas que cada tipo de torre ofrece como se ha mencionado en capítulos anteriores.

Los resultados de los cálculos efectuados para evaluar la altura en torres de enfriamiento, aparecen en la tabla "A". Se puede observar que el método que se apegó más a la información obtenida fue a partir de la Integración Numérica. El porcentaje de error obtenido a partir de este método fué mínimo comparado con los otros.

El método de la Fuerza Impulsora Media Logarítmica, resultó ser el segundo método con el cual los resultados obtenidos se acercaron más a la realidad; haciéndose notar que el porcentaje de error calculado para la torre del complejo petroquímico de Cosoleacaque fue muy alto, debido principalmente a que su eficiencia de operación fue muy baja. Los resultados obtenidos a partir del método gráfico de Baker se alejaron más de las alturas reales. Con toda seguridad hubo errores de apreciación, puesto que se trata de un método gráfico.

T A B L A A

Torres de Enfriamiento (Ubicación)	Alturas Reales (ft)	Método Baker	Fuerza Impulsora Media Logarítmica	Método de Integración Numérica
Refinería D.F.	28	21.69	27.45	28
% Error		23	2	--
Refinería Cd. Madero	28.4	23.88	25.17	28.41
% Error		16	11	--
Com. Cosoleacaque.	39	63.46	117.25	39
% Error		63	200	--

Después de haber determinado que el método de integración numérica -- fue el más adecuado para nuestros cálculos, decidimos analizar la influencia de la variación de las temperaturas de bulbo húmedo sobre las alturas de las torres, tomando los valores máximo y mínimo para calcularlas. Los resultados se muestran en la tabla "B" y de allí concluimos lo siguiente:

Con los cálculos realizados a partir de las temperaturas de bulbo húmedo mínima y máxima, las alturas obtenidas resultaron menores que las calculadas con las temperaturas de bulbo húmedo promedio. Si se analizan estos resultados detenidamente, veremos que con las evaluaciones efectuadas usando la temperatura mínima, la altura de la torre fué menor, ya que si las temperaturas de bulbo húmedo son bajas la altura debe ser menor para un enfriamiento dado, puesto que el área de transferencia requerida es menor.

Con la temperatura máxima las alturas reales de las torres deberían ser mayores con respecto a las calculadas por los autores de este trabajo con las temperaturas promedio. Esto no se observa en la tabla "B" debido a que los datos para hacer los cálculos de las alturas fueron tomados de las torres en el momento en que se midieron las temperaturas de bulbo húmedo, mínima y máxima; esto implicaba que se habían ajustado las condiciones de operación para obtener el enfriamiento deseado, razón por la cual no se obtuvieron los resultados esperados teóricamente.

Las variaciones más notables con respecto a las condiciones de operación, se presentaron en las torres de Ciudad Madero y Cosoleacaque, y con menor intensidad en el Distrito Federal, porque la distribución de temperaturas en ese lugar fué más uniforme.

Tabla B

Alturas Calculadas (ft)

Temperaturas	Refinería D. F.	Refinería Cd. Madero	Complejo Cosoleacaque
T_{bh} Máxima	25.65	14.87	21.14
T_{bh} Mínima	21.49	22.19	45.47
T_{bh} Promedio	28	28.4	39

Finalmente discutiremos los resultados obtenidos en función de las -- eficiencias calculadas durante la operación de estas torres, y cuyos valores son: para la torre del Distrito Federal 99.08%; para la de Ciudad Madero, 91.24% y -- para la del Complejo Cosoleacaque 53.51%. Estas evaluaciones nos determinan -- que la torre de enfriamiento instalada en la refinería "18 de Marzo" opera más-- eficientemente que las torres ubicadas en la refinería de Cd. Madero (Tamauli-- pas) y en el Complejo Petroquímico de Cosoleacaque (Veracruz). Esto se debe a las bajas temperaturas de bulbo húmedo registradas, lo que da como consecuencia bajas humedades relativas, que repercuten en altas eficiencias de operación.

En las tablas donde se registran las diferentes temperaturas de bulbo húmedo obtenidas durante la inspección de estas torres, notamos que las varia-- ciones de las mismas en el Distrito Federal, fueron despreciables con respecto a las variaciones detectadas en Tamaulipas y Veracruz.

