



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

" DISEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA DE TIRO INDUCIDO  
PARA OPERAR EN TIZAYUCA, HGO. "

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A N

MANUEL MIGUEL LOPEZ RAMOS  
FRANCISCO JAVIER MARTINEZ SANCHEZ

MEXICO, D.F.

1977



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

Tesis 1977

DO M- 243

ECMA \_\_\_\_\_

\*RBC \_\_\_\_\_

• \_\_\_\_\_



QUIMICA

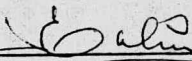
JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Prof. JOSE E. GALINDO FUENTES  
VOCAL: Prof. CUTBERTO RAMIREZ CASTILLO  
SECRETARIO: Prof. CARLOS DOORMANN MONTERO  
1er. SUPLENTE: Prof. ROBERTO ANDRADE CRUZ  
2do. SUPLENTE: Prof. CARLOS BAZAN VILLEGAS

LUGAR DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

TIZAYUCA, HGO.

ASESOR DEL TEMA:

  
\_\_\_\_\_  
I.Q. JOSE E. GALINDO FUENTES.

SUSTENTANTES:

MANUEL MIGUEL LOPEZ RAMOS \_\_\_\_\_

FRANCISCO JAVIER MARTINEZ SANCHEZ \_\_\_\_\_



**A NUESTROS PADRES**

**MANUEL LOPEZ GARCIA**

**IGNACIO MARTINEZ SALAZAR**

**CARMEN RAMOS DE LOPEZ**

**JOSEFINA SANCHEZ DE MARTINEZ**

**Con eterna gratitud y reconocimiento**

**Por habernos llevado por el buen camino.**

**Que teniendo poco, lo dan todo.**

**Porque creen en la vida y en la generosidad de la vida.**

**Que dan con alegría, y esa alegría es su recompensa.**

**A NUESTROS HERMANOS**

**- HERMINIO, PABLO, JUAN, GUADALUPE, ROSA, JOSE, ANDRES -**

**- RICARDO, GUADALUPE, JUAN, RAMON -**

**Con admiración y cariño.**

**Para que siempre sigan por el camino recto de la vida.**

**Para que logren llegar a su meta trazada.**

**A LOS SEÑORES**

Ing. JOSE GALINDO

Ing. MANUEL ZAVALA

Ing. GUSTAVO SANDOVAL

Prof. PATRICIO TOLEDANO

**Por su colaboración desinteresada.**

**A NUESTROS AMIGOS**

Que son nuestro campo que sembramos,  
Y que con gratitud cosechamos,  
Amistad, respeto, cariño.

## INDICE

- I.- Introducción y objetivos.
- II.- Generalidades.
  - 1).- Operaciones difusionales.
  - 2).- Sistema contacto directo gas-líquido.
- III.- Humidificación y enfriamiento de agua.
- IV.- Torres de enfriamiento y su clasificación.
- V.- Introducción al tratamiento de aguas para enfriamiento.
- VI.- Instrumentos para evaluar el rendimiento de las torres de enfriamiento.
- VII.- Generalidades sobre el lugar de operación de la torre.
- VIII.- Desarrollo de las ecuaciones fundamentales para el diseño del equipo.
- IX.- Cálculos y resultados.
- X.- Costos.
- XI.- Conclusiones.
- XII.- Bibliografía.

**I.- INTRODUCCION Y OBJETIVOS.**

Nuestro país está dotado de una gran variedad de recursos naturales, tierras, bosques y riqueza mineral, incluyendo el petróleo. Todos son dones de la naturaleza que han sido aprovechados para edificar una civilización que crece rápidamente.

Con el desarrollo de la industria el agua ha sido empleada ruinosamente, sin atender a su ciclo natural. Todas estas prácticas ruinosas han contribuido a reducir la cantidad de agua disponible precisamente en una época en que las necesidades crecen sin cesar.

Hasta fecha muy reciente el hombre no ha intentado controlar o conservar el agua, excepto en una medida muy limitada para fines de abastecimiento urbano e irrigación.

El uso repetido del agua en los procesos industriales debe ser uno de los pasos básicos de todo programa de conservación del agua, así un mismo caudal de agua puede aprovecharse para usos múltiples.

En numerosas zonas ha de recurrirse a la utilización de aguas sucias o duras que antes se desechaban, lo cual obliga a la instalación de costosas plantas de tratamiento que permiten la utilización de dichas aguas.

En las plantas de procesamiento industrial en las que se requiere una gran cantidad de agua de enfriamiento y donde los depósitos naturales de agua subterránea han sido agotados, se usa nuevamente el agua que ha circulado por la planta de proceso. El empleo de un sistema de recirculación entraña precisamente el uso de un equipo especializado para eliminar del agua el calor que ésta ha recogido a su paso por la planta; y este equipo es la torre de enfriamiento.

El objetivo principal de esta tesis es indudablemente el diseño teórico de un equipo de enfriamiento de agua por contacto directo con aire, siguiendo una secuencia de cálculo adquirida de la literatura técnica existente; así como la orientación y búsqueda de datos prácticos que ayudarán a obtener el equipo más conveniente para la conservación y uso del agua; además, para este caso general de enfriamiento de agua se elige una región con un gran futuro de industrialización.

Otra característica, es la comparación de este diseño teórico, con los diseños recomendados por los fabricantes y la adaptabilidad de estos para la operación deseada.

II.- GENERALIDADES.

1).-Operaciones difusionales.

2).-Sistema contacto directo gas-líquido.

En un proceso de enfriamiento de agua, todo lo que se requiere para enfriar el agua es exponer su superficie al aire, para hacer una eliminación de la carga calorífica que lleva consigo.

El agua caliente por haber pasado a través de numerosos dispositivos como pueden ser: Intercambiadores de calor, condensadores, etc., se enfría por contacto directo con el aire atmosférico para volver a ser utilizado. En esta forma se logra que una gran cantidad de agua recobre una temperatura lo suficientemente baja para permitir enfriamiento en la planta.

La transmisión de calor comprende una transmisión de calor latente debido al cambio de estado de líquido a vapor, de una pequeña porción del agua, y una transmisión de calor sensible debido a la diferencia de las temperaturas del agua y del aire.

El enfriamiento se explica debido a que el calor latente del agua es tan grande que la evaporación de pequeñas cantidades del agua produce efectos muy grandes de enfriamiento, donde la transferencia de masa es pequeña como generalmente sucede.

En los siguientes incisos se mencionarán en forma clara los procesos simultáneos de transferencia de masa y calor en el sistema de contacto directo gas-líquido (aire-agua), y una clasificación de los equipos usados en el enfriamiento de agua, como también el desarrollo entálpico para el cálculo teórico de estos equipos.

#### OPERACIONES DIFUSIONALES.

Las operaciones unitarias que constituyen lo que conocemos con el nombre de Ingeniería Química, se aplican en la industria de procesamiento químico para cambiar las composiciones de las mezclas y soluciones por medio de métodos que no implican necesariamente reacciones químicas. Estas operaciones se refieren a la separación de una sustancia en sus componentes; separación que puede ser de tipo mecánico en el caso de mezclas, y como ejemplo tendríamos: La filtración, la decantación, cernido, etc. Cuando las operaciones se relacionan con cambios en la composición de las soluciones, se conoce como operaciones con transferencia de masa que se caracterizan por la transferencia molecular de una sustancia "A" a través de otra sustancia "B". Por ejemplo, cuan-



do se tiene un recipiente que contiene agua "A", a una temperatura constante "t" y aire relativamente húmedo "B", a la misma temperatura; ocurrirá que el vapor de agua pasa a la corriente de aire que fluye sobre la superficie acuosa, las moléculas superficiales del aire reciben a las moléculas de vapor de agua, que llegan hasta el seno de la corriente de aire donde entonces son arrastradas. En este caso la transferencia de masa es el resultado de una diferencia en la concentración o gradiente que se establece, ya que la sustancia que se difunde se desplaza desde un lugar de alta concentración a otro de baja concentración.

Quando se promueve un movimiento difusional de masa entre dos fases, mediante una diferencia de concentración, que puede ser un gradiente de presión o temperatura, la difusión se caracteriza por el hecho de que el material se transfiere de una fase a otra o entre las dos fases. La difusión no está restringida a una transferencia molecular a través de una capa estacionaria, sino que también tiene lugar en fases fluídas por mezcla física y por los remolinos de flujos turbulentos.

Generalmente el proceso de difusión es acompañado por un flujo de la mezcla y frecuentemente asociado a un flujo de calor. El conocimiento de la teoría difusional es evidentemente un buen fundamento para el estudio de la transferencia de masa y calor, base del enfriamiento de agua.

En la clasificación de las distintas formas en que se llevan a cabo las operaciones difusionales, se mencionarán únicamente sus definiciones para tener un concepto claro y general.

a.-Contacto directo de dos fases inmiscibles con transferencia de masa a través de la superficie interfacial.

Esto es un sistema de varios componentes distribuidos diferentemente entre las fases. Cuando las dos fases entran inicialmente en contacto, el sistema intenta alcanzar el equilibrio mediante un movimiento relativamente lento de difusión de los constituyentes entre las fases. Los tres estados de agregación gas, líquido y sólido, permiten seis posibilidades de contacto de fases.

a.1.-Gas-gas.-Todos los gases son completamente solubles entre si, esta categoría no se realiza en la práctica.

a.2.-Gas-líquido.-Quando todos los componentes del sistema se distribuyen entre las fases en equilibrio, y a esta ope-

ración se le conoce como destilación. Aquí la fase gaseosa se produce a partir del líquido, por aplicación de calor; o se produce líquido a partir de vapor quitando calor. Otro caso es la absorción gaseosa en la cual se pone en contacto una mezcla gaseosa con un líquido, con el propósito de disolver uno o más componentes del gas. Y cuando la dirección de la transferencia del soluto es opuesta, a esta categoría se le conoce como desorción.

Si la fase líquida es un líquido puro que contiene un sólo componente, mientras que el gas contiene dos o más, la operación es de humidificación o de dehumidificación, según la dirección de la transferencia.

a.3.-Gas-sólido.-Como clásico ejemplo tenemos la sublimación fraccionada que sucede cuando un sólido se vaporiza parcialmente, sin la aparición de una fase líquida; la fase vapor que se forma y el sólido residual contienen cada uno de los componentes originales pero en proporciones distintas, ejemplos de este tipo de operaciones son el secado y la adsorción.

a.3.1.-Secado.-Si un sólido humedecido con un líquido volátil se expone a la acción de un gas relativamente seco, el líquido abandonará al sólido y se difundirá en el gas; operación que se conoce algunas veces como desorción. La difusión se produce desde el sólido a la fase gaseosa. Si la difusión tiene lugar en dirección opuesta, la operación se conoce como adsorción.

a.3.2.-Adsorción.-Si una mezcla de gas inerte-vapor volátil, se pone en contacto con un sólido y el vapor se difunde hacia el sólido, el cual lo retiene fuertemente, y así se obtiene un gas seco. En otros casos si la mezcla gaseosa tiene varios componentes cada uno de los cuales es adsorbido en un sólido pero en distintas cantidades; a esta operación se le llama adsorción fraccionada. Como conclusión, el secado comprende contactos gas-sólido, con la transferencia de masa en la dirección del sólido al gas. Y la adsorción comprende el contacto de sólido con líquidos o gases, con la transferencia de masa en la dirección del fluido al sólido.

- a.4.-Líquido-líquido.--Así conocemos a la operación de extracción líquida y que se define de la siguiente manera: Es la separación de los componentes de una solución líquida por medio del contacto con otro líquido insoluble. Si las sustancias que componen la solución original se distribuyen entre si en forma distinta entre las dos fases líquidas, se producirá un cierto grado de separación, el que se puede acrecentar mediante el empleo de contactos múltiples.
- a.5.-Líquido-sólido.--Cuando todos los componentes están presentes en ambas fases en equilibrio, teniendo así las operaciones de cristalización y lixiviación ( o extracción con solventes ).
- a.5.1.-Cristalización.--Es una operación de recuperación del soluto. Si este se efectúa enfriando gradualmente la solución saturada, se desarrolla transferencia de masa desde el seno de la solución hacia la superficie cristalina, donde se tiene también la transferencia de calor sensible y de calor de disolución. Cuando la producción de componente puro precipitado no puede ser mayor, esta dificultad se resuelve por medio de la ebullición o evaporación del componente volátil, de bajo punto de fusión; ejemplo, "A" componente volátil y "B" un sólido no volátil, y si se lleva la evaporación hasta el punto de secado, puede ser completa la producción del producto no volátil. Cuando los componentes de una mezcla binaria son de muy baja volatilidad relativa, no serán de utilidad la ebullición ni la evaporación.
- a.5.2.-Lixiviación.--Es la solución selectiva de uno o mas componentes de una mezcla sólida por medio del contacto -- con un solvente líquido. La operación de lixiviación se lleva principalmente a cabo de dos distintas formas: El rociado o goteo del líquido sobre el sólido y la completa inmersión del sólido en el líquido.
- a.6.-Sólido-sólido.--En esta categoría no existe operación industrial de separación debido a la lenta separación o velocidad de difusión entre fases sólidas.

b.-Contacto de fases miscibles separadas por una membrana permeable o semipermeable con difusión a través de la membrana.

En esta operación la membrana opera de diferente modo, según la naturaleza de la separación a realizar. La membrana permite la separación de un componente mediante un control selectivo del paso de los componentes de un lado a otro. Dentro de esta categoría se encuentran los siguientes sistemas.

b.1.-Gas-gas.-Cuando una mezcla gaseosa cuyos componentes son de distintos pesos moleculares, se pone en contacto con una membrana microporosa; los distintos componentes del gas pasan a través de los poros a velocidades que dependen de los pesos moleculares, lograndose así la difusión. No hay que confundir con la penetración, puesto que cuando esto ocurre la membrana no es porosa, y el gas que pasa a través de la membrana se disuelve primero en ella y luego la atraviesa; en este caso la separación se lleva a cabo principalmente por la diferencia de solubilidad de los componentes.

b.2.-Gas-líquido.-La operación sucede por penetración por ejemplo, cuando una mezcla líquida binaria se pone en contacto con una membrana no porosa apropiada, en la cual se disuelve preferentemente uno de los componentes después de atravesar la membrana, éste se vaporiza.

b.3.-Líquido-líquido.-Se tienen varias formas de separación; como son: La diálisis, diálisis fraccionada, electrodiálisis y ósmosis.

b.3.1.-Diálisis.-La separación de una sustancia cristalina de un coloide, por contacto entre la solución y un solvente líquido interviniendo una membrana permeable sólo al solvente y a la sustancia cristalina disuelta.

b.3.2.-Diálisis fraccionada.-Esto es de acuerdo a la diferencia de permeabilidad de la membrana para dos sustancias cristalinas que se quieran separar.

b.3.3.-Electrodiálisis.-Cuando se aplica a través de la membrana una fuerza electromotriz para ayudar a la difusión de partículas cargadas.

b.3.4.-Ósmosis.-Si una solución se halla separada del solvente puro por una membrana que es sólo permeable al solvente, éste se difunde dentro de la solución.

c.-Contacto directo de fases miscibles.

Este tipo de operación no se practica en forma industrial raras veces se llevan a cabo, debido a la dificultad de mantener gradientes de concentración sin mezclar el fluido. Las operaciones más conocidas son: Difusión térmica y de arrastre y centrifugación.

c.1.-Difusión térmica.-Cuando dentro de una fase única, líquida o gaseosa, se forma una diferencia de concentración por medio de un gradiente de temperatura sobre el fluido, efectuándose una separación de los componentes de la solución.

c.2.-Difusión de arrastre.-Por ejemplo, si un vapor condensable ( vapor de agua ) , se difunde a través de una mezcla gaseosa, preferentemente arrastrará consigo a uno de los componentes, realizando así la operación de difusión.

c.3.-Centrifugación.-Si se somete una mezcla gaseosa a la separación de sus componentes debido a las fuerzas que actúan en forma distinta sobre las diversas moléculas, en razón de la diferencia de sus masas, así las moléculas más pesadas tienden a acumularse en la periferia de la centrífuga.

d.-Utilización de los fenómenos de superficie.

Cuando las sustancias que al ser disueltas en un líquido producen una solución de menor tensión superficial; luego si se burbujea un gas (aire) en la solución, se forma una espuma de gran superficie y así se obtiene la espuma que arrastrará al soluto, llevándose así la separación. Al tipo de operación antes mencionada se le conoce como: Separación con espuma.

Las operaciones que dependen del contacto de dos fases inmiscibles incluyen los casos más importantes; hay métodos característicos para llevar a cabo estas operaciones difusionales, atendiendo a la clase de flujo o a la forma de contacto de sus fases.

De acuerdo con el flujo de las fases se tienen los procesos continuo o permanente y discontinuo o intermitente.

Proceso permanente.-La concentración de cualquier posición del sistema permanece constante al transcurrir el tiempo y podrá trabajarse como: Flujo paralelo y flujo a contracorriente.

Flujo paralelo.-Las fases se mueven a través del equipo en la misma dirección y la operación equivale a una etapa.

Flujo a contracorriente.-Las fases fluyen en dirección opuesta y la operación equivale a varias etapas.

Proceso intermitente.-La concentración de cada posición cambia con el tiempo.

Las operaciones de contacto de dos fases inmiscibles incluyen también las operaciones directas y las operaciones indirectas.

Operaciones directas.-Se producen dos fases a partir de una solución de una sola fase mediante la adición o la extracción de calor, por ejemplo, la destilación fraccionada y la cristalización.

Operaciones indirectas.-Implican la adición de una sustancia para llevar a cabo la separación; comprenden la absorción gaseosa, la desorción, adsorción, secado, lixiviación y la extracción líquida.

Para tener una idea clara del proceso en su formación global habrá que entender los fenómenos que se producen en el interior de cada fase, explicando en primer lugar los principios de transferencia de masa por difusión molecular y turbulento en el interior de cada fase.

DIFUSION MOLECULAR.-Se refiere al movimiento de las moléculas individuales a través de una sustancia, en virtud de su energía térmica.