Creemos conveniente hacer notar que la baja eficiencia de operación -- de la torre del Complejo de Cosoleacaque se debió principalmente, a la continua variación de las temperaturas de bulbo húmedo y a la falta de mantenimiento al sistema de eliminadores de niebla, puesto que con el que cuenta actualmente se encuentra en muy malas condiciones, lo que ocasiona un exagerado arrastre de va-- por y altos porcentajes de recirculación.

En las localidades donde se realizó este estudio se observó que el -- uso de las torres de Tiro Natural está muy limitado en México, debido principa-- lmente a las condiciones climatológicas prevalecientes en el país, razón por la cual las torres de enfriamiento de Tiro Mecánico son las más empleadas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del trabajo realizado por los autores y de la bibliografía manejada en la presente tesis, se puede concluir y recomendar lo siguiente:

1). En zonas donde prevalecen bajas temperaturas de bulbo húmedo, se logran mayores rangos de enfriamiento.

2).- En zonas donde la velocidad del viento sea baja, las torres de enfriamiento de Tiro Forzado son más adecuadas.

3). Existe mayor recirculación en sitios donde la velocidad de los vientos prevalecientes es baja.

4) Las torres de Tiro Inducido a Contraflujo son las más adecuadas para zonas de gran altitud.

5) Las torres de Tiro Inducido a Flujo Cruzado son más adecuadas para zonas de baja altitud.

6). Las condiciones climatológicas en México no se prestan al empleo de torres de Tiro Natural.

7). Los problemas ocasionados por la presencia de corrosión, incrustación y ensuciamiento en las torres de enfriamiento son:

- a) Reducción del área de flujo.
- b) Reducción del área de intercambio de calor.
- c) Incrementan el uso del agua de enfriamiento.
- d) Incrementan los costos de bombeo.
- e) Fallas en el equipo.
- f) Paros no programados.
- g) Reducen la vida del equipo.
- h) Evitan el funcionamiento de los inhibidores de corrosión.
- i) Ocasionan pérdidas de tiempo y dinero.

8). El método de cálculo propuesto para rediseñar estas torres resultó ser bastante aceptable.

9). La torre de enfriamiento de la Refinería "18 de Marzo" obtuvo la más alta eficiencia de operación.

10). El material más usado en la construcción de las torres de enfriamiento en México es la madera.

11) Un buen procedimiento de operación y una inspección programada, - eleva la eficiencia de operación y conserva bajos los costos de mantenimiento.

G L O S A R I O

En este último capítulo vamos a definir a todos aquellos términos- que fueron usados durante el desarrollo de este trabajo, los cuales no son ne cesariamente explicados por si mismos.

Empezaremos por definir lo que es una torre de Enfriamiento: es un dispositivo cerrado, diseñado para el enfriamiento por evaporación de agua -- por contacto con aire.

Temperatura de bulbo seco. (T_{yb})

Es la temperatura del aire ambiente medida con un termómetro. Usa remos el sub-índice T_{yb} para indicar que es a la entrada de la torre y t_{yb} para indicar que es a la salida de la misma.

Temperatura de Bulbo Húmedo. (T_{bh})

Es la temperatura medida con un termometro cuyo bulbo se encuentra cubierto con una tela porosa humedecida y bajo una corriente continua de aire.

Humedad absoluta (Y')

Es la masa de agua contenida en la unidad de masa de aire seco, y- depende sólo de la presión parcial de vapor en la mezcla, está definida por - la siguiente expresión:

$$Y' = \frac{PMA}{PMB} \frac{\bar{P}A}{1-\bar{P}A}$$

Humedad de saturación (Y's)

Es cuando se alcanza el equilibrio gas-líquido

$$Y's = \frac{PMA}{PM} \frac{PA}{1-PA}$$

Humedad Relativa (Y'r)

Es la relación de la humedad real del sistema con la humedad de saturación posible a la temperatura del sistema.

$$Y'r = \frac{\bar{P}A}{PA} \times 100$$

Humedad por ciento (Y'%)

Es la relación de la humedad absoluta a la humedad de saturación - por cien.

$$Y'\% = \frac{Y'}{Y's} (100) = Y_r \frac{(1-PA)}{(1-PA)}$$

Volumen Húmedo (Vh)

Se llama así a el volumen de la unidad de masa del gas o del aire-seco más el volumen de vapor que contenga el gas a la presión y temperatura a que este el sistema.

$$V_h = 0.730 \frac{I}{P} = (0.0345 + 0.0556 Y') \frac{\text{ft}}{\text{lb aire seco}}$$

Temperatura de Rocío (T_r)

Es la temperatura a la que es preciso enfriar una mezcla de gas y vapor (a humedad absoluta constante) para que se sature.