De acuerdo a la teoría cinética, se considera que una molécula se mueve en línea recta a una velocidad uniforme hasta que choca con otra molécula, cambiando su velocidad en dirección y magnitud. La distancia media recorrida por la molécula entre colisiones se denomina como "camino libre medio" y su velocidad media depende de la temperatura.

El fenómeno de difusión molecular conduce finalmente a una concentración completamente uniforme de las sustancias a través de una solución al paso del tiempo. El régimen al cual se transfiere un componente desde una fase a la otra depende de un coeficiente denominado de transferencia o de régimen de transferencia de masa, y del grado de desviación del sistema del estado de



equilibrio.

Los coeficientes de transferencia de masa son de gran importancia, ya que, los mismos, al regular la velocidad a la cual nos aproximamos al equilibrio controlan el tiempo requerido para la operación y por lo tanto, el tamaño y costo del equipo usado.

Si una solución no es completamente uniforme en la concentración de sus componentes, la solución se dirige espontáneamente por difusión al estado uniforme moviéndose las sustancias desde el lugar de mayor concentración hacia el de menor concentración. En consecuencia, el régimen al cual se mueve el soluto, en cualquier punto y en una dirección cualquiera, deberá depender del gradiente de concentración en ese punto y en esa dirección.

Los regímenes están considerados más convenientemente en términos de un flujo molar, o moles por unidad de tiempo y por área, midiendo el área en dirección normal a la de la difusión. En una solución binaria no uniforme, los dos constituyentes deben difundirse si el resultado final es la uniformidad, y esto conduce al uso de dos flujos para describir el movimiento de un componente.

$N_A$  = Es el flujo relativo a un lugar fijo en el espacio.

$J_A$  = Es el flujo de un componente relativo a la velocidad molar media de todos los componentes.

El primero de estos dos es de importancia en las aplicaciones del proyecto del equipo, pero el segundo es más característico de la naturaleza del componente.

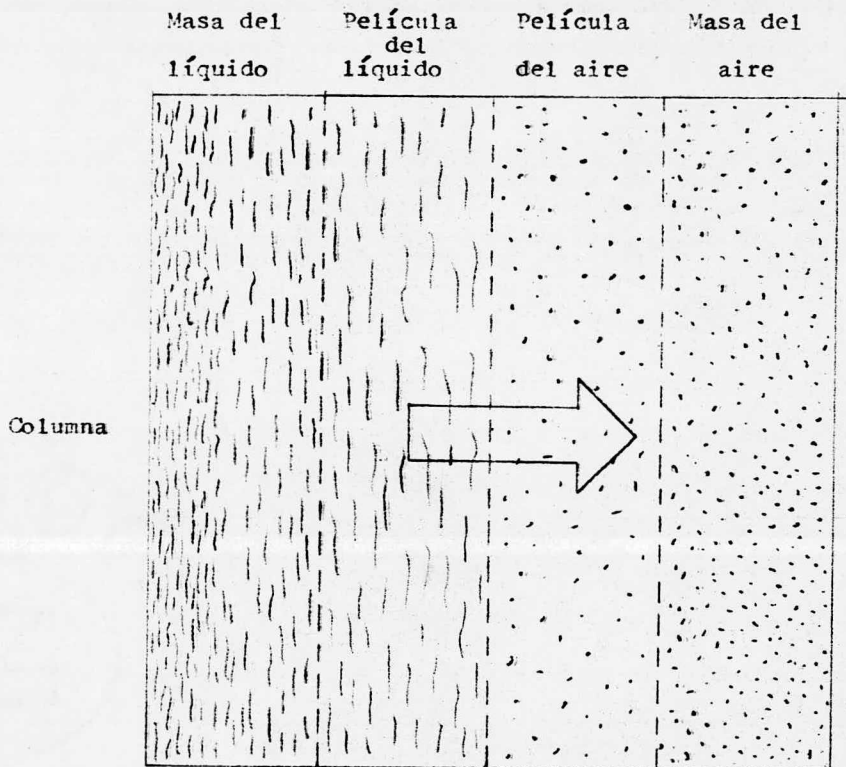
Un esquema idealizado de una de las teorías de la difusión se muestra en la figura # 1 .

Si el aire seco a temperatura constante se satura con agua a la misma temperatura en un aparato de contacto directo, la humedad de la mezcla aire-agua-vapor aumenta durante la saturación, debido a que la presión del vapor de agua que sale del líquido es mayor que aquella en el aire no saturado, dando por resultado una vaporización.

Para una solución binaria de "A" y "B", de composición no uniforme habrá una interdifusión que puede ser expresada en términos de sus velocidades lineales. La diferencia de concentración ( $dp_A$ ), que actúa como fuerza motriz, es proporcional a la velocidad relativa de "A" con respecto a "B", la concentración molecu

FIGURA # 1

Teoría de la película mostrando las resistencias principales.





lar de "A" ( $C_A$ ), la concentración molecular de "B" ( $C_B$ ) y la distancia a través de la cual la difusión se lleva a cabo ( $dz$ ). Por lo tanto la ecuación matemática obtenida es :

$$- dp_A = \alpha C_A C_B (V_A - V_B) dz \quad (1)$$

donde :  $\alpha$  = Constante de proporcionalidad.

Para gases perfectos se tiene la expresión:

$$C = P / R t = \rho / M = N / V \quad (2)$$

sustituyendo (2) en (1)

$$- dp_A = \alpha ( \rho_A \rho_B / M_A M_B ) ( V_A - V_B ) dz \quad (3)$$

N = Número de moles que se difunden en la unidad de tiempo por unidad de área en dirección perpendicular a las fases.

De la definición anterior y de la ecuación (2) se tiene la siguiente expresión:

$$N = \rho V / M \quad (4)$$

sustituyendo (4) en (3)

$$- dp_A = \alpha ( N_A \rho_B / M_B - N_B \rho_A / M_A ) dz \quad (5)$$

de la ecuación (2)

$$- dp_A = ( \alpha / R t ) ( N_A P_B - N_B P_A ) dz \quad (6)$$

pero :

$$P = P_A + P_B \quad \therefore \quad P_B = P - P_A$$

sustituyendo en la ecuación (6)

$$- dp_A = ( \alpha / R t ) ( N_A P - N_A P_A - N_B P_A ) dz \quad (7)$$

definiendo a la constante  $D_{AB}$  como :

$$D_{AB} = R^2 t^2 / \alpha P \quad (8)$$

sustituyendo la ecuación (8) en (7)

$$- dp_A = ( R t / D_{AB} P ) ( N_A P - N_A P_A - N_B P_A ) dz \quad (9)$$

y en el estado continuo a contradifusión equimolecular:

$$N_A = - N_B \quad \text{y si } D_{AB} \text{ permanece constante:}$$

$$\int_{P_{A_1}}^{P_{A_2}} - dp_A = R t N_A / D_{AB} \int_0^z dz \quad (10)$$

ecuación que es conocida como la primera ley de Ficks.

$$N_A = ( D_{AB} / R t z ) ( P_{A_1} - P_{A_2} ) \quad (11)$$

donde la difusividad (  $D_{AB}$  ) depende de la temperatura, presión y de la naturaleza de los componentes de la mezcla gaseosa. Una de las expresiones para obtener (  $D_{AB}$  ) que se basa en la teoría cinética de los gases es la siguiente:

$$D = \frac{0.0009292 t^{3/2} ( 1/M_A + 1/M_B )^{1/2}}{P ( r_{AB} )^2 [ f( kt/E_{AB} ) ]} \quad (12)$$

donde:  $D_{AB}$  = Difusividad

$t$  = Temperatura absoluta

$M_A, M_B$  = Masa molecular de A y B respectivamente

$r_{AB}$  = Separación molecular en la colisión

$$r_{AB} = ( r_A + r_B ) / 2 \quad (13)$$

$E_{AB}$  = Energía de interacción molecular

$$E_{AB} = ( E_A E_B )^{1/2} \quad (13.a)$$

$k$  = Constante de Boltzmann

$f(kt/E_{AB})$  = Función de colisión

Estado estacionario de la difusión de "A" a través de "B" - que no se difunde. Luego,  $N_B = 0$ ,  $N_A =$  Constante

$$- dp_A = ( R t N_A / D_{AB} P ) ( P - P_A ) dz \quad (14)$$

$$dz = ( D_{AB} P / R t N_A ) \left[ dp_A / ( P - P_A ) \right] \quad (15)$$

$$z = ( D_{AB} P / R t N_A ) \ln \left[ ( P - P_{A_2} ) / ( P - P_{A_1} ) \right] \quad (15.a)$$

$$N_A = ( D_{AB} P / R t z ) \ln \left[ ( P - P_{A_2} ) / ( P - P_{A_1} ) \right] \quad (16)$$

$$N_A = ( D_{AB} P / R t z P_{Bm} ) ( P_{A_1} - P_{A_2} ) \quad (17)$$

donde :  $p_{Bm}$  = Es la media logarítmica de la presión impulsora -  
del inerte "B".

$$p_{Bm} = ( p_{B_2} - p_{B_1} ) / \ln \left[ ( p_{B_2} / p_{B_1} ) \right] \quad (18)$$

La difusión molecular es muy baja debido al plano altamente zigzagueante y lento que siguen las moléculas, y es de esperarse que la transferencia aumente con la temperatura y disminuya con la presión.

**DIFUSION TURBULENTA.**-La turbulencia está caracterizada por el movimiento irregular de las partículas del fluido con respecto a la dirección y al tiempo. A causa de los rápidos movimientos los gradientes de concentración en la región turbulenta serán - menores que los existentes en la película laminar.

Los estudios más generalizados de operaciones difusionales tratan la transmisión de calor y la transferencia de masa.

La simultaneidad de estos procesos hace que se influyan - mutuamente de tal forma que las velocidades o flujos resultan - interdependientes.

La transferencia de masa de una fase a otra va casi siempre acompañada por un efecto calorífico que influye sobre las temperaturas de las fases, tanto como sobre las temperaturas en la - interfase.

El resultado suele ser cambios en la relación de equilibrio vapor-líquido y en las propiedades de los fluidos. El transporte turbulento no puede ser descrito completamente mediante una - expresión matemática, puesto que el mecanismo es mucho más complejo que aquel que tiene lugar para el transporte molecular.

Como resultado de esto es necesario combinar la teoría con la evidencia experimental para obtener una imagen adecuada de la turbulencia.

#### SISTEMA CONTACTO DIRECTO GAS-LIQUIDO.

La materia transferida entre las fases es en tales casos - una misma sustancia que comprendida en la fase líquida o en la - fase gaseosa o bien se vaporiza o bien se condensa, de ahí que - las características de presión de vapor de líquido sean de tanta importancia. Como en todos los problemas de transferencia de -

masa, hay una transferencia simultánea de energía calorífica, es por eso que es necesario conocer las características de equilibrio de los sistemas y una cierta consideración a las características entálpicas de los sistemas.

Cuando la presión de vapor de un líquido se grafica contra la correspondiente temperatura ( figura # 2 ), se obtiene la llamada curva de presión de vapor con características generales semejantes pero únicas y definidas para cada sustancia.

La sustancia arriba de la temperatura crítica es llamada gas y no podrá licuarse por más que se eleve la presión. La temperatura correspondiente a cada presión sobre la curva de equilibrio es llamada, temperatura de ebullición y la correspondiente a la presión de una atmósfera es llamada temperatura de ebullición normal.

La energía interna ( U ) de una sustancia es la energía total que reside dentro de ella debido a las contribuciones del movimiento y posición de los átomos y moléculas que la constituyen. La suma de la energía y el producto de la presión por el volumen de la sustancia, ambas en las mismas unidades dan la entalpia del sistema.

$$H = U + PV \quad (19)$$

En un proceso discontinuo a presión constante, donde el trabajo se realiza sólo en la expansión del gas contra la presión, - el calor absorbido por el sistema es la ganancia en entalpia, más el trabajo realizado.

$$Q = \Delta H = \Delta( U + PV ) \quad (20)$$

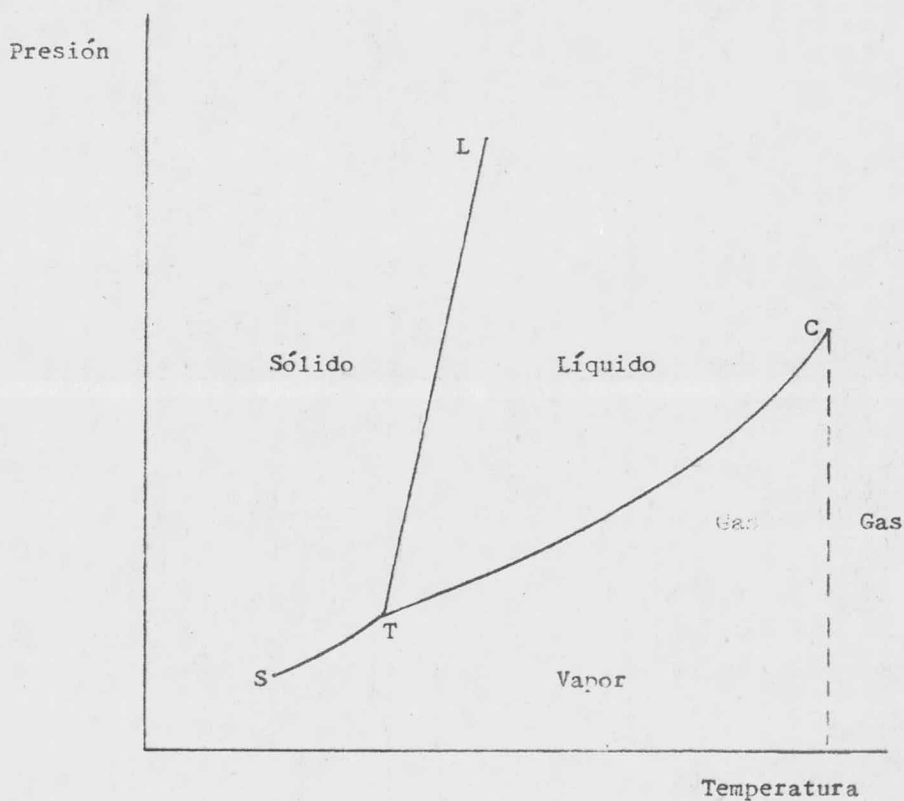
En un proceso de flujo constante en operación continua de transferencia neta de energía al sistema como calor y trabajo será la suma de lo ganado en entalpia, energía cinética y energía potencial. Frecuentemente los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes en relación con los cambios de entalpia y si no hay trabajo, la transferencia neta de energía al sistema será :

$$Q = \Delta H \quad (21)$$

Que es la ecuación usada para calcular el calor adicionado - al sistema en balances de calor.

FIGURA # 2

Curva de Presión de Vapor.



En operaciones adiabáticas donde no ocurre intercambios de calor entre el sistema y sus alrededores, el balance de energía se transforma en una igualdad de entalpías de las condiciones iniciales y finales.

Para clasificar el equilibrio es necesario establecer el número de variables independientes, es decir, los grados de libertad utilizables en una situación específica sin que se altere ese equilibrio. La ecuación empleada para esta clasificación está dada por la regla de las fases de Gibbs.

$$F = C - P + 2 \quad (22)$$

En el equilibrio líquido-vapor el concepto de presión parcial es de gran utilidad y consecuentemente muy usado.

La presión parcial ( $p_A$ ) de una mezcla gaseosa esta relacionada con las fracciones molares de los componentes en las dos fases.

$$p_A = p_A^{\circ} X_A \quad (23)$$

$$p_A = P Y_A \quad (24)$$

Para mezcla de dos componentes :

$$Y_A = p_A / P \quad (25)$$

$$1 - Y_A = p_B / P \quad (26)$$

donde:  $p_A$  y  $p_B$  = presiones parciales de "A" y "B"

$X_A$  y  $Y_A$  = fracciones molares de "A"

$P$  = presión total

$p_A^{\circ}$  = presión de vapor de "A"

Si la fase líquida consiste de un sólo componente "A", la presión parcial de "A" iguala a la presión de vapor de "A" puro ( $p_A = p_A^{\circ}$ ). Teniéndose así las siguientes interrelaciones de equilibrio: Composición del líquido,  $X_A = 1$ .

$$p_A^{\circ} = P Y_A \quad (27)$$

donde:  $p_A^{\circ} = f(t)$  (28)

$$t = f(p_A^{\circ}) \quad (29)$$

se tienen los siguientes grados de libertad:

$$P = f ( p_A^o ) / Y_A \quad (30)$$

$$Y = f ( p_A^o ) / P \quad \therefore \quad (31)$$

$$f ( p_A^o ) = P \cdot Y_A \quad (32)$$

$$P = f ( p, c ) \quad (33)$$

$$c = f ( p, t ) \quad (34)$$

$$t = f ( p, c ) \quad (35)$$

donde la composición en el equilibrio será :

$$Y_{eq} = p_A^o / P \quad (36)$$

En el contacto directo de una mezcla gas-vapor con un líquido, la dirección de la difusión del vapor depende del signo de la diferencia de saturaciones existentes entre el cuerpo del gas y la superficie del líquido.

Quando el líquido es una sustancia pura, ningún gradiente de concentración existe dentro de él y la resistencia a la transferencia caerá toda en el seno del gas.

Un contacto directo de un gas con un líquido puro puede tener algunos de los siguientes fines :

- Enfriar un gas caliente
- Humidificar un gas
- Dehumidificar un gas
- Enfriar un líquido

siendo el último punto el que nos interesará para este tema.

III.-HUMIDIFICACION Y ENFRIAMIENTO DE AGUA.



Los procesos de humidificación pueden llevarse a cabo para controlar la humedad presente dentro de un espacio, o más frecuentemente para enfriar y recuperar el agua poniéndola en contacto con aire ambiente. El agua que ha perdido calor cediéndolo a la atmósfera puede ser utilizada nuevamente en cambiadores de calor o cualquier otro uso dentro de la planta.

Por otro lado, el agua podría enfriarse en cambiadores de calor usando una superficie intermedia para cambiar calor.

La selección está en función de factores económicos, ya que el diseñador tiene que balancear las pérdidas de agua al enfriarse que son inherentes al contacto de ésta con el aire, relacionándolos con el costo del suministro; y por otro lado, la posibilidad de contar con fuentes de enfriamiento pero a un costo más elevado, como es el caso de las unidades antes mencionadas.

Debido a la acción recíproca del aire y el agua, definimos a la humidificación como: A la evaporación del agua en el seno de una masa de aire para aumentar la humedad de ésta. Intimamente relacionada con esta operación está la evaporación de agua en el aire con el fin de enfriar agua.

Por dehumidificación se entiende la condensación del vapor de agua del aire, disminuyendo su humedad. Todas estas operaciones son de mucha importancia en la industria, e implican el contacto de aire y agua a la vez que una transferencia de materia y calor.

Las torres de enfriamiento tienen como finalidad enfriar una corriente de agua por vaporización parcial de ésta con el consiguiente intercambio de calor sensible y latente con una corriente de aire seco y frío que circula por el mismo aparato.

El funcionamiento de una torre enfriadora se explica mediante un balance de calor y materia y que se analizarán en capítulos posteriores de este trabajo.

Así como las definiciones y ecuaciones de: Humedad, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, entalpia, calor específico, volumen húmedo, etc., se desarrollarán junto con el método entálpico para el cálculo del equipo.

En resumen las torres de enfriamiento operan exponiendo la superficie de agua a la circulación del aire, y se diferencian -

por la manera en que el aire es introducido, ya sea aprovechando el movimiento natural del aire, o moviendo el aire por medios mecánicos.

IV.-TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA Y SU CLASIFICACION.

A medida que han aparecido refinamientos en los procesos, - la industria ha ido necesitando controles cada vez más precisos de sus aparatos productores, lo que ha conducido a demandas más exigentes en relación con las torres de enfriamiento. En muchas instalaciones, cada grado de enfriamiento ha representado cientos y aún miles de pesos por día en el incremento de la producción. En consecuencia, se ha hecho necesario en la industria de la fabricación de torres de enfriamiento producir una que suministre agua más fría más económicamente.

Existen varios factores que hacen que el agua sea un excelente refrigerante. Es abundante, disponible y barata, de fácil manejo, puede transportar grandes cantidades de calor por unidad de volumen, no se dilata ni se comprime notablemente dentro de - las escalas de temperatura normalmente utilizadas y no se descompone.

Existen dos tipos básicos y comunes de sistemas de enfriamiento: Recirculantes y de un paso. Los sistemas recirculantes - pueden ser abiertos o cerrados ( figuras # 3 y 4 ). En sistemas abiertos el agua está expuesta al aire y a la evaporación.

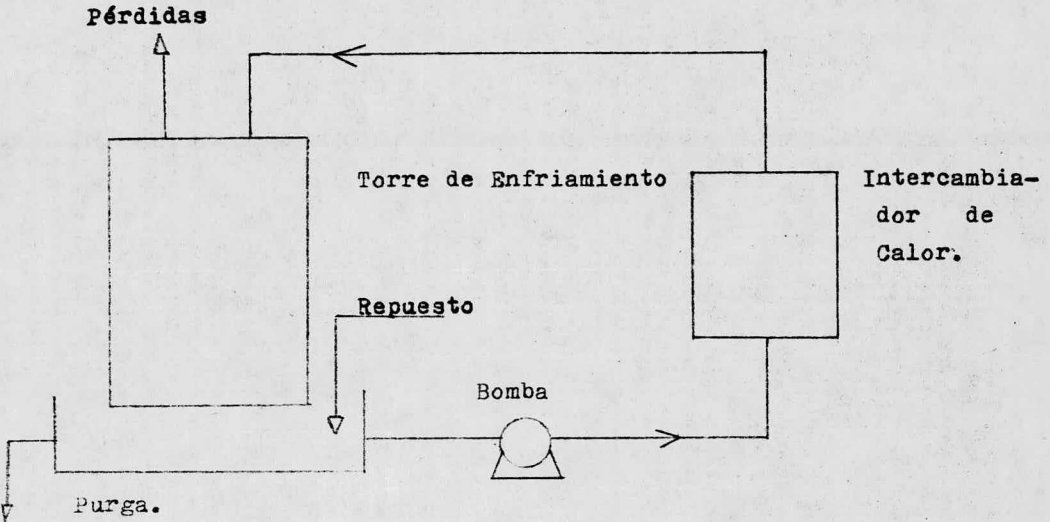
Las principales diferencias que existen entre los sistemas recirculantes y los de un paso, son que en los sistemas de un - paso ( figura # 5 ), el agua de enfriamiento pasa a través del - equipo de cambio de calor una sola vez. Al emplear grandes volúmenes de agua, el aumento de temperatura en el efluente es pequeño. El contenido mineral queda prácticamente sin cambio.

En sistemas recirculantes, el agua vuelve a utilizarse en - forma continua. Como el enfriamiento en sistemas abiertos de recirculación es debido a la evaporación, el contenido mineral del agua aumenta. También tiene lugar una aereación continua. Los - sistemas recirculantes cerrados, tienen poca pérdida de agua. El contenido mineral es por lo general constante. No hay ninguna - aereación. El enfriamiento de agua tiene lugar en cambiadores de calor, equipos de refrigeración o radiadores.

Uno de los tipos más antiguos de enfriamiento de agua a escala industrial, como los estanques de rociada, en donde la velocidad de recirculación del agua es baja, o donde está disponible una gran superficie de terreno, el enfriamiento de agua se basa

FIGURA # 3

Recirculante Abierto.

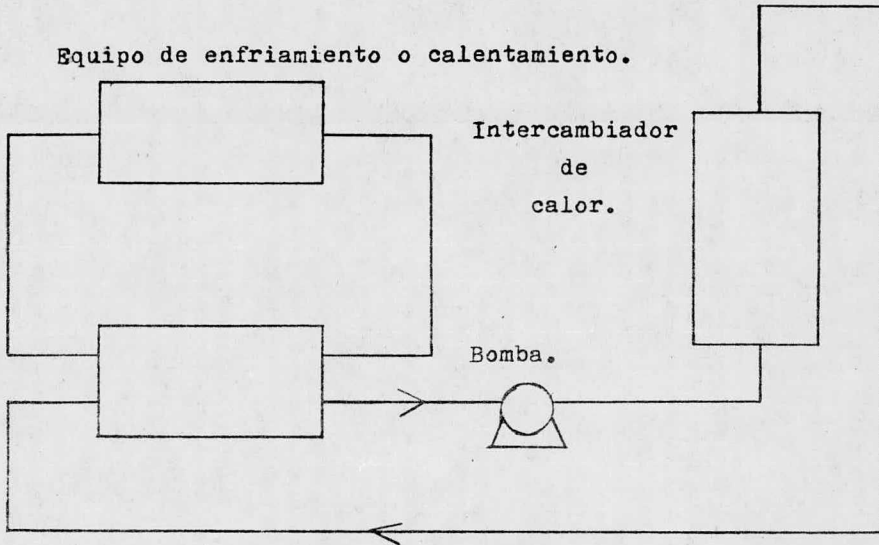


- Ejemplos : Tanques de Aspersión.  
Torres de enfriamiento.  
Condensadores Evaporativos.

Características : Cambio termométrico promedio 11.2 a 16.7 °C  
Cantidad de agua utilizada Moderada.

- Problemas Comunes : Corrosión.  
Taponamiento.  
Incrustaciones.  
Putrefacción.  
Microbiología de la madera.

Recirculante Cerrado.

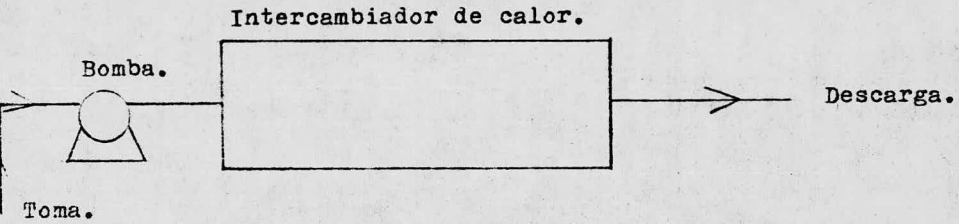


Ejemplos : Camisas de motores diesel.  
 Radiadores de automóviles.  
 Sistemas de agua fría.

Características : Cambio termométrico promedio 5.6 a 8.4 °C.  
 Cantidad de agua utilizada insignificante.

Problemas Comunes : Corrosión.  
 Taponamiento.

De un Paso.



Ejemplos : Sistemas de agua potable.  
 Agua de proceso.  
 Servicio general.

Características :	Cambio termométrico promedio	2.8 a 5.6 °C.
	Cantidad de agua utilizada	Sumamente - grande.

Problemas Comunes : Corrosión-purga.  
 Taponamiento.  
 Incrustaciones.  
 Microbiológicas.

en un sistema de fuentes que dejan caer el agua en forma de rocío sobre una alberca. En el mejor de los casos, el efecto de enfriamiento es pequeño, puesto que el agua sólo se riega una vez, en tanto que las pérdidas de agua debidas al arrastre del viento pueden ser grandes comparadas con otros sistemas de enfriamiento. En estos sitios expuestos al viento, los tanques con aspersión se encuentran rodeados de una protección de unos 12 pies ( 4.20 m ) de altura . Las objeciones contra los estanques de aspersión son los resultados limitados que proporciona y los perjuicios originados por la gran pérdida de agua que se produce durante ciertas estaciones del año. Este tipo de enfriamiento ha sido sustituido por las llamadas torres de enfriamiento de agua.

Las torres de enfriamiento de agua, son equipos de intercambio que están generalmente empacadas con madera, formando estructuras de puentes múltiples parecidos a huacales. Sin embargo, de vez en cuando, se emplean estructuras de aluminio, de ladrillo, de concreto, de asbesto-cemento y de plástico. El escoger estos materiales es extremadamente importante dado que todas las partes están sujetas a los efectos de deterioro por el tiempo que prevalece, la humedad atmosférica de la propia torre y el agua circulante. El agua suele introducirse por la parte superior mediante lluvia provocada, bajando a través de los numerosos puentes y deflectores hasta la parte baja de la torre que está montada sobre una alberca. Se evita la corrosión utilizando materiales inertes como la madera tratada principalmente e inclusive el acero inoxidable o la porcelana.

Por lo general hay principalmente dos tipos de torres de enfriamiento, que son las torres de circulación natural y las torres de tiro mecánico. En el primer tipo la denominación de torre es inexacta, ya que el diseño de la misma semeja una estrecha fuente de espreas encajonadas y con rejillas de ventilación en dos de sus lados a bastante altura. Generalmente se construyen con espreas que dejan caer el agua desde lo alto de su estructura. El ancho generalmente es inferior a la altura. Las cargas pueden variar desde 0.6 hasta 1.5 galones por minuto por pie cuadrado de torre, lo cual equivale aproximadamente a la cuarta parte del área de una fuente común de espreas.



Las torres de enfriamiento de agua de tipo de tiro mecánico son las que utilizan ventiladores para forzar el paso de aire a través de la torre, Siendo los ventiladores parte integrante de ésta. Las torres de este tipo presentan la gran ventaja de que - permiten regular el volumen de aire necesario, su velocidad y su distribución. El tiro de éstas torres se consigue con soplantes que inyectan el aire fresco, o con extractores que aspiran el -- aire saturado; de ésta manera es posible poner en íntimo contac- to una determinada cantidad de aire, de velocidad regulada, con agua, en condiciones de franca turbulencia. Estas torres son de menor tamaño que las de circulación natural y necesitan menos - energía para el bombeo de los líquidos. Estas ventajas económi- cas, sin embargo, resultan disminuídas por los gastos de los so- plantes y extractores ( en general llamados ventiladores ) y por la energía necesaria para su accionamiento.

Torres de circulación natural.-Se dividen principalmente en dos : a.-Torres atmosféricas ( figura # 6 ) y b.- Torres de - tiro natural ( figura # 7 ) .

a.-Torres atmosféricas.- Estas torres dependen del viento atmos- férico que sopla horizontalmente hacia la torre. Estas torres deben estar en áreas relativamente abiertas, para recibir y - aprovechar el viento en cualquier dirección particular. Velo- cidades de viento de 4.5 a 6.5 millas por hora son necesarias para operaciones razonables. La torre opera a flujo cruzado - de el viento a la caída del agua y un rango de treinta a - treinta y cinco por ciento de efectividad. No son capaces de - producir agua a una temperatura más cercana de  $4^{\circ}\text{F}$  a la de la temperatura de bulbo húmedo de aire en la entrada. No requie- ren ventilador, pero consumen energía al bombear el agua a la cima de la torre. Requieren áreas superficiales muy grandes.- En ésta torre, El agua se bombea a su parte superior de donde se derrama por un sistema de distribución; cuando el agua - empieza a descender es dividida y redistribuida por las cu--- biertas que contienen el relleno de la torre, ésto descubre - continuamente nuevas superficies de enfriamiento al aire que encuentra. La redistribución asegura una concentración unifor- me del agua por la torre durante su caída.

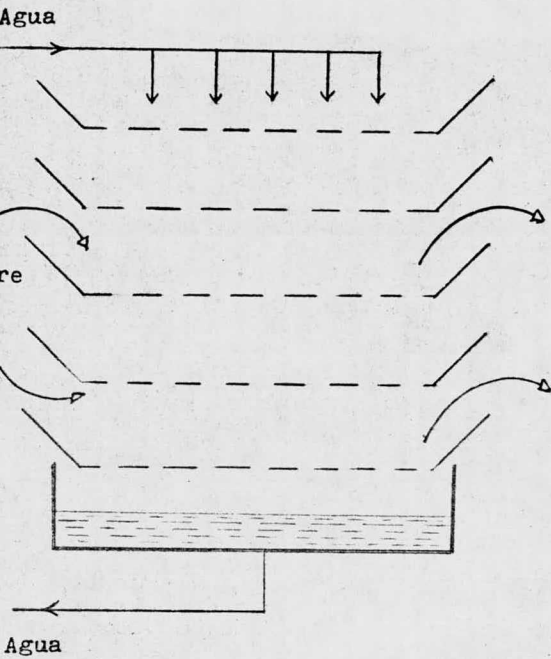
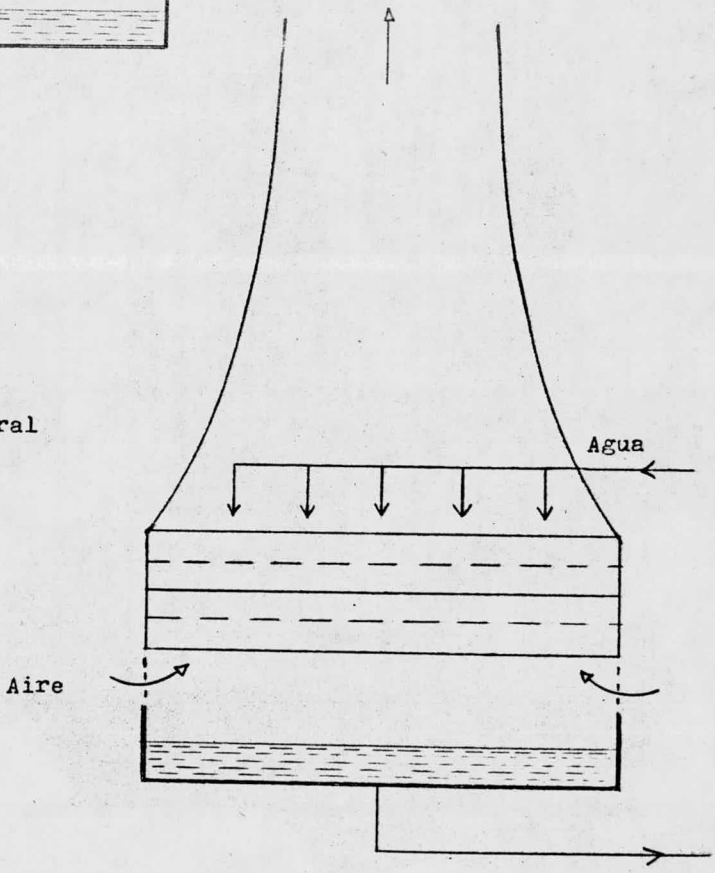


FIGURA # 6  
Torre Atmosférica

FIGURA # 7  
Torre de Tiro Natural



Aunque el costo total de una torre atmosférica, es casi el mismo que el de una de tiro mecánico, ciertas limitaciones importantes rigen sus resultados de funcionamiento. Tiene que tener orientado su costado ancho hacia el viento que prevalezca en forma que exponga cierta área. Cualesquiera estructuras colinas u otros obstáculos en su alrededor la bloquearían y separarían del viento.

Originalmente, la principal objeción a las torres atmosféricas fué la excesiva pérdida de agua rociada durante los períodos de fuertes vientos. Esta alta pérdida era causada porque no había un procedimiento para separar del aire el agua arrastrada en la torre común del tipo de persianas de ventilación. En consecuencia, la mayoría de los fabricantes resuelven ahora éste problema incorporando a las persianas, eliminadores de niebla.

b.-Torres de tiro natural.- Estas torres dependen de la acción del tiro natural ( como una chimenea ) para atraer aire frío al fondo de la torre y expulsarlo en la cima como una mezcla de aire caliente. La acción de la torre depende de la temperatura atmosférica; por lo tanto, en un día caliente la acción de la torre puede ser menor que en un día frío. Estas torres son relativamente grandes y requieren energía para el bombeo del agua a un cierto punto de la torre, el cual es generalmente menor que para una torre atmosférica. No hay costos por ventilador. Las unidades han sido construídas hasta de 310 pies ( 94.5 m ) de altura, de un diámetro en la base de 210 pies ( 68.3 m ) y un cuello de 120 pies ( 36.5 m ), con un diámetro en la cima de 134 pies ( 40.8 m ) de ancho.

Torres de tiro mecánico.- Se dividen principalmente en dos:

a.-Torres de tiro forzado ( figura # 8 ) y b.-Torres de tiro inducido ( figuras # 9 y 10 ).

a.-Torres de tiro forzado.- Este tipo de torres utiliza ventiladores en la base, para forzar al aire de su fondo a salir por la parte superior a través de todo el empaque.