Calor Húmedo (C_s)

Es la cantidad de calor necesario para aumentar un grado la temperatura del aire más toda la humedad que contenga.

$$C_s = C_{pB} + C_{pA} \cdot Y' = 0.24 + 0.45 Y' \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}}$$

Entalpia total (H_y)

Es la entalpia de la unidad de masa del gas más la del vapor que le acompaña o es la cantidad de calor necesaria para llevar el sistema desde la temperatura de referencia hasta la temperatura a la cual se encuentra el sistema.

$$H_y = C_p (t - t_0) + 0 \cdot Y' + C_{pa} (T - T_0) Y' \frac{\text{BTU}}{\text{lb a.s.}}$$

$$H_y = C_s (T - T_0) + 0 \cdot Y'$$

Temperatura de saturación adiabática (T_s)

Es la temperatura a la cual se enfría la unidad de masa de gas en contacto con el líquido, cuando ese gas se satura con vapor del líquido, sin agregar ni quitar calor.

$$T_s = T - \frac{S}{C_s} (Y'_s - Y')$$

Rango de Enfriamiento ($R = T_{xd} - T_{xb}$)

El número de grados que es enfriada el agua a través de la torre. Es la diferencia entre la temperatura del agua caliente a la entrada y la temperatura del agua a la salida.

Acercamiento ($A = T_{xb} - T_{hb}$)

La diferencia en temperatura entre el agua fría que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra. Esto es importante porque sin maquinaciones especiales la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra es la más baja temperatura a la cual el agua puede ser enfriada.

Carga Térmica (Q)

La cantidad de calor disipado en la torre de enfriamiento en BTU/min. Esto es igual a el peso de el agua circulada por unidad de tiempo multiplicada por el rango de enfriamiento. En general existen 5 formas de aumentar la capacidad de la torre:

- 1) Incrementar la velocidad del aire sobre la superficie de agua expuesta;
- 2) Incrementar el área superficial de el agua;
- 3) Bajar la presión atmosférica (incrementar la altitud arriba -- del nivel del mar);
- 4) Elevar la temperatura del agua que entra;
- 5) reducir el contenido de vapor (humedad) del aire que entra.

Velocidad de Circulación

La velocidad a la cual el agua es bombeada a la torre en unidades de volumen por unidad de tiempo o la relación entre el rango, la carga térmica y la velocidad de circulación es:

$$\text{Velocidad de circulación (lb/min)} = \frac{Q \text{ (BTU/min)}}{R \text{ (°F)}}$$

Arrastre ("carry-over")

El agua que es transportada de la torre de enfriamiento en forma de finas gotitas en el aire circulante.

Purga.

El consumo continuo o intermitente de una porción de el agua de circulación para minimizar el aumento perjudicial en las concentraciones de sólidos disueltos en el agua.

La purga es usualmente expresada como un porcentaje del agua de repuesto o como un volumen por unidad de tiempo.

$$\text{Porcentaje de purga} = \frac{\text{PPM cloruros en H}_2\text{O de repuesto} * 100}{\text{PPM cloruros en el H}_2\text{O circulante}}$$

Ciclos de concentración.

Este valor es el inverso de la purga.

$$\text{Ciclos} = \frac{\text{PPM cloruros en H}_2\text{O circulante}}{\text{PPM de cloruros en H}_2\text{O de repuesto}}$$

Velocidad de Evaporación.

La velocidad a la cual el agua está siendo evaporada para enfriar el agua circulante, está dada en volumen por minuto.

Se requiere (dependiendo de la temperatura) cerca de 1000 BTU para evaporar una libra de agua. Este calor de evaporación es suministrado por la refrigeración de el agua circulante.

$$\text{Vel. de Evaporación} = \frac{\text{rango}}{10} \times \frac{\text{Vel. de circulación}}{100}$$

Velocidad de Repuesto.