Esta torre está perdiendo rápidamente partidarios debido a que se produce en ella más a menudo que en las de tiro inducido la recirculación de los vapores calientes y húmedos del

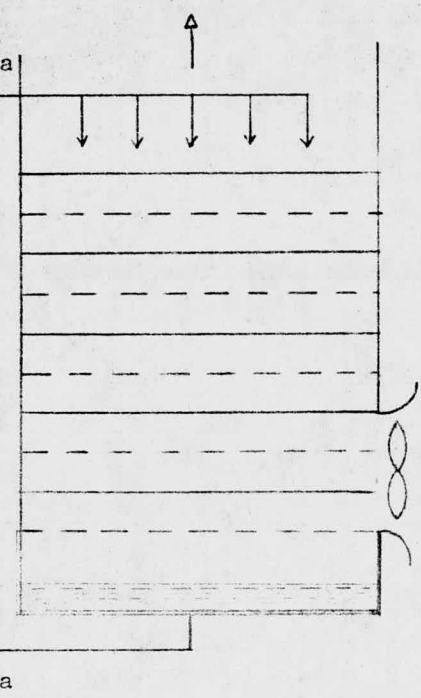
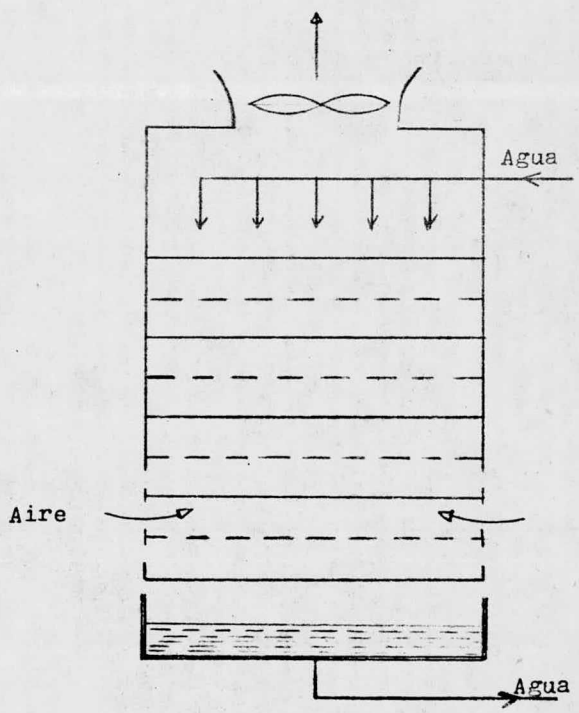


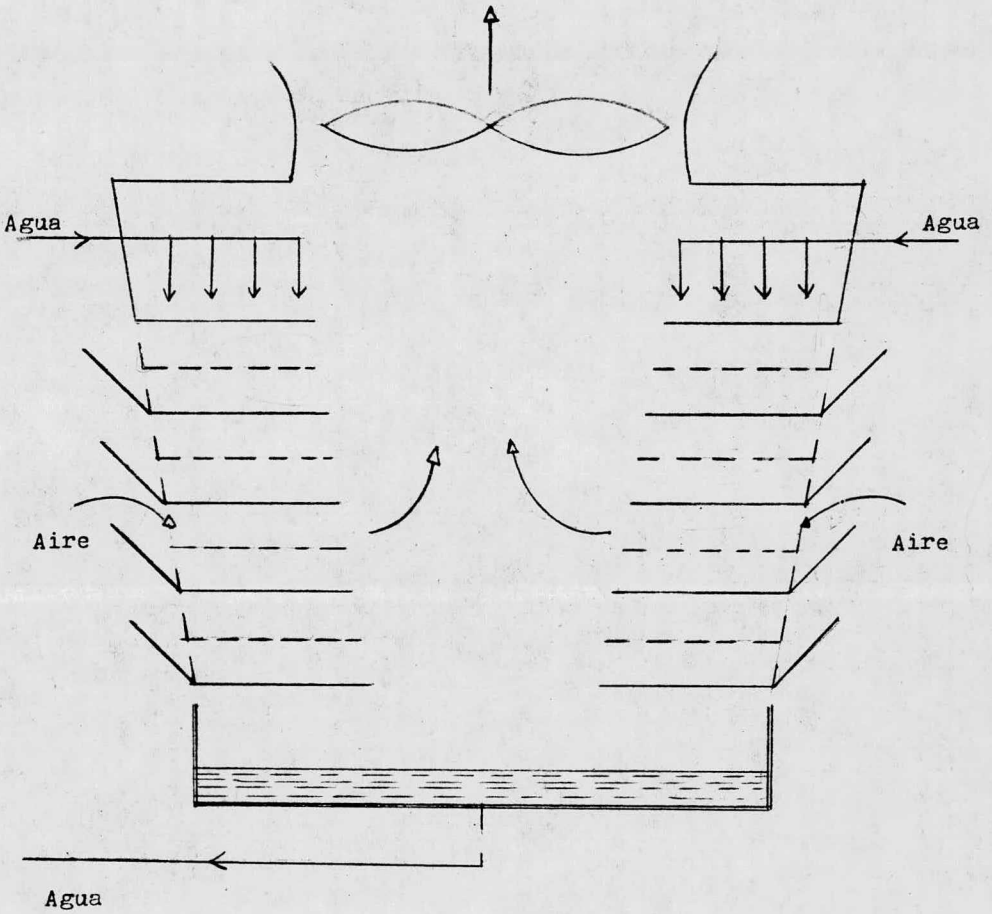
FIGURA # 8

Torre De Tiro Forzado.

FIGURA # 9

Torre De Tiro Inducido A Contracorriente.





Torre De Tiro Inducido A Flujo Cruzado.

escape, que vuelven a entrar por las tomas de aire. Esto se produce bajo ciertas condiciones atmosféricas, debido a que la velocidad del aire de escape húmedo, es tan lenta que la aspiración creada por el ventilador vuelve a introducirlo en la torre. Como la temperatura de bulbo húmedo del aire de escape es considerablemente superior al de bulbo húmedo del aire ambiente, hay una disminución en los resultados de funcionamiento que se evidencia por un incremento de la temperatura del agua fría.

El ventilador maneja sólo aire atmosférico, por lo tanto reduce su problema de corrosión, comparado con el ventilador de una torre de tiro inducido.

El tamaño de la torre es considerablemente menor que para una torre de tiro natural o atmosférica, debido a la mayor velocidad de transferencia de calor.

b.-Torres de tiro inducido.- En estas torres los ventiladores están localizados en la corriente de aire húmedo de salida en la cima de la torre. El aire entra por los lados de la torre a baja velocidad y es extraído a la cima de la torre por el ventilador. En éste tipo de torre de tiro mecánico, la mezcla de aire caliente es descargada verticalmente a la atmósfera con una velocidad tal, para eliminar la posibilidad de recirculación de éste aire en la base de la torre.

Todas las torres de enfriamiento de tiro inducido pueden ser agrupadas en dos distintas clases. La diferencia está en el modo de entrada de el aire a la torre y el modo en el cual se pone en contacto con el agua.

Los dos tipos son a : Contraflujo o contracorriente ( figura # 9 ) y flujo cruzado ( figura # 10 ).

En las de contraflujo las condiciones transversales son constantes en cualquier sección horizontal.

La torre de enfriamiento de flujo cruzado está equipada con uno o más ventiladores en la cima, los cuales extraen el aire a través de dos celdas unidas a un común centro de succión, seccionado en el centro entre el ventilador y el empaque con rejas eliminadoras que elevan el aire directamente hacia arriba y afuera. Este arreglo provee flujo de aire hori

zontal con el agua que cae y cruza la corriente de aire.

Esta mezcla de aire es corrosiva a las partes del ventilador y por lo tanto requiere protección de revestimiento plástico o de metales especiales, así como los engranes de reducción, además, los motores deben ir sellados.

Las torres de flujo cruzado tienen unas ciertas ventajas sobre las de contraflujo como son: i.- Menores costos de operación, los ventiladores requieren menos potencia y la altura de bombeo también es normalmente menor. ii.- Menores costos de mantenimiento, todas sus partes están a la vista, empaque, eliminadores, charolas de agua fría y caliente y equipo mecánico. iii.- Larga duración, trabajan a más bajas velocidades de aire, sus eliminadores y empaque son de amplio espaciamiento, lo que reduce su fatiga y evita obstrucciones y ensuciamiento por arrastre de polvos y otros elementos.

Las torres de enfriamiento constituyen uno de los más difíciles equipos de una planta para su especificación y evaluación. En seguida se da una lista de los datos e información más pertinente para especificar una torre de enfriamiento de agua, así como breves instrucciones de operación y mantenimiento.

A.-Datos que afectan a la clasificación y eficiencia de la torre

- 1.-Velocidad de circulación del agua.- Estado y galones por minuto de agua a la torre.
- 2.-Contenido de contaminación en el agua circulante.- El agua circulante no deberá contener una cantidad de sólidos totales mayores a 5 000 ppm y 10 ppm de aceites o gomas.
- 3.-Temperatura del agua caliente.- Dado que la temperatura elevada del agua, decrece materialmente las características de fuerza de la madera de la torre, las temperaturas de entrada mayores de  $140^{\circ}\text{F}$  ( $60^{\circ}\text{C}$ ) no son recomendables.
- 4.-Temperatura del agua fría.- Esta depende del rango y acercamiento, que a su vez es una función de la temperatura de bulbo húmedo.
- 5.-Temperatura de bulbo húmedo.- Es el punto de partida para la selección de un sistema de enfriamiento. Es muy frecuente sobrediseñar ésta variable escogiendo un valor demasiado alto, que sólo pudiera presentarse en algunos días de los meses más calurosos. La práctica recomienda seleccio--



nar aquel valor de temperatura, que sea superado un 5 % del tiempo en los meses más calurosos de la región.

6.- Rango y acercamiento.- Rango es, temperatura del agua caliente menos temperatura del agua fría. Acercamiento es, temperatura del agua fría menos temperatura de bulbo húmedo. Es de hacerse notar que el efecto de un "grado" de acercamiento tiene considerablemente mayor efecto sobre el tamaño de la torre que un "grado" de rango, especialmente a pequeños acercamientos.

7.- Pérdidas de agua.- Generalmente limitada al 0.1 % o menor del gasto de agua. No especifica las pérdidas por evaporación, dado que ésto es una función de las características del aire aprovechable, y de la carga de calor aplicada a la torre.

8.- Orientación y localización de la torre con respecto a otros equipos de la planta.- Cualquier equipo adyacente que despida calor o vapor, accesibles a la atmósfera y a la torre, debe de ser considerado en el diseño y evaluado o eliminado durante las pruebas de eficiencia.

9.- Velocidad de viento.- Está dada por las condiciones climatológicas del lugar.

10.- Elevación de la torre.- Cuando la torre se instala en algún punto que se encuentre a una altura mayor sobre el nivel del mar, es preciso manejar gastos volumétricos de aire en la torre superiores a los requeridos a los correspondientes en lugares de una altura menor, para un mismo enfriamiento requerido.

#### B.- Datos estructurales.

1.- Diseño de la carga del viento.-  $(lb / ft^2) = 0.003 \text{ por } (mi / hr)^2$ . La estandar es de  $30 lb/ft^2$  y se considera adecuada aún para áreas donde aparezcan huracanes. Una torre de enfriamiento da crédito solamente por la fuerza de sus miembros estructurales ( columnas verticales, abrazaderas diagonales y ligaduras horizontales ); pero para un punto práctico, se ha considerado una fuerza adicional en los efectos de las abrazaderas y en la fricción de las uniones o juntas de sus muchos miembros redundantes.



2.-Clase de madera y esfuerzos permisibles.-Generalmente se usa madera de pino. El corazón del pino generalmente es utilizado para miembros no estructurales tales como el empaque, eliminadores de niebla, paredes, escalinatas, etc., también se fabrican éstas partes de ciprés, asbesto cemento y plástico. Los diagramas de esfuerzos y cálculos de diseño, incluyendo los detalles de las juntas, deben ser dadas por el fabricante.

C.-Aspectos de diseño.

1.-Accesos para abastecimiento.-Especificar el número y el lugar requerido de las escalinatas y escaleras. En general las escalinatas deberán ser de 24 pulgadas ( 61 cm ) de ancho como mínimo con una pendiente de  $45^{\circ}$  como máximo y deberán estar provistas con descansos para un máximo de cada 20 pies ( 6.1 m ) de elevación vertical. Debe tener un acceso para abastecimiento al sistema de distribución de agua y eliminadores de niebla, para propósito de limpieza; paneles renovables deberá tener la chimenea del ventilador para acceso a equipo mecánico; persianas deslizables en la parte baja de la torre para propósito de limpieza.

2.-Particiones.-Dado que las paredes internas constituyen un alto porcentaje comparativamente de la madera de la torre no funcional, debe ser especificado solamente el mínimo requerido para permitir la operación del ventilador individualmente y prevenir el flujo continuo, debido a los altos cruzamientos del viento. Estas paredes por lo general son fabricadas de pino y de paneles de asbesto cemento.

3.-Sistema de distribución del agua, eliminadores de niebla y empaque.-Excepto para condiciones estructurales y materiales, de preferencia, es conveniente no sobre especificar los aspectos funcionales de la distribución del agua, eliminadores de niebla y empaque. Estos aspectos son diferentes para cada fabricante y constituyen las más importantes bases para la individualidad del diseño, aunque en la mayoría de los casos el sistema de distribución de agua es de charola con orificios deflectores de plástico y el empaque puede ser de plástico como el cloruro de polivinilo -

( PVC ), poligríd ( inyección moldeada de polipropileno ) o pino; además con amplios interespacios para evitar obstrucciones. En caso de soportarse las tablillas con malla, éstas deben ser de material inerte ( fibra de vidrio ) . - Los eliminadores deben ser de dos pasos y que limiten las pérdidas por arrastre al 0.1 % del flujo, siendo éstos por lo general de PVC.

4.-Chimenea del ventilador.-La mayoría de las chimeneas de los ventiladores estandar son de 4.5 pies ( 1.3 m ) a 6 pies ( 1.8 m ) de altura. Es recomendable especificar la altura extra de la chimenea generalmente de 15 a 16 pies ( 4.5 a 4.9 m ) de altura, esto reduce la recirculación del aire agotado. Es de recordar que la altura extra de la chimenea aumenta los requisitos estructurales de la torre, debido a las cargas del viento. Por lo general están construídas de fibra de vidrio o madera tratada.

#### D.-Materiales.

- 1.-Armazón.-Aunque hay algunas evidencias de la disminución de surtido, es probable que la madera de pino tratada será la especie predominante en las torres de enfriamiento para varios años adelante. Tiene las muy deseables características de manejo mecánico, ligereza, resistencia natural a la pudrición y al ataque fungicida. Los armazones también se fabrican de ciprés , acero galvanizado, de ladrillo o concreto.
- 2.-Ferretería.-El cobre es usado casi universalmente para clavos, aunque hay un uso limitado de latón y acero galvanizado. El latón amarillo es usado predominantemente para pernos, tuercas y arandelas, aunque hay aumento en el uso de aleaciones de cobre-silicón, manganeso-bronce, bronce-silicón, acero inoxidable y aluminio.
- 3.-Soportes de equipo mecánico.-Los soportes estructurales para reductores de velocidad e impulsores del ventilador, deberán ser de una estructura pesada de acero, con un doble baño de galvanizado después de fabricado.
- 4.-Tubos de distribución del agua.- El acero galvanizado es muy satisfactorio para los tubos de distribución del agua

caliente. Es económico, tiene resistencia a la corrosión y si es requerido puede ser especialmente encaquetado. Las boquillas de rocío son de acero galvanizado, latón, PVC, fibra de vidrio o polipropileno.

5.-Paredes exteriores.-Aunque el pino o madera tratada ( tratada a presión y vacío con sales de cobre ) es usada para paredes exteriores, las tablas de asbesto cemento corrugado están ganando su uso por razones de apariencia y prueba de fuego, así como paneles de poliéster reforzado con fibra de vidrio corrugado, con monómero de metil metacrilato para mejorar la resistencia al tiempo. El mastique es usado para las juntas o uniones a prueba de agua de cualquier tipo de pared. Las goteras deben ser prevenidas no sólo por apariencia sino también para prevenir la detérioración. Existen también otros materiales de los que se fabrican las paredes exteriores como son el ciprés, tablas de asbesto corrugado o algunas combinaciones con pino, ladrillos o bloques de concreto.

6.-Otros materiales.-Algunos fabricantes ahora hacen uso de plásticos en los separadores, soportes para eliminadores de niebla y chimeneas del ventilador.

#### E.-Equipo mecánico.

1.-Ventiladores.-Con una tendencia a aumentar a grandes diámetros ( hasta 23 pies ) ( 8.4 m ). Los materiales adecuados de las hojas de un ventilador son: Plásticos, como la fibra de vidrio trenzada con resinas sintéticas y aleaciones especiales de aluminio. La máxima velocidad de un ventilador está generalmente limitada a 12 000 pies por minuto. El número mínimo de hojas por ventilador está generalmente limitado a 6, para reducir las pulsaciones. Es deseable la intercambiabilidad de las hojas del ventilador, así como un ajuste en el paso ( pitch ) entre hoja y hoja. Los ejes de los ventiladores deberán estar estática y dinámicamente balanceados. La mayoría de los ventiladores de torres de enfriamiento son de tipo de flujo axial con una eficiencia total aproximadamente de 65 % .

2.-Reductores de velocidad.-Generalmente se usan tornillos -

sin fin para reducir la velocidad, aunque últimamente ha aumentado el uso de engranes de tipo bisel espiral especialmente diseñados. La eficiencia mecánica de estos engranes está por lo general en un rango de 93-97 % .

3.-Flechas impulsoras.-El equipo mecánico deberá estar cuidadosamente alineado y sujeta sobre el soporte estructural para prevenir las pulsaciones y vibraciones y aumentar la vida del acoplamiento. El montaje de toda flecha impulsora deberá estar dinámicamente balanceada. Las flechas deberán ser de suficiente diámetro para prevenir operaciones arriba de la velocidad crítica. La velocidad de las flechas deberá conservarse abajo de 2 000 revoluciones por minuto. Estas flechas deberán ser de acero sólido cubiertas con una pintura de base epóxica.

4.-Impulsores del ventilador.

a.-Motores eléctricos.-Totalmente encerrados, baja corriente de arranque, las velocidades de operación deberán ser de 1 800 revoluciones por minuto o abajo. En la actualidad son los más usados.

b.-Turbinas de vapor.-Condiciones de vapor específicas y velocidad de agua adecuada.

c.-Motor de gas-gasolina.-Los motores deben ser de tamaño adecuado para operación continua. Velocidades de la flecha exterior mayores de 1 200 revoluciones por minuto no son recomendadas. Debe estar provisto de un clutch y además de una grasera abajo del motor para reducir el riesgo de fuego.

F.-Datos que deben ser proporcionados por el fabricante.

En suma, el fabricante deberá proporcionar información satisfactoria describiendo en su totalidad la torre de enfriamiento ofrecida. Esto incluye el número de celdas, dimensiones de las celdas y de la torre, cabeza de bombeo, localización y tamaño de las conexiones de los tubos y potencia requerida por el ventilador.

Una información suplementaria, para propósito de evaluación, puede incluir flujo de aire y presión estática de diseño, número y espaciamiento de cubiertas de empaque, volumen -

de enfriamiento, empaque húmedo total y área de rocío y cantidad de madera en la torre de enfriamiento.

G.-Otros datos que deben ser proporcionados.-Soportes de acero - anclados al lugar o estanques de concreto, arrancadores del motor del ventilador y diagramas eléctricos, bombas, tuberías y anclaje para los estanques de concreto ( cimentación ) serán proporcionados por otros.

#### INSTRUCCIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

A.-Preparación de las torres para su operación.

Quando una torre de enfriamiento es puesta en operación - por primera vez o después de un largo período de estar fuera - de servicio, deberá limpiarse, inspeccionarse y lubricarse, - según las siguientes indicaciones.

1.-Limpiar cualquier basura, hojas, tierra o materias extrañas en el recipiente de distribución o de agua caliente, así - como en el de agua fría y en las rejillas de entrada de - aire.

    Checar que los orificios de distribución estén comple--  
tos, en su lugar y limpios. Limpiar el cárcamo de succión,  
así como las mallas de protección de dicho cárcamo.

2.-Limpiar el relleno y los recipientes de la torre y drenarla para eliminar todos los escombros.

3.-Engrasar el motor si éste así lo requiere de acuerdo con - las especificaciones del fabricante del motor.

4.-Probar la resistencia del aislante del motor y comprobar - que no exista humedades.

5.-Engrasar la chumacera de la transmisión, con grasa a base de litio para evitar el óxido y la corrosión.

6.-Checar el aceite del reductor tomando una muestra del mismo para examinar si no existe lodo o agua; en caso de que - existan, drénese y sóplese para cambiar por aceite nuevo ó agréguese aceite si el nivel es bajo y no existe ni humedad ni lodo.

7.-Inspeccionar los coples de las flechas de transmisión y su alineamiento. Todos sus tornillos deberán estar completamen-  
te fijos.

8.-Checar que el ventilador tenga su claro adecuado entre las

puntas de los extremos de sus aspas y el cilindro. Este -- claro debe ser de un mínimo de 1/4 de pulgada ( 6.5 mm ) y que su movimiento de rotación sea completamente libre. Por último checar que la inclinación de las aspas ( ángulo de paso ) del ventilador sea la misma en todas y que esten - completamente fijas.

9.-Checar que la válvula del flotador para el control del - agua de repuesto, esté correctamente instalada y que pueda operar libremente.

B.-Puesta en marcha o arranque de las torres.

1.-Llenado de agua al sistema.-Llenar el recipiente de agua - fría, así como toda la tubería del sistema hasta alcanzar el nivel requerido de operación.

Ajustar la válvula del flotador para mantener el ni-- vel de agua requerido y llenar hasta el nivel de sobre flu jo. Abrir la válvula de agua caliente ( agua de retorno - del sistema a la torre ); cebar y arrancar la bomba de re- circulación del sistema. La altura del nivel del agua en - el recipiente de agua caliente debe ser entre 1 a 5 pulga- das ( 2.5 a 12.5 cm ).

2.-Arranque del ventilador.-El ventilador debe girar en el - sentido de las manecillas del reloj visto de su parte super- rior o de descarga del aire. Las flechas direccionales so- bre las aspas del ventilador indican también su correcto - sentido de rotación. Si el ventilador opera con vibracio-- nes considerables, checar si las aspas han sido instaladas en su lugar y soporte apropiado, así como si todas tienen el mismo ángulo de paso. Las vibraciones en la torre gene- ralmente disminuyen cuando ha sido operada por un día, después que la madera de la torre se ha humedecido completa-- mente.

Si la potencia del motor no está de acuerdo con la es- pecificada o contratada, ajústese el ángulo de paso de las aspas del ventilador.

C.-Operación de las torres.

1.-Operación de los ventiladores.-Si para mover los ventila- dos se emplean motores de dos velocidades, es necesario - instalar un relevador de tiempo de un mínimo de 20 segun--



dos después de desenergizarse el embobinado de alta velocidad y antes de energizarse el de baja velocidad, debido a los grandes esfuerzos producidos en el equipo por cambios de velocidad; dicho relevador no será necesario si el motor está capacitado para disminuir su velocidad hasta muy cerca de la baja velocidad antes que el embobinado de ésta se energise. Cuando sea necesario cambiar la dirección de rotación al ventilador será necesario instalar un relevador de tiempo de un mínimo de 2 minutos antes de energizarse el motor nuevamente.

- 2.-Recipientes de distribución del agua caliente.-Para obtener la máxima capacidad de las torres es necesario mantener igual flujo y distribución de agua en los recipientes de todas las celdas de la torre. Si los orificios de medición o distribución están limpios y en su lugar y con una columna de agua igual ( de 1 a 5 pulgadas ) en todos los recipientes esto indicará una distribución uniforme. Si se desea hacer algún cambio en un aumento de flujo de agua, será necesario cambiar el tamaño de los orificios de distribución para prevenir y mantener una columna de agua de 1 a 5 pulgadas como se dijo anteriormente, así como una buena distribución, siempre y cuando el diseño de la torre aún lo permita.
- 3.-Recipientes de redistribución.-Existen torres que utilizan un recipiente de redistribución en la parte media del relleno de la misma, el propósito de éste es el de coleccionar y redistribuir uniformemente el agua a la otra mitad del relleno, debido a las características del diseño de la torre; pues de otro modo sería casi imposible conseguir una buena distribución. Los orificios de medición en éstos recipientes también deben mantenerse limpios y en su lugar.
- 4.-Recipientes de colección del agua fría.-Las torres que operan con recipientes de concreto pueden operar con un nivel de agua de 1 a 6 pulgadas ( 2.5 a 15 cm ) abajo del relleno, así como también podrán operar con niveles especiales más bajos, pero será absolutamente necesario el uso de deflectores o mamparas desde el nivel inferior del relleno -

hasta el nivel del agua, para evitar que el aire circule - por fuera del relleno.

- 5.-Agua de repuesto y purga continua.-La cantidad de "agua de repuesto" necesaria para mantener el nivel adecuado o deseado de operación en los recipientes de colección de agua fría, depende de las "pérdidas por evaporación", "pérdidas de arrastre" y la "purga continua". La cantidad de agua de repuesto es de 1.5 % del agua de recirculación en la torre por cada 10<sup>o</sup>F de variación de temperatura del agua dentro de la torre.
- 6.-Operación en invierno.-Las torres que operan en lugares o zonas con temperaturas bajo cero, deberán ser equipadas con motores de dos velocidades e interruptores reversibles. Este equipo no únicamente reduce el consumo de energía, sino que también proporciona un control positivo sobre la formación de hielo.

La formación de hielo puede ser reducida y controlada de la siguiente manera:

- a.-Operar los ventiladores a baja velocidad hacia adelante. Esto reduce el rango de enfriamiento en la torre y aumenta la cantidad de agua caliente sobre las persianas de entrada de aire.
- b.-Poner fuera de servicio los ventiladores. Esto reduce a un mínimo el rango de enfriamiento y aumenta la cantidad de agua caliente sobre las persianas de entrada de aire, a un máximo.
- c.-Operar los ventiladores en reversa. Esta operación calienta el aire que sale a través de las persianas, destruyendo cualquier acumulación de hielo. La operación en reversa puede ser a plena velocidad o baja velocidad sin embargo, se recomienda usar la velocidad alta. La operación de reversa en los ventiladores debe usarse únicamente para eliminar el hielo y no para prevenir su formación.

Durante la operación de reversa en los ventiladores puede formarse hielo en el claro de las aspas del ventilador y el cilindro o en el mismo cilindro, lo cual produciría ruptura del ventilador y cilindro; por esta razón deberá evitarse una operación prolongada de reversa



en el ventilador. Esta formación de hielo, se evitará - si la operación de reversa no excede de 20 a 30 minutos.

7.-Operación intermitente en invierno.-Cuando las torres de enfriamiento son operadas intermitentemente durante el invierno, es necesario drenar el agua de todas las tuberías y del recipiente de la torre para proteger éstas de la congelación o de alguna ruptura de las tuberías en las zonas donde la temperatura llegue a estar bajo cero. Todos los drenajes del recipiente de la torre deberán permanecer abiertos durante todo el tiempo que la torre esté fuera de servicio, para permitir a la lluvia y a la nieve cuando se derrite, drenarse.

Si la torre está equipada con medidor de nivel de aceite y líneas de drenaje, el condensado de los reductores podrá ser drenado por éstos.

8.-Recipientes de distribución de agua caliente.-Los orificios de medición o distribución pueden ser limpiados, sin poner fuera de servicio la torre; es decir, recoger los escombros, tierra, algas, hojas, etc., los cuales caen al recipiente y por el movimiento del agua van a parar a los orificios. Los orificios deberán mantenerse en su lugar para asegurar una buena distribución.

9.-Recipientes de redistribución de agua.-Estos recipientes serán limpiados y se les podrá dar también servicio desde afuera de la torre y por medio de una pequeña escalera con descanso en la parte superior, para poder pararse en ella. Para hacerlos accesibles será necesario remover algunas de las persianas de toma del aire. Los orificios de medición en estos recipientes son perfectamente accesibles desde el exterior de la torre. El área del recipiente abajo exactamente del relleno puede ser limpiada tallando o arrastrando las basuras por medio de un azadón con mango largo.

10.-Recipientes de colección de agua fría.-Para obtener los mejores resultados en los recipientes de madera de las torres, es necesario humedecer la madera del recipiente desde unos días antes de poner en operación la torre, con el objeto de que al hincharse se cierre y apriete para evitar

las fugas de agua al llenar para poner en operación la torre. Si aún después de varios días existen fugas, será necesario sellarlas con marmastic y pábilo.

Las fugas en recipientes de acero galvanizado casi siempre se deben a que están los tornillos flojos en las juntas, por lo cual éstas pueden ser controladas, apretando o aflojando los tornillos, para limpiar y volver a sellar con marmastic a donde sea necesario.

El nivel del agua en los recipientes de agua fría deberá ser checado diariamente. Inspecciónense las mallas de succión del cárcamo cada semana, limpiando todos los escombros, lodos, etc. Las torres deberán tener su válvula de flotador para el control del nivel del agua, la cual deberá operar libremente y mantener el nivel de agua adecuado o seleccionado.

- 11.-Estructura de la torre.-Checar que todos los tornillos de la madera estructural estén apretados.

En las torres que operan en ciertas épocas del año únicamente, se deberá checar que los tornillos estén apretados después que se haya hinchado por completo la madera, en cada arranque.

Los tornillos en el equipo mecánico y en sus soportes deben recibir una especial atención. Checar la madera -- anualmente para indicaciones sobre su deterioración.

- 12.-Relleno de madera.-El relleno de madera debe mantenerse a nivel y limpio, pues de ésta manera es muy fácil prevenir el depósito de lodos, escombros, etc.

Todo el relleno debe estar instalado correctamente, es decir, todas las hileras estarán a nivel y todos los miembros deberán estar en su lugar para garantizar la capacidad en la torre o sea que, para obtener la máxima eficiencia, deben seguirse tales instrucciones.

- 13.-Lubricación del motor.-La lubricación y mantenimiento de cada motor eléctrico, deberá ser de acuerdo con las instrucciones dadas por el fabricante.

- 14.-Chumaceras.-Engrasar las chumaceras antes de poner en operación la torre y después engrásese cada 170 horas de

operación o por lo menos una vez mensualmente. Usese grasa a base de litio con inhibidor contra la oxidación.

- 15.-Reductores.-Checar el nivel de aceite semanalmente y probar mensualmente si el aceite no contiene sedimentos o aguas.
- 16.-Flechas de transmisión.-Checar el alineamiento de la flecha, el apriete de los tornillos y las condiciones de los coples cada seis meses.
- 17.-Ventiladores.-Checar la operación del ventilador diariamente y limpiar las aspas cada vez que sea necesario.
- 18.-Protección anticorrosiva.-Todas las partes metálicas sujetas a corrosión deben ser limpiadas y pintadas periódicamente con pinturas anticorrosivas. Son recomendables pinturas a base de resinas plásticas. El período entre pintada y pintada depende de las condiciones climatológicas del lugar y del ciclo de operación.

Toda la madera de la torre no requiere protección contra el tiempo pues está fabricada y tratada para ese objeto, sin embargo en algunos casos puede ser pintada sólo por apariencia. Puede emplearse cualquier pintura de buena calidad para exteriores.

D.-Instrucciones para poner fuera de operación las torres por época del año.

- 1.-Recipientes y estructura.-Drenar los recipientes de la torre y toda la tubería expuesta a la intemperie. Déjese el drenaje del recipiente abierto. El agua puede permanecer en el recipiente de agua fría, si la torre no está instalada en áreas con temperaturas en el invierno bajo cero (en caso de sacarla de servicio en esta época).

Durante el tiempo que esté fuera de operación la torre, limpiarla y reparar las partes que lo requieran. Aplíquese una capa protectora de pintura si es necesario a todas las partes metálicas. Debe darse particular atención a los soportes del equipo mecánico, flechas de transmisión y sus protectores.

Inspeccionar visualmente el deterioro de la madera y probar sus miembros por sonidos huecos, por medio de un -

martillo tipo piolet o piolet o algún instrumento similar.

Protéjase la torre contra el fuego.

Si la torre tiene protección contra incendio humedézcase continuamente; no debe humedecerse y secarse alternativamente, pues es destructivo para la madera.

2.-Equipo mecánico.

a.-Válvulas de control de flujo.-Engrasar el usillo de operación de la válvula, con grasa a base de litio y manténgase abierta.

b.-Reductores.

i.-Para poner fuera de operación la torre, operar el reductor hasta que se caliente el aceite, a fin de drenarlo y cambiarlo.

ii.-Cada mes, drenar el agua condensada en el reductor y sistema de aceite. Revisar el nivel de aceite y - agregar si es necesario. Operar el equipo 10 a 15 - minutos para bañar todas las partes interiores con - aceite.

iii.-Al poner en operación nuevamente la torre, es necesario esperar a que se caliente el aceite del reductor, para cambiarlo.

3.-Motores eléctricos.-No se pondrá en marcha el motor, hasta no asegurarse de que no hay ningún obstáculo que interfiera al movimiento de rotación del equipo.

Los motores están equipados con baleros prelubricados y será necesario consultar al fabricante del motor para - las instrucciones de lubricación y mantenimiento.

E.-Programa de inspección y mantenimiento.

Recomendaciones generales.-La máxima capacidad y vida en servicio de las torres depende del mantenimiento e inspección de todas las partes de ésta y de sus sistemas de alimentación. En casi todos los casos, una inspección general de la torre - diariamente será suficiente. El programa de inspección indica do en la tabla # 1 puede ser usado por el operador para obtener una buena capacidad en la torre continuamente con un mínimo de mantenimiento. Es recomendable mayor frecuencia de inspección y mantenimiento de las indicadas.

TABLA # 1

## Programa de inspección y mantenimiento.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Inspección de atascamiento.								S				S	
Checar vibraciones y ruidos extraños.	D	D	D	D					A				D
Inspección de cuñas y cuñeros.			SM	SM	SM								
Checar que las ventilas estén abiertas.				M									
Lubricación.		T											M
Checar sellos de aceite.				SM									
Checar nivel del aceite.				S									
Checar sedimentos y agua en el aceite.				M									
Cambio de aceite.				SM									
Checar nivel del agua.							D	D					
Checar fugas de agua.								SM			SM		
Inspección de las condiciones generales.			SM		A	A	A		SM	A	A		
Checar apriete de tornillos.	SM	SM	SM	SM					A	N			SM
Limpieza.	N	SM	N	N	N	N	SM	N			N	S	N
Pintura.	N	N	N	N						N			N

Nomenclatura de la tabla # 1

- |                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1.- Ventilador                 | 11.-Válvula de flotador |
| 2.- Motor                      | 12.-Mallas de succión   |
| 3.- Flecha transmisión         | 13.-Chumacera           |
| 4.- Reductor                   | D.-Diariamente          |
| 5.- Eliminadores               | S.-Semanal              |
| 6.- Relleno                    | M.-Mensual              |
| 7.- Recipiente agua fría       | T.-Trimestral           |
| 8.- Recipiente de distribución | SM.-Semestral           |
| 9.- Miembros estructurales     | A.-Anual                |
| 10.-Cubiertas asbesto          | N.-Cuando sea necesario |

F.-Problemas de las torres, sus causas y solución.

Nomenclatura:

P = Problema

C = Causa

S = Solución

1.-P.-Excesivo chorreo de agua a través del relleno.

C.-Distribución defectuosa del agua.

S.-a.-Revisar que todas las persianas de entrada de aire, secciones de eliminadores o tablillas de relleno de los mismos y los separadores del relleno estén en su lugar.

b.-Que los distribuidores y las tablillas del relleno - estén intactos y a nivel. Para evitar la tendencia a canalizar el agua.

c.-Que los orificios de medición o distribución en el - recipiente de agua caliente estén en su lugar y limpios de cualquier clase de desperdicios.

d.-Que no existan fugas por abajo de las alfardas del - recipiente de distribución o de agua caliente.

2.-P.-La torre no enfría lo suficiente.

C.-Exceso de bombeo o de flujo de agua.

S.-Reducir el flujo de agua en la torre a las condiciones de diseño o cambiar los orificios a mayor medida.