El volumen de agua por minuto, que es requerido para sustituir el agua evaporada y perdida para purgas.

Capacidad.

La cantidad promedio de agua circulante en un sistema de enfriamiento en algún tiempo dado.

Concentración de Agua

La velocidad a la cual el agua esta cayendo a través de la torre - de enfriamiento expresada como volumen por unidad de tiempo por unidad de área de la torre.

Tiempo de Retención.

El tiempo requerido para que el agua caiga de el tubo de distribución al estanque de la torre.

Recirculación de Aire.

El aire que esta siendo regresado a la torre; una vez que a pasado a través de ella.

Factor de Enfriamiento ($B = L/G$).

La relación de las libras de agua seca que están siendo circuladas por unidad de tiempo, a las libras de aire seco por unidad de tiempo las cuales están enfriando el agua.

Alberca o Estanque

La porción de la torre debajo de la sección de enfriamiento usada para coleccionar y retener el agua fría.

BIBLIOGRAFIA

- 1).- Babritt, Harold E. and E. Robert Baumann. Alcantarillado y Tratamiento de agua.
- 2).- Chemical Eng. Progress. Performance of Cooling Towers Packings
- 3).- Chenault, W. B. Spot Cooling Tower Trouble in a Hurry. Hydrocarbon Processing - Petroleum Refiner. June 1962, Vol. 41, No. 6.
- 4).- Chilton, H. Trans. Inst. Chem. Eng. British (30), 1952.
- 5).- Cooling Tower Institute. Effect of Altitud on Cooling Towers, Rating and Performance. Bulletin. TPR - 125, Houston, Texas.
- 6).- Cooling Tower Institute. Performance. Curves. Houston Texas.
- 7).- Elonka, S. and R. H. Marks. Especial Proj. Editor. Cooling Towers.
- 8).- Fluor Corporation, Ltd. Los Angeles, Calif.
- 9).- Foust A.S., J. A. Wenzel, C. W. Clump, L. Maus and L. B. Andersen. Principios de Operaciones Unitarias. CECSA. 1972.

- 10).- Gurney, J.D. and I. A. Cotter. Cooling Towers. Mac. Laren-Sons L.T., - London, 1966.
- 11).- Herrman, D.D. A Field Test for Cooling Tower Fans. Hydrocarbon Processing -Petroleum Refiner. June 1962, Vol. 41, No. 6.
- 12).- I.M.I.Q., Revista, Mayo 1973.
- 13).- Kelly, N.W. and L.K. Swenson, Chem. Eng. Prog. 52, No. 7 (1956) 263.
- 14).- Ludwig, E.E. Applied Process Design For Chemical and Petrochemical Plants. Vol. II Gulf Publishing Company. Houston, Texas.
- 15).- Marley Co. Protecting Cooling Tower Lumber.
- 16).- Marley Co. Chemically Treating Cooling Tower Lumber Protects Against Fungus Attack. Kansas City.
- 17).- Mc. Kelvey, K.K. and M. Brooke. The Industrial Cooling Tower. Elsevier - Publishing Company.
- 18).- Nalco Chemical Company. Introducción al Tratamiento de Agua para Enfriamiento. Chicago, Illinois.
- 19).- Perry, John. A. Chemical Engineers Handbook 4a. Edition. Mc. Graw - Hill Book Co. Inc. New York.
- 20).- Pritchard, J.F. Operation - Maintenance. Instruccions for Mechanical -- Draff Cooling Towers. California.
- 21).- Pritchard, J.F. and Co. Tablas. California.
- 22).- Sawitowsky H. and W. Smith. Métodos de Cálculo en los Procesos de Transferecia de Materia. John Wiley and Sons. New York.

- 23).- Standard Specifications. CTI. Code Tower.
- 24).- Standard Specifications. CTI. Code Tower. Nomenclature.
- 25).- Standard Specifications. CTI. Code Tower. Recommendations for Maximum Life of Cooling Tower Lumber.
- 26).- Standard Specifications. CTI. Code Tower. Wood Maintenance Towers.
- 27).- Treybal R.E., Mass Transfer Operations. Second Edition. Mc. Graw Hill--kagakusha.