3.-P.-La torre no enfría lo suficiente.

C.-Relleno desnivelado.

S.-Revisar con un nivel de mano tipo carpintero el relleno para este transversal y longitudinalmente nivelado.



- 4.-P.-La torre no enfría lo suficiente.  
C.-Insuficiente flujo de aire.  
S.-Revisar que la potencia del motor sea la de diseño, midiendo la corriente y el voltaje, con un voltímetro o medir la potencia con un wáttmetro. Limpiar de algas, fango y desperdicios el relleno y los eliminadores.
- 5.-P.-Ruidos extraños en el motor.  
C.-El motor operando en una fase.  
S.-Parar el motor e intentar ponerlo en operación nuevamente. El motor no deberá operar en una fase. Revisar el alambrado, controles y motor.
- 6.-P.-Ruidos extraños en el motor.  
C.-Desequilibrio eléctrico.  
S.-Revisar voltajes y corrientes en las tres fases. Corregirlas si es necesario.
- 7.-P.-Ruidos extraños en el motor.  
C.-Baleros en malas condiciones.  
S.-Revisar su lubricación. Reemplazar los que estén en malas condiciones.
- 8.-P.-Calentamiento anormal en el motor.  
C.-Motor sobrecargado, voltaje incorrecto o desbalanceado.  
S.-Revisar el voltaje y la corriente de las tres fases para comparar con los datos de placa.
- 9.-P.-Calentamiento anormal en el motor.  
C.-Exceso de grasa en los baleros.  
S.-Quitar los tapones de las cajas de los baleros y operar el motor para eliminar el exceso de grasa. Reinstalar los tapones en su lugar.
- 10.-P.-Calentamiento anormal en el motor.  
C.-Ventilación pobre.  
S.-Limpiar el motor y revisar las entradas de aire.
- 11.-P.-Calentamiento anormal en el motor.  
C.-Grasa lubricante inadecuada.  
S.-Cambiar a la grasa adecuada. Ver instrucciones de lubricación del fabricante del motor.
- 12.-P.-Calentamiento anormal en el motor.  
C.-Falla en los devanados.

S.-Revisar con el óhmetro.

13.-P.-Ruidos en el reductor.

C.-Aceite de lubricación sucio.

S.-Drénese y soplese con un aceite ligero. Selecciónese el aceite para el soplado de acuerdo con un fabricante de lubricantes y empléese el adecuado al tipo de lubricante usado.

14.-P.-Ruidos en el reductor.

C.-Baleros en malas condiciones.

S.-Si son nuevos, ver si el ruido desaparece después de una semana de operación. Drénese, soplese y póngase aceite nuevamente al reductor. Si aún persiste el ruido reemplácese.

15.-P.-Ruido en el ventilador.

C.-Tornillos flojos en el cilindro del ventilador.

S.-Revisarlos y apretarlos si es necesario.

16.-P.-Vibraciones anormales en el equipo mecánico.

C.-Tornillos flojos.

S.-Revisense y apriétense todos los tornillos del equipo mecánico.

17.-P.-Vibraciones anormales en el equipo mecánico.

C.-Flecha de transmisión desbalanceada.

S.-Revisar que los coples de las flechas en el motor y reductor coincidan con sus marcas en el cuerpo de la flecha y que estén propiamente alineada. Rebalanceése la flecha agregando o eliminando pesos de los tornillos de balanceo.

18.-P.-Vibraciones anormales en el equipo mecánico.

C.-Ventilador desbalanceado.

S.-Revisar que las aspas estén en su lugar apropiado, revisando que coincidan los números de las aspas con los de soporte en la masa del ventilador y que estén completamente a tope los mangos de las mismas. Revisar que todas tengan el mismo ángulo de paso.

19.-P.-Vibraciones anormales en el equipo mecánico.

C.-Calentamiento en los baleros del reductor.

S.-Revisar el juego entre los engranes de la flecha de -



entrada y salida del reductor.

- 20.-P.-Vibraciones anormales en el equipo mecánico.  
C.-Motor desbalanceado.  
S.-Desacoplar el motor y operarlo en vacío. Si el motor -  
aún vibra, rebalancear el motor o reemplazarlo.
- 21.-P.-Vibraciones anormales en el equipo mecánico.  
C.-Calentamiento en las cajas de los baleros.  
S.-Revisar los baleros y los tornillos de montaje.
- 22.-P.-Vibraciones anormales en el equipo mecánico.  
C.-Flechas flexionadas.  
S.-Revisar que las flechas del motor y reductor estén derech  
as y propiamente alineadas.
- 23.-P.-Escama de óxido o incrustaciones y sustancias extrañas  
en el sistema de agua.  
C.-Carencia de o purga continua insuficiente.  
S.-Ver sección de tratamiento de agua.
- 24.-P.-Escama de óxido o incrustaciones y sustancias extrañas  
en el sistema de agua.  
C.-Tratamiento de agua.  
S.-Ver sección de tratamiento de agua.
- 25.-P.-Deterioración en la madera.  
C.-Tratamiento de agua inadecuado o ataque microbiológico.  
S.-Ver sección de tratamiento de agua.

V.- INTRODUCCION AL TRATAMIENTO DE AGUAS PARA ENFRIAMIENTO

En estado de pureza, el agua es un líquido incoloro, insípido e inodoro. Es así mismo, la única sustancia que dentro de las temperaturas normales de nuestro planeta se encuentra en tres formas: Vapor, hielo y agua.

En los lugares que han contado con localizaciones ventajosas cerca de los mares o de los ríos, el agua ha sido factor determinante en el desarrollo de los mismos. En forma más reciente la gran cantidad de agua que demanda la industria para la producción de vapor, para los sistemas de enfriamiento y para los procesos, son los factores más importantes que determinan la localización misma de las industrias.

Cuando se selecciona un sitio para una planta, es necesario determinar las necesidades de agua que tendrá esa industria. Después será necesario determinar si el agua se obtendrá de un pozo de un río, un lago o un depósito artificial. El agua deberá posteriormente analizarse para comprobar si es adecuada para el uso a que se destina o si se puede acondicionar económicamente.

Si toda el agua disponible, incluyendo el agua de los mares fuera adecuada para usarse en la industria, no habría carencia de agua, desgraciadamente, el agua de que disponemos no es pura. Se ha dicho en algunas ocasiones, que el agua es el "solvente universal". Disuelve los desperdicios domésticos de drenaje, así como los desperdicios industriales, el agua es pues, una solución diluida de diversas impurezas.

Un agua estable es aquella que no deja incrustaciones ni es corrosiva. La mayoría de las aguas de pozo son estables en el pozo; sin embargo, un aumento de temperatura o aereación pueden con frecuencia bastar para que se formen incrustaciones o se vuelvan corrosivas. Generalmente las aguas de superficie son también inestables en el uso. Son usualmente corrosivas, pero pueden formar incrustaciones bajo ciertas condiciones.

Para determinar la estabilidad del agua existen dos indicadores comunmente aceptados; que son el Índice de Saturación de Langelier y el Índice de Estabilidad de Ryznar. Estos índices predicen la corrosividad o potencial de incrustación de un agua determinada y pueden ser calculados a partir de la dureza, contenido mineral, alcalinidad, pH y temperatura.

El Índice de Saturación de Langelier es el valor pH actual del agua menos el pH de saturación del carbonato de calcio para la misma agua (  $pH - pH_s$  ). Un valor positivo indica tendencia a formar incrustación. Un valor negativo indica tendencia a producir corrosión.

El Índice de Estabilidad de Ryznar de un agua es igual a - dos veces el pH de saturación del carbonato de calcio menos el - valor pH actual del agua (  $2pH_s - pH$  ). Este es más exacto y - muestra hasta que punto un agua puede causar incrustación o co-- rrosión bajo condiciones específicas. La formación de depósitos tenderá a ocurrir en un agua con un índice de estabilidad infe-- rior a 6. Esta tendencia aumenta rápidamente conforme se acerca a un índice de estabilidad de 4. Un agua es corrosiva con un ín-- dice de estabilidad superior a 6, aumentando su intensidad al - incrementarse su valor.

El valor de  $pH_s$  del carbonato de calcio se obtiene de la - siguiente relación:

$$pH_s = ( 9.3 + A + B ) - ( C + D ) \quad (37)$$

donde: A = Factor de sólidos totales en ppm.

B = Factor de temperatura en °F .

C = Factor de dureza de calcio expresada como ppm de car-- bonato de calcio.

D = Factor de alcalinidad expresada como ppm de carbonato de calcio.

Nota: A, B, C y D se obtienen de la tabla # 2

Los principales problemas ocasionados por las impurezas del agua en un sistema de enfriamiento por recirculación son:

- 1.-Corrosión en equipo y tuberías. Lo anterior ocasiona repara-- ciones costosas, pérdidas de producción y en un caso extremo - el cambio total del equipo.
- 2.-Depósitos ( incrustaciones o lodos ) que restringen el flujo del agua y pueden ocasionar una pérdida seria de eficiencia - e incluso la falla del equipo de cambio de calor.
- 3.-Problema microbiológico.

CORROSION.-La corrosión se ha definido como la tendencia - que tienen los metales a reaccionar con el medio que lo rodea - para convertirse en una forma estable, que normalmente es de -

TABLA # 2

Factores para calcular el  $pH_s$  del carbonato de calcio.

Sólidos Totales		Dureza de calcio		Alcalinidad	
ppm	A	ppm $CaCO_3$	C	ppm $CaCO_3$	D
50 - 300	0.1	10 - 11	0.6	10 - 11	1.0
400 - 1000	0.2	12 - 13	0.7	12 - 13	1.1
		14 - 17	0.8	14 - 17	1.2
		18 - 22	0.9	18 - 22	1.3
		23 - 27	1.0	23 - 27	1.4
Temperatura		28 - 34	1.1	28 - 34	1.5
°F	B	35 - 43	1.2	35 - 43	1.6
32 - 34	2.6	44 - 55	1.3	44 - 55	1.7
36 - 42	2.5	56 - 69	1.4	56 - 69	1.8
44 - 48	2.4	70 - 87	1.5	70 - 87	1.9
50 - 56	2.3	88 - 110	1.6	88 - 110	2.0
58 - 62	2.2	111 - 138	1.7	111 - 138	2.1
64 - 70	2.1	139 - 174	1.8	139 - 174	2.2
72 - 80	2.0	175 - 220	1.9	175 - 220	2.3
82 - 88	1.9	230 - 270	2.0	230 - 270	2.4
90 - 98	1.8	280 - 340	2.1	280 - 340	2.5
100 - 110	1.7	350 - 430	2.2	350 - 430	2.6
112 - 122	1.6	440 - 550	2.3	440 - 550	2.7
124 - 132	1.5	560 - 690	2.4	560 - 690	2.8
134 - 146	1.4	700 - 870	2.5	700 - 870	2.9
148 - 160	1.3	880 - 1000	2.6	880 - 1000	3.0
162 - 178	1.2				

óxidos. De hecho, los factores que influyen sobre la corrosión en un sistema de enfriamiento por recirculación son :

a.-Temperatura.

b.-Concentración de oxígeno.

c.-Velocidad de flujo sobre las superficies metálicas.

d.-Bajo pH.

e.-Presencia de cloruros y sulfatos.

- f.-Concentración de áreas anódico-catódicas por aereación diferencial.
- g.-Condiciones diferenciales de temperatura.
- h.-Presencia de metales distintos que ocasionan la acción galvánica.

En los sistemas de enfriamiento, se recurre al uso de inhibidores tales como cromatos, ortofosfatos, ferrocianuro, bicarbonato, polifosfatos, aceites solubles, aminas cuaternarias y otras materias orgánicas.

Los inhibidores químicos reducen o detienen la corrosión interfiriendo con el mecanismo de ésta.

Los tratamientos combinados de cromatos y polifosfatos son sin duda los más efectivos, ya que con dosis relativamente pequeñas proporcionan protección efectiva.

La dosificación es variable y depende de la velocidad del agua, el tipo de sistema y el grado de corrosión permisible.

Una dosificación típica para sistemas cerrados con recirculación es de 20 a 30 ppm. Para sistemas de un solo paso basta con 5 a 15 ppm.

Es importante el rango de pH de aplicación para el inhibidor.

Para el cálculo de la cantidad de inhibidor se tiene la siguiente ecuación:

$$I = \text{ppm} / 120X \quad (38)$$

donde: I = cantidad de inhibidor en lb/1000 gal de agua de re-  
puesto.

ppm = dosis de inhibidor.

X = ciclos de concentración.

$$\text{donde: } X = Cl_R / Cl_W \quad (39)$$

$Cl_R$  = Concentración de cloruros del agua circulante.

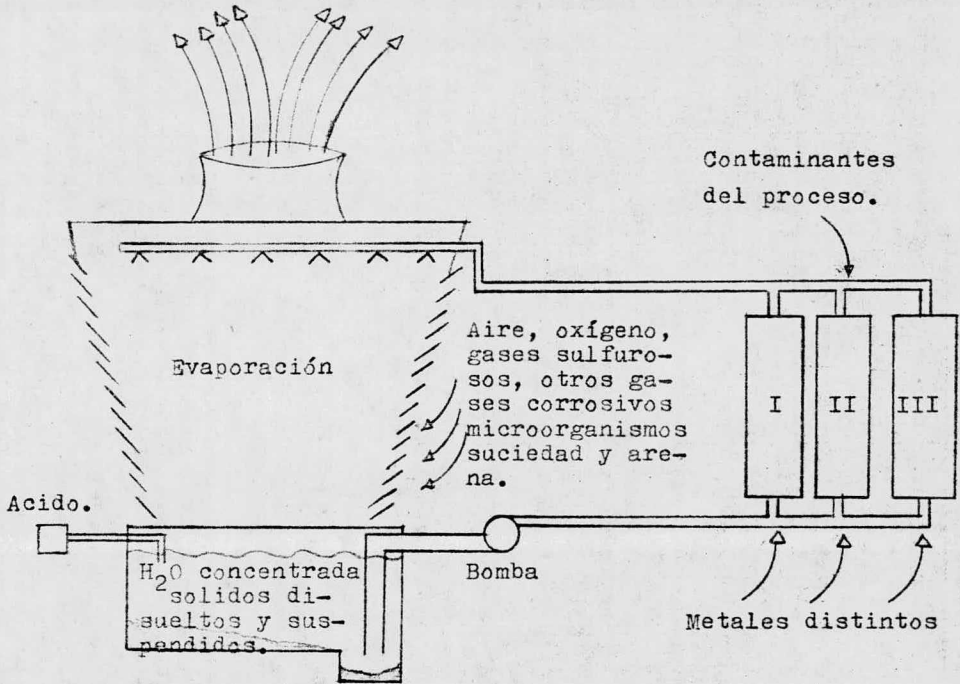
$Cl_W$  = Concentración de cloruros del agua de repuesto.

DEPOSITOS.-En los sistemas de agua de enfriamiento los depósitos pueden clasificarse en dos grupos principales:

Obstrucciones e incrustaciones.

Figura # 11

Factores corrosivos en sistemas de torres de enfriamiento.



- I.- Intercambiador de calor de acero.
- II.- Intercambiador de calor de aluminio.
- III.- Condensador de metal admiralty.

Como ejemplo de obstrucciones comunes :

- a.-Suciedad y limos.
- b.-Arena.
- c.-Productos de corrosión.
- d.-Orgánicos naturales.
- e.-Masas microbiológicas.
- f.-Desechos en general.
- g.-Alúmina.
- h.-Fosfato de aluminio.
- i.-Fosfato de hierro.

Algunos componentes de las incrustaciones son :

- a.-Carbonato de calcio.
- b.-Sulfato de calcio.
- c.-Fosfato de calcio.
- d.-Sales de magnesio.
- e.-Sílice.

La obstrucción, ensuciamiento o taponamiento es la acumulación de materiales sólidos diferentes a los incrustantes, de tal manera que estorban la operación del equipo o contribuyen a su deterioro.

En sistemas abiertos recirculantes, existen principalmente suciedad y sedimentos, arena y productos corrosivos, alúmina, fosfatos de aluminio o de hierro, orgánicos naturales, masas microbiológicas y desechos en general.

En sistemas recirculantes cerrados productos de corrosión y orgánicos.

En sistemas de un paso, suciedad, sedimentos, masas microbiológicas y desechos en general.

En los sistemas acuosos, la incrustación es una capa densa en la que predominan los materiales inorgánicos, formada por la sobre-saturación de los componentes solubles en el agua.

Hay cuatro factores principales que determinan la tendencia incrustante del agua: La temperatura, la alcalinidad o acidéz ( pH ), la cantidad de elementos incrustantes presentes y la influencia de otras materias disueltas que pueden formar incrustaciones o no. La evaporación y cambios de temperatura son las causas mayores de la precipitación de sólidos.



Los principales métodos para impedir la incrustación son :

- a.-El tratamiento externo que puede ser por suavización con cal en frío o por medio de intercambio iónico, proporciona estabilidad dentro de límites estrechos y para ampliar estos límites se hace seguir de la adición de polifosfatos o de otros agentes secuestrantes.
- b.-Algunos materiales orgánicos sólo o como complemento de los polifosfatos, ayudan también al control de la incrustación, acondicionando los cristales de materias incrustantes para hacerlos no adherentes.
- c.-El llamado tratamiento químico, evita la formación de sales incrustantes de calcio y de magnesio mediante la adición de ácido sulfúrico al agua para controlar el pH. Al cambiar el índice de estabilidad del agua por la reducción en el pH, el agua se vuelve corrosiva.

El método anterior aplicado a un sistema por recirculación requiere un control del número de concentraciones en el sistema. En la determinación de la relación de concentración adecuada siempre es necesario considerar el no exceder los límites de solubilidad de los componentes del agua en particular.

El ácido sulfúrico que es necesario agregar se puede calcular por la siguiente fórmula :

$$Ac. = 1.06 \left[ b_1 - ( b_2 / X ) \right] \quad (40)$$

donde : Ac. = ppm de ácido sulfúrico, 66° Be' que se debe agregar en base al agua de repuesto.

$b_1$  = Alcalinidad al anaranjado de metilo en ppm de carbonato de calcio en el agua de repuesto.

$b_2$  = Alcalinidad al anaranjado de metilo en ppm de carbonato de calcio en el agua de recirculación al pH que se desea llegar ( figura # 12 ).

X = Ciclos de concentración.

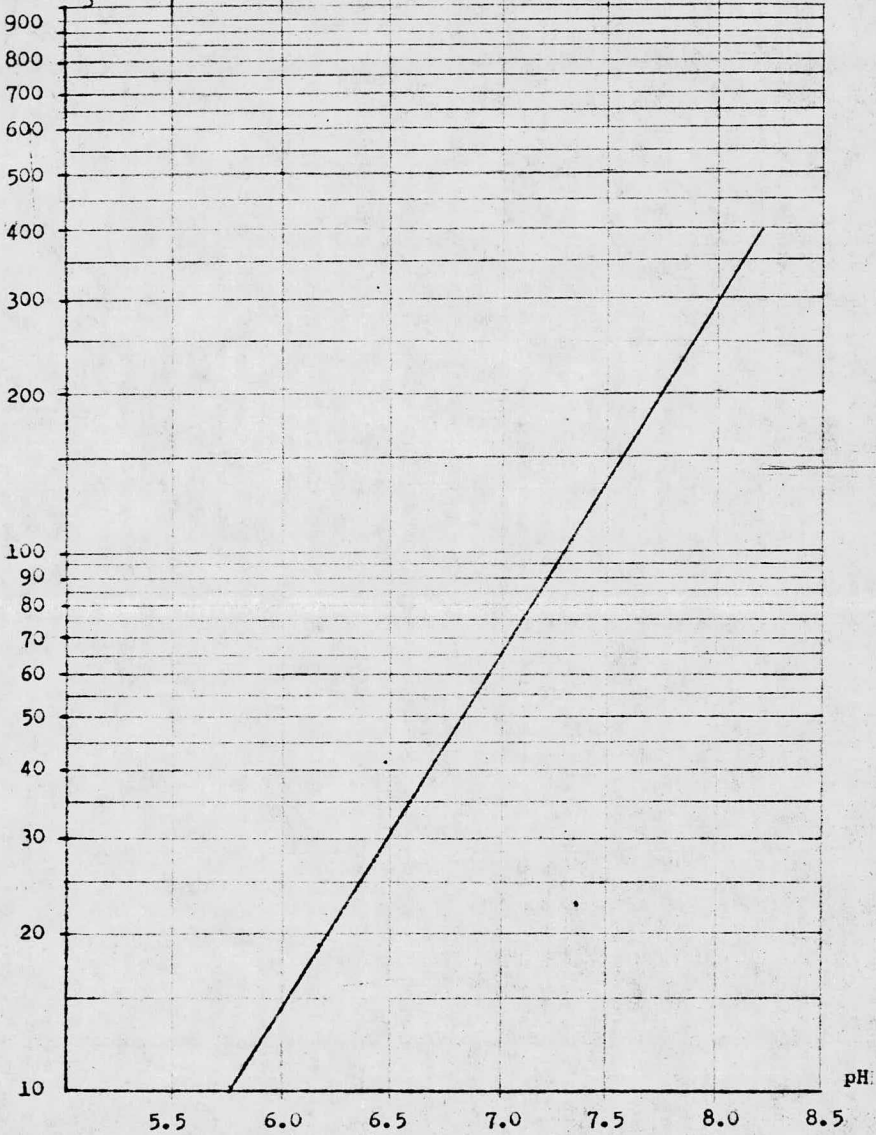
La misma fórmula expresada en libras de ácido por 1 000 galones queda :

$$Ac' = \left[ b_1 - ( b_2 / X ) \right] / 114 \quad (41)$$

donde : Ac' = Libras de ácido sulfúrico, 66° Be' por cada 1 000

Alcalinidad  
ppm ( $\text{HCO}_3$ )

Figura # 12  
Alcalinidad vs pH



galones de agua de repuesto.

El valor de la alcalinidad al anaranjado de metilo deberá estar dada por el análisis del agua de repuesto y es la característica más importante del agua para conocer su tendencia incrustante.

La alcalinidad puede ser dividida en dos clases con respecto al pH.

a.-Alcalinidad de la fenoftaleína ( F ).-Es una medida de los iones  $\text{CO}_3^{=}$  y  $\text{OH}^-$ ; se determina por titulación con ácido a un pH de 8.3 y fenoftaleína como indicador. Generalmente no se encuentra en aguas naturales.

b.-Alcalinidad al anaranjado de metilo o total ( M ).-Es una medida de la alcalinidad total incluyendo la anterior. Se determina por titulación a un pH de 4.3 con anaranjado de metilo como indicador.

La diferencia entre las dos clases de alcalinidad da la concentración de iones bicarbonato. La relación entre las alcalinidades puede quedar expresada con las ecuaciones siguientes :

a.- Si  $\text{Alk (F)} = 0$

$$\text{Alk (M)} = \text{HCO}_3^- \quad (42)$$

b.- Si  $2 \text{Alk (F)} \leq \text{Alk (M)}$

$$\text{Alk (M)} = \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{=} \quad (43)$$

c.- Si  $2 \text{Alk (F)} \geq \text{Alk (M)}$

$$\text{Alk (M)} = \text{CO}_3^{=} + \text{OH}^- \quad (44)$$

PROBLEMA MICROBIOLOGICO.- En un sistema de enfriamiento por recirculación, el crecimiento microbiológico es a menudo fuente de problemas, ya que los depósitos formados por el mismo, restringen el flujo del agua y afectan la transferencia de calor en los cambiadores respectivos. La eficiencia de una planta se ve por lo tanto reducida por este motivo.

Los principales factores para el desarrollo microbiológico son en importancia :

a.-Nutrientes.-Por ejemplo los hidrocarburos u otras fuentes de carbono pueden servir como alimento a los microorganismos.

b.-La atmósfera.-El desarrollo de los organismos depende de la -

disponibilidad de oxígeno o de anhídrido carbónico.

c.-La ubicación.-Factores tales como la luz del sol o la sombra, la humedad o sequedad, afectan muy significativamente el promedio de crecimiento.

d.-La temperatura.-Los organismos que crean los limos tienden a florecer entre 40 y 150°F ( 4.4 y 65.6°C ). Se pueden resumir los problemas que se presentan en la madera de la siguiente forma : ( figura # 13 )

a.-Destrucción química.-Ocasionada por la lexicivación de algunas sustancias solubles de la madera y por la reacción de los componentes de la madera con los productos presentes en el agua de circulación.

Una alcalinidad elevada ( pH mayor de 8.5 ), así como el uso de agentes oxidantes del tipo del cloro y del bromo, aceleran el proceso de lexicivación, produciendo la deslignificación de la madera.

b.-Ataque biológico.-El ataque biológico superficial y la separación selectiva de la celulosa en la superficie de la madera, que es ocasionada por diversos microorganismos. A este tipo de ataque, se le conoce como putrefacción superficial.

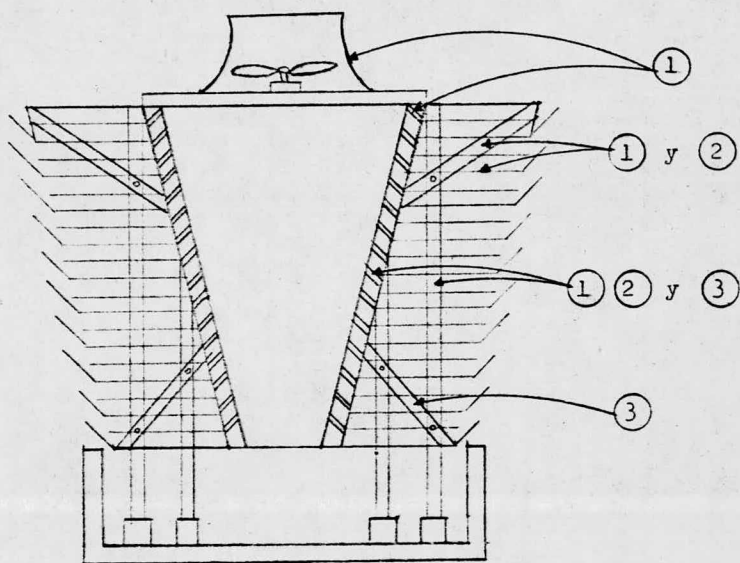
c.-Putrefacción interna.-Un tercer medio de destrucción, también del tipo microbiológico es el ataque interno de la madera, de nominado también putrefacción interna. Este tipo de ataque se localiza al centro en las porciones internas de la madera y es más difícil de reconocer debido a que en muchas ocasiones, las superficies externas de la madera se encuentran en condiciones excelentes.

Los productos químicos más comunmente empleados para este objeto son:

<u>Producto</u>	<u>Estado</u>
Cloro	Gas
Hipoclorito de calcio	Cristalino
Hipoclorito de sodio	Cristalino
Clorofenilfenato	Briquetas
Tetraclorofenato	Briquetas
Pentaclorofenato	Briquetas
Permanganato de potasio	Cristalino
Sulfato de cobre	Cristalino

Figura # 13

Lugares donde la madera es afectada



- ① Putrefacción interna
- ② Putrefacción superficial
- ③ Deslignificación

TABLA # 3

## Características de la destrucción de la madera.

Deslignificación	Ataque microbiológico.
-Las fibras son normalmente de color blanco.	-Las fibras son de color oscuro
-Fibras largas 1/4 a 1 in.	-Fibras cortas 1/4 in.
-Fibras fuertes, se separan fácilmente.	-Fibras débiles, se desmoronan con facilidad.
-Ataque superficial únicamente	-El ataque superficial puede alcanzar 1/4 in o más.
-El cuerpo de la madera permanece fuerte y duro.	-El cuadrículado es evidente al secarse la madera.
-El peso de la madera es normal.	-La madera es ligera en peso.
-La madera se astilla al fracturarse.	-La madera es quebradiza.
	-El ataque interno deja una cubierta exterior de buena apariencia.

Se considera el empleo de cloro, cuando el consumo pasa de 1 kg/día e hipocloritos cuando el consumo sea menor de esta cantidad.

El cloro puede ser adicionado ya sea en forma continua o intermitente. Cuando se hace en forma continua basta con mantener una concentración de 0.3 a 0.5 ppm. Cuando la dosificación es intermitente, se eleva la concentración a 1.0 ppm durante algunas horas suspendiendo la dosificación durante el tiempo restante.

Para el cálculo del cloro que se emplea se puede considerar una dosis de 5 a 10 ppm de cloro durante una hora cada 8 horas, ya que de esta forma se obtienen mejores resultados que con una cloración continua. Para este cálculo se usa la siguiente ecuación :

$$Cl = 0.0015 \times C \times ppm \quad (45)$$

donde : Cl = Consumo de cloro en libras por día.

C = Flujo de circulación en galones por minuto.

ppm = Dosis de cloro ( 5 a 10 ppm )

En ocasiones se recomienda como un complemento al tratamien

to con cloro la adición de un microbicida con objeto de evitar -  
la inmunidad por parte de algunos microorganismos.

VI.- INSTRUMENTOS PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LAS TORRES DE  
ENFRIAMIENTO.



Mediciones del gasto de agua.-La medición del gasto podrá hacerse por cualquiera de los siguientes caminos :

Tubo pitot

Tubo con orificio

Medición volumétrica

Vertedor

La exactitud deberá ser de más o menos 1.25 %; la localización del punto de medición dependerá de la naturaleza de la instalación por probar. En caso de utilizar un tubo pitot, se deberán tomar dos juegos completos de lecturas de toda la sección, - uno antes y otro después de la prueba.

El lugar de medición debe situarse en un tramo recto de la tubería y se efectúa introduciendo el tubo pitot hasta obtener cifras medias, ya que el valor de éstas varía según la posición del tubo medidor, el cual está conectado a un manómetro en "U", que registra la presión diferencial como medida del caudal. Este tipo de medidor es el más adecuado para pruebas instantáneas.

Para un registro continuo y permanente del caudal, se puede emplear un medidor basado en el principio de que si se coloca una obstrucción en la línea de flujo, se produce una pérdida de presión en la misma, la cual sirve como medida del caudal. Al dispositivo empleado para producir esta presión diferencial se le llama primario y bien puede ser un medidor de orificio concéntrico de borde afilado o un tubo venturi.

Mediciones de la temperatura del agua.-La medición debe hacerse con método aceptado por la ASME, como termómetros de resistencia o termómetros de mercurio, los termómetros deben indicar o registrar graduaciones de 0.2° F.

El elemento sensitivo del termómetro deberá localizarse cuidadosamente en donde el agua esté completamente mezclada.

La lectura del agua caliente deberá efectuarse en el cabezal de distribución antes del primer tubo elevador.

La lectura del agua fría deberá medirse preferentemente en la descarga de la bomba de agua de circulación, tomando en cuenta la elevación de temperatura del agua debida a las pérdidas de energía.

La temperatura de agua de repuesto debe medirse en el punto

en que dicha agua entra al sistema. La temperatura del agua de -descarga debe medirse en el punto en que dicha agua deja el sistema.

Medición de la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada.-Esta temperatura debe medirse con psicómetros de aspiración mecánica. Los instrumentos podrán indicar o registrar graduaciones de  $0.25^{\circ}\text{F}$ . El elemento sensitivo debe "ver" únicamente superficies que estén aproximadamente a la temperatura de bulbo seco evitándose que quede expuesto a los rayos directos del sol o a cualquier otra fuente de calor radiante, la velocidad del aire sobre el elemento sensitivo deberá mantenerse entre 950 y 1 050 ft/min. La mecha deberá mantenerse húmeda mediante adición de agua destilada de temperatura de aproximadamente igual a la del bulbo húmedo por medir.

Para la medición de la temperatura del bulbo húmedo del aire de entrada los psicómetros deberán localizarse a 5 ft arriba del borde del tanque inferior y a una distancia de cuando más 4 pies de la entrada de aire a la torre. Se colocarán 3 estaciones de medición igualmente espaciadas a lo largo de cada lado de entrada de aire de la torre.

Medición de la humedad relativa.-Los psicómetros, como su nombre lo indica, dan lecturas de bulbo húmedo que fácilmente son convertibles a porcentajes de humedad mediante las tablas de conversión. La carta psicométrica es una representación gráfica de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y puede utilizarse para temperaturas de bulbo seco o húmedo. Las lecturas tomadas por el psicómetro y el uso de las tablas psicométricas permiten determinar otras variables, tales como el porcentaje de humedad relativa, calor húmedo, volumen húmedo, etc.

Para lecturas momentáneas e inmediatas puede usarse el tipo común de psicómetro compuesto exclusivamente de dos termómetros uno para lectura de bulbo seco y otro para lectura de bulbo húmedo, debidamente sujetados en alguna forma a una manivela para girarlos en el aire.

Medición de la velocidad del viento.-Se efectúa con un anemómetro del tipo de copa rotatoria. La medición debe hacerse en un lugar libre de obstrucciones cerca de la torre del lado donde

sople el viento y a una altura de 5 pies sobre el borde del tanque de la torre.

Medición de potencia consumida por los motores de los ventiladores.-En el caso de motores eléctricos deberá determinarse por medición del voltaje, la corriente y el factor de potencia o directamente con wáttmetro.

Análisis del agua.-El tratamiento requerido por cualquier sistema circulatorio de agua depende principalmente de su análisis químico. Las impurezas más comunes son los carbonatos y sulfatos de magnesio y calcio. El análisis común de agua encierra la dureza, el valor pH, la alcalinidad y posiblemente los iones de cloro y sulfato. Para controlar el pH se utiliza registradores de pH de medición continua. El método que se utiliza es el electrométrico.

El método electrométrico se basa en el voltaje generado por la inmersión de dos electrodos similares en la solución, para formar la celda galvánica. Se ha comprobado que con determinados electrodos este voltaje depende del valor pH de la solución.

Puede registrarse y controlarse el pH con mucha precisión por medio de un potenciómetro o un sistema de medición electrónico. El análisis del agua debe efectuarse con las condiciones establecidas en el capítulo V.

Debido a los puntos expuestos en este capítulo, es necesario eliminar toda discrepancia entre el rendimiento especificado de las torres de enfriamiento y el verdaderamente obtenido, para lograr un funcionamiento eficaz.

VII.- GENERALIDADES SOBRE EL LUGAR DE OPERACION DE LA TORRE.

Breve historia del lugar.-Tizayuca.-Huitzilihuitl segundo rey azteca, hijo de Acamapichtli, nació en lo que hoy se llama Tizayuca y subió al trono a la muerte de su padre en el año de 1396.

De esa brava y guerrera tribu Nahuatlaca procedente de Aztlán ( lugar de garzas ); se disgregó un pequeño grupo en el año de 1350 y se detuvo en un fértil y risueño valle que invitaba a la tranquilidad y al descanso, para allí fundar un pueblo al que le dieron el nombre de Tizayocan que quiere decir: " Lugar donde se hace tiza ". Pronto la población adquirió fama y renombre, - habiéndose convertido por la fertilidad de su suelo y la bondad de su clima, en lugar de meditación y retiro de " Tlacatecuhtlis " ( jefes de los ejércitos militares de primer orden, que tenían bajo su mando a los caballeros tigres y a los caballeros águilas, con frecuencia buscaban disipar sus fatigas y preocupaciones ).

De la primera época de la historia de Tizayuca, las únicas ruinas existentes se localizan en el paraje denominado Tihuacan contiguo a las exhaciendas de San Miguel y según la opinión de - autorizados antropólogos, pertenecieron a pueblos que alcanzaron un alto nivel de desarrollo y que desaparecieron en el tiempo - del " Matazahuatl ", terrible peste que diezmo a la población - indígena en el año de 1546.

Tizayuca, durante la colonia, fué encomendada la mitad a - Don Alfonso Pérez Zamora, quedando el resto en propiedad de la - corona real. Su superficie en aquel tiempo era muy corta, pues - no llegaba a los 14 kilometros cuadrados, o sea la sexta parte - de lo que tiene ahora.

La población de Tizayuca, en el siglo XVI estaba habitada - por casi 1000 habitantes de los cuales 620 fueron tributarios de su majestad, pagando la contribución de acuerdo con su estado - civil y con las leyes establecidas al respecto.

Posteriormente, Tizayuca formó parte del extenso estado de México, pasando a pertenecer al estado de Hidalgo a raíz de la - erección del estado de Hidalgo el 16 de enero de 1869.

Localización.-El estado de Hidalgo se encuentra localizado sobre la sierra madre oriental, pero se extiende una pequeña -

parte sobre la cuenca de México, con una superficie de 20 870 - kilómetros cuadrados, localizado entre los paralelos  $19^{\circ} 36'$  y  $21^{\circ} 24'$  de latitud norte y entre los meridianos  $97^{\circ} 58'$  y  $99^{\circ} 54'$  de latitud oeste del meridiano de Greenwich.

Limita al norte con San Luis Potosí, al noroeste con Querétaro, al este con los estados de Veracruz y Puebla y al sur con los estados de México y Tlaxcala.

Tizayuca, como uno de los municipios que integran el estado de Hidalgo se encuentra situado en el kilómetro 52 de la carretera México-Pachuca y sus colindancias son las siguientes: Al norte con el municipio de Tolcayuca, al sur, este y oeste con el estado de México.

Tizayuca se haya situado en los  $19^{\circ} 50'$  de latitud norte y  $98^{\circ} 59'$  de latitud oeste del meridiano de Greenwich, su altura sobre el nivel del mar es de 2 270 metros, su superficie municipal total es de 92 kilómetros cuadrados y su población es de 15 189 habitantes según resultados del IX censo general de 1970.

Topografía.-Se localiza sobre un terreno completamente plano con pequeños accidentes topográficos, presentando una diferencia máxima en cotas de 5 metros. Se encuentra en una zona de mediana actividad sísmica, en conclusión se puede decir que la topografía del terreno es bastante buena para la construcción de cualquier tipo de obra, tanto subterránea como a nivel.

Climatología.-La climatología del municipio de Tizayuca en general goza de clima templado parecido al que tiene la Ciudad de México.

La temperatura media varía de los  $18^{\circ}\text{C}$  a los  $22^{\circ}\text{C}$ , observándose que los acentos máximos corresponden a los meses de febrero, marzo, abril, hasta agosto, alcanzando temperaturas hasta de  $30^{\circ}\text{C}$ .

El promedio mínimo de temperaturas se alcanza en los meses de septiembre a enero, alcanzando temperaturas hasta de  $6^{\circ}\text{C}$ , el número de días nublados se inicia en diciembre y termina en febrero.

Con respecto a la máxima lluvia corresponde a los meses de junio a septiembre, iniciándose la máxima precipitación pluvial en junio, que es de un valor medio aproximado de 80 milímetros,

y en septiembre baja a 30 milímetros como valor medio aproximado. Durante todo el año los vientos provienen principalmente del noreste, variando un poco al norte.

Los siguientes datos de temperatura, lluvias y humedad fueron proporcionados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, sirviéndose de las estaciones instaladas convenientemente en la región del valle de México, siendo unas de estas estaciones las de Tizayuca y Tezontepec. Por las observaciones hechas en cada una de las estaciones antes mencionadas se han formulado las siguientes tablas.

Secretaría de Recursos Hidráulicos ( SRH ).

Dirección de Hidrología

Depto. de Hidrometría - Oficina de Climatología

Municipio de Tizayuca, Hgo. - División Valle de México

TABLA # 4

Temperaturas medias anuales correspondientes a los años de 1964 a 1975.

<u>Años</u>	<u>T (°C)</u>	<u>Años</u>	<u>T. (°C)</u>	<u>Años</u>	<u>T (°C)</u>
1964	16.3	1968	16.0	1972	16.8
1965	15.9	1969	16.9	1973	16.9
1966	15.8	1970	16.9	1974	16.2
1967	15.9	1971	16.4	1975	16.3

TABLA # 5

Temperaturas medias correspondientes a cada mes desde el año de 1970 a 1975.

	<u>1970</u>	<u>1971</u>	<u>1972</u>	<u>1973</u>	<u>1974</u>	<u>1975</u>
Enero	12.5	13.9	12.9	13.4	14.5	12.6
Febrero	14.0	13.8	13.2	15.6	14.2	14.8
Marzo	17.3	16.8	16.2	18.8	16.5	17.7
Abril	20.8	17.3	19.5	19.7	17.8	19.8
Mayo	19.6	19.6	20.0	19.8	19.5	19.3
Junio	18.6	18.4	18.6	18.8	18.0	18.3
Julio	17.9	17.4	17.7	17.8	16.7	16.9
Agosto	18.2	17.1	17.4	17.9	17.3	17.5



	<u>1970</u>	<u>1971</u>	<u>1972</u>	<u>1973</u>	<u>1974</u>	<u>1975</u>
Septiembre	18.1	18.0	18.0	18.0	16.9	16.0
Octubre	17.8	16.7	17.0	16.7	15.0	15.6
Noviembre	13.6	14.3	16.8	14.6	14.0	13.8
Diciembre	13.9	13.5	13.8	12.0	13.8	13.6

Nota: las temperaturas estan dadas en °C.

TABLA # 6

Precipitación pluvial ( milímetros ).

	<u>1970</u>	<u>1971</u>	<u>1972</u>	<u>1973</u>	<u>1974</u>	<u>1975</u>
Enero	1.5	1.3	2.5	0.8	4.1	27.9
Febrero	17.5	0.0	1.0	1.8	0.4	15.0
Marzo	----	27.2	6.0	0.3	6.8	----
Abril	10.3	5.4	19.0	31.2	45.2	4.7
Mayo	23.3	32.9	82.0	85.8	55.5	108.4
Junio	163.7	71.3	78.3	105.0	84.0	122.8
Julio	99.9	116.0	114.7	128.1	240.3	167.5
Agosto	40.5	57.8	42.1	133.6	120.3	110.0
Septiembre	112.6	140.8	89.7	80.9	147.3	42.9
Octubre	21.0	50.1	44.7	79.2	21.4	3.0
Noviembre	1.4	6.0	30.0	35.0	6.2	0.0
Diciembre	----	23.1	2.1	2.4	0.5	----
Total	607.1	531.9	512.7	684.1	732.0	802.2

Nota: Los meses que no tienen registro de lluvias, no se calcularon por ser más de 15 días sin datos.

TABLA # 7

Humedad Relativa ( % ).

	<u>1967</u>	<u>1968</u>	<u>1969</u>	<u>1970</u>	<u>1971</u>	<u>1972</u>
Enero	----	66	64	----	49	63
Febrero	----	64	62	----	41	50
Marzo	----	54	58	----	49	52
Abril	----	68	56	----	41	51
Mayo	----	70	57	----	49	59
Junio	----	77	67	----	67	70
Julio	----	81	75	----	69	73



	<u>1967</u>	<u>1968</u>	<u>1969</u>	<u>1970</u>	<u>1971</u>	<u>1972</u>
Agosto	82	79	81	----	70	61
Septiembre	84	82	79	----	72	39
Octubre	79	76	70	----	75	36
Noviembre	71	65	63	----	67	55
Diciembre	70	72	59	----	70	57
Promedio Anual	----	71	66	----	60	56

Nota: Los meses que no tienen registro, no se calcularon - por ser más de 15 días sin datos, y el año de 1970 no se registró.

En el municipio de Tezontepec, colindante con el municipio de Tizayuca, se registraron los valores promedios anuales para - efectuar una comparación con los valores promedios de temperaturas anuales de la región que nos interesa.

TABLA # 8

Temperaturas medias anuales correspondientes a los años de 1971 a 1975, para el municipio de Tezontepec, cuya altitud es de 2 010 metros sobre el nivel del mar.

	<u>1971</u>	<u>1972</u>	<u>1973</u>	<u>1974</u>	<u>1975</u>
Temperatura ( °C ).	13.4	14.3	14.3	13.6	13.6

Servicio Meteorológico Mexicano - Oficina de Climatología  
Municipio de Tizayuca, Hgo. - División Valle de México.

TABLA # 9

## Vientos Dominantes.

	<u>1970</u>	<u>1971</u>	<u>1972</u>	<u>1973</u>	<u>1974</u>	<u>1975</u>
Enero	NE	NE	NE	NE	NE	N
Febrero	NE	NE	N	NE	NE	NE
Marzo	NE	NE	N	SE	NE	NE
Abril	NE	NE	NE	S	NE	NE
Mayo	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Junio	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Julio	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Agosto	NE	NE	NE	NE	NE	NE

	<u>1970</u>	<u>1971</u>	<u>1972</u>	<u>1973</u>	<u>1974</u>	<u>1975</u>
Septiembre	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Octubre	NE	NE	N	NE	NE	NE
Noviembre	NE	NE	N	NE	NE	W
Diciembre	NE	NE	NE	NE	NE	NE

El valor promedio de la velocidad de viento oscila entre los rangos de 2.1 a 6.0 metros por segundo, durante todos los años que han transcurrido, sin tomar en cuenta los meses correspondientes a 1976.

Vialidad.-Dentro del estado de Hidalgo se localizan las principales carreteras como son México-Pachuca, Tulancingo-Tuxpan; así como caminos transversales, Actopan-Progreso y Tula-Tepeji del Río.

Todas se ven completadas con caminos vecinales, esto hace que Tizayuca sea un centro principal entre México y Pachuca. El municipio cuenta con una línea recta de ferrocarril que es la de México-Pachuca, pasando sobre la localidad de Huitzila a 3 kilómetros aproximadamente del pueblo de Tizayuca. Otros medios de comunicación son los correos, teléfonos, radio y televisión.

Factores Externos.-El estado de Hidalgo forma parte de la región central y es una de las zonas mejor comunicadas en el país caracterizada por la producción agrícola, así como también la ganadería, minería, la industria y el comercio. Estas industrias vitales en vías de desarrollo están sujetas a una serie de necesidades como es la entrega de sus materias primas a la capital y la de recibir mercancías elaboradas, urge pues planificar la distribución y consumo a fin de satisfacer las necesidades internas y externas del estado. Las autoridades actuales tienen el firme propósito de engrandecer este pueblo y se nota la actividad que despliegan en la limpieza y arreglo de sus calles, así como el factor determinante de industrialización como lo prueban las fábricas: Ambars, Triangel de México, Pan y Cam, al igual que las dos mosaiqueras y otras que dan trabajo a numerosos obreros.

La zona industrial está empleando mucho personal del mismo pueblo, por lo que la población de Tizayuca tiende a ser un 60 % de obrero, 20 % comerciante y 20 % campesina. La construcción de la zona industrial es bastante extensa ya que alcanza un total -

de 15 kilómetros cuadrados y que incluye la cuenca lechera y -  
muchas otras fábricas como son la tubos de asbesto cemento -  
( Comecop ) y una armadora de autos.



VIII.- DESARROLLO DE LAS ECUACIONES FUNDAMENTALES PARA EL  
DISEÑO DEL EQUIPO.

Temperatura de bulbo seco ( $T_G$ ).--Es la temperatura de una mezcla de gas-vapor determinada ordinariamente introduciendo un termómetro en la mezcla.

Humedad Absoluta Molar ( $Y$ ).--Es la relación entre las moles de vapor y las moles de gas exentas de vapor.

$$Y = p_A / ( P_t - p_A ) \quad (46)$$

donde:  $p_A$  = presión parcial del componente volátil en la fase gaseosa.

$P_t$  = presión total de la fase gaseosa.

Humedad Absoluta ( $Y'$ ).--Se define como la relación entre la masa de vapor y la masa de gas exenta de vapor.

$$Y' = \left[ p_A / ( P_t - p_A ) \right] ( M_A / M_B ) \quad (47)$$

donde:  $M_A$  = masa molecular del componente volátil.

$M_B$  = masa molecular del componente inerte.

Humedad de saturación molar ( $Y_s$ ).--Es la máxima humedad que se puede esperar para un sistema y cuyas unidades son en moles de vapor entre moles de gas exentas de vapor.

$$Y_s = p_A^o / ( P_t - p_A^o ) \quad (48)$$

donde:  $p_A^o$  = presión de vapor del componente volátil.

Humedad de Saturación ( $Y_s'$ ).--Máxima humedad para un sistema expresada en unidades de masa de vapor entre masa de gas exenta de vapor.

$$Y_s' = \left[ p_A^o / ( P_t - p_A^o ) \right] ( M_A / M_B ) \quad (49)$$

Humedad Porcentual ( $Y_p$ ).--Se define como la relación entre la humedad absoluta real ( $Y'$ ), y la humedad de saturación ( $Y_s'$ ) las ecuaciones son las siguientes:

$$Y_p = 100 ( Y' / Y_s' ) \quad (50)$$

$$Y_p = 100 ( Y / Y_s ) \quad (50a)$$

Humedad Relativa ( $Y_R$ ).--Es la relación entre la presión parcial y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bulbo seco de la mezcla y la ecuación que representa esta definición es la siguiente:



$$Y_R = 100 ( P_A / P_A^0 ) \quad (51)$$

Volumen Húmedo (  $V_H$  ).--Para la mezcla gas-vapor, es el volumen total de una unidad de masa de gas libre de vapor, más el del vapor que le acompaña a presión constante y a la temperatura del gas. De acuerdo con las leyes de los gases, el volumen húmedo está relacionado con la humedad absoluta (  $Y'$  ) y la temperatura mediante la ecuación siguiente:

$$V_H = 0.730 [ ( 1/M_B ) + ( Y'/M_A ) ] [ ( T_G + 460 )/P_t ] \quad (52)$$

El volumen húmedo de una mezcla saturada se calcula con  $Y' = Y_s'$  , y el de un gas seco con  $Y' = 0$  . Para mezclas parcialmente saturadas el volumen húmedo puede interpolarse de valores de porcentaje de saturación entre 0 y 100 a la misma temperatura que la correspondiente al porcentaje de saturación dado.

$$V_H = V_g + ( Y_p / 100 ) ( V_s - V_g ) \quad (53)$$

donde:  $V_g$  = volumen del gas seco

$V_s$  = volumen del gas saturado

Calor húmedo (  $C_s$  ).--Es el calor necesario para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de mezcla gas-vapor a presión constante, para una mezcla de humedad absoluta.

$$C_s = C_B + Y' C_A \quad (54)$$

donde:  $C_B$  = calor específico del gas seco

$C_A$  = calor específico del vapor

Temperatura de saturación adiabática (  $T_s$  ).--Es la temperatura alcanzada por una masa de gas cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas y se termina por medio de la expresión:

$$Y_s' - Y' = ( C_s / \lambda_s ) ( T_G - T_s ) \quad (55)$$

donde:  $\lambda_s$  = calor latente de vaporización del líquido

Temperatura de rocío (  $T_d$  ).--Es la temperatura a la que es preciso enfriar una mezcla de gas y vapor a una humedad absoluta constante y una presión total constante, fuera del contacto con

un líquido para que alcance la saturación. Si se reduce la temperatura sólo en una cantidad infinitesimal por debajo de  $T_d$ , el vapor se condensa como un líquido en forma de rocío.

Entalpia ( $H'$ ).—La entalpia relativa de una mezcla de gas-vapor, es la suma de las entalpias relativas del gas y del vapor que contiene éste. Ocasionalmente, se eligen temperaturas de referencia distintas para el gas seco y para el vapor. Las entalpias para mezclas no saturadas se pueden luego interpolar entre los valores de saturación y sequedad a la misma temperatura de acuerdo al por ciento de saturación.

$$H' = C_s ( T_G - T_o ) + Y' \lambda_o \quad (56)$$

$$H' = H'_g + ( Y_p / 100 ) ( H'_s - H'_g ) \quad (57)$$

donde:  $T_o$  = temperatura de referencia

$\lambda_o$  = calor latente a la temperatura de referencia

$H'_g$  = entalpia del gas seco

$H'_s$  = entalpia del gas saturado

Temperatura de bulbo húmedo ( $T_w$ ).—Es la temperatura estacionaria alcanzada por una cantidad pequeña del líquido que se evapora en una gran cantidad de mezcla gas-vapor no saturada.

La temperatura de bulbo húmedo se describe aquí debido a que es un concepto simple del que se puede sacar una descripción excelente de la transferencia simultánea de masa y calor.

$$T_G - T_w = [ \lambda_w / ( h_g / k_y ) ] ( Y'_w - Y' ) \quad (58)$$

donde:  $\lambda_w$  = calor latente a la temperatura de bulbo húmedo

$Y'_w$  = humedad absoluta a la temperatura de bulbo húmedo

$h_g$  = coeficiente de transferencia de calor

$k_y$  = coeficiente de transferencia de masa

La relación ( $h_g / k_y$ ) se obtiene bajo condiciones de flujo turbulento y los datos experimentales aplicados a un cilindro húmedo, que es el caso del termómetro de bulbo húmedo nos proporciona:

$$h_g / k_y = 0.294 ( M / \rho_{AB} )^{0.56} \quad (59)$$

cuando el aire es el componente inerte, y para el sistema que nos interesa, ( aire-agua ) Dropkin encontró que :

$$h_g / k_y = 0.236 \quad (60)$$

donde :  $C_s = 0.236$  ; por lo tanto :

$$h_g / ( k_y C_s ) = 1 \quad (61)$$

que es la relación de Lewis.

Se tiene una torre de relleno, de sección transversal ( S ) y altura ( Z ), figura # 14, a través de la torre se ponen en contacto aire y agua que circulan por la misma en régimen estacionario y flujo cruzado.

Como se indica en la figura # 14, los fenómenos se desarrollan en un volumen diferencial de relleno ( dV ) de sección ( S ) y altura ( dZ ), ambas fases intercambian materia y energía al atravesarlo, abandonándolo ligeramente modificadas.

Balance de materia.

$$G' dY' = dL' \quad (62)$$

Despreciando el intercambio de calor con los alrededores a través de las paredes de la torre en el elemento de volumen de que se trata, es decir, suponiendo que la columna funciona prácticamente de modo adiabático, se tiene la siguiente expresión:

Balance entálpico.

$$G' dH_G' = L' dH_L' + H_L' dL' \quad (63)$$

Si se toma como temperatura de referencia  $0^\circ\text{C}$  para el cálculo de las entalpias del gas y líquido respectivamente, por definición se tiene:

$$H_G' = C_s t + \lambda_o Y' \quad (64)$$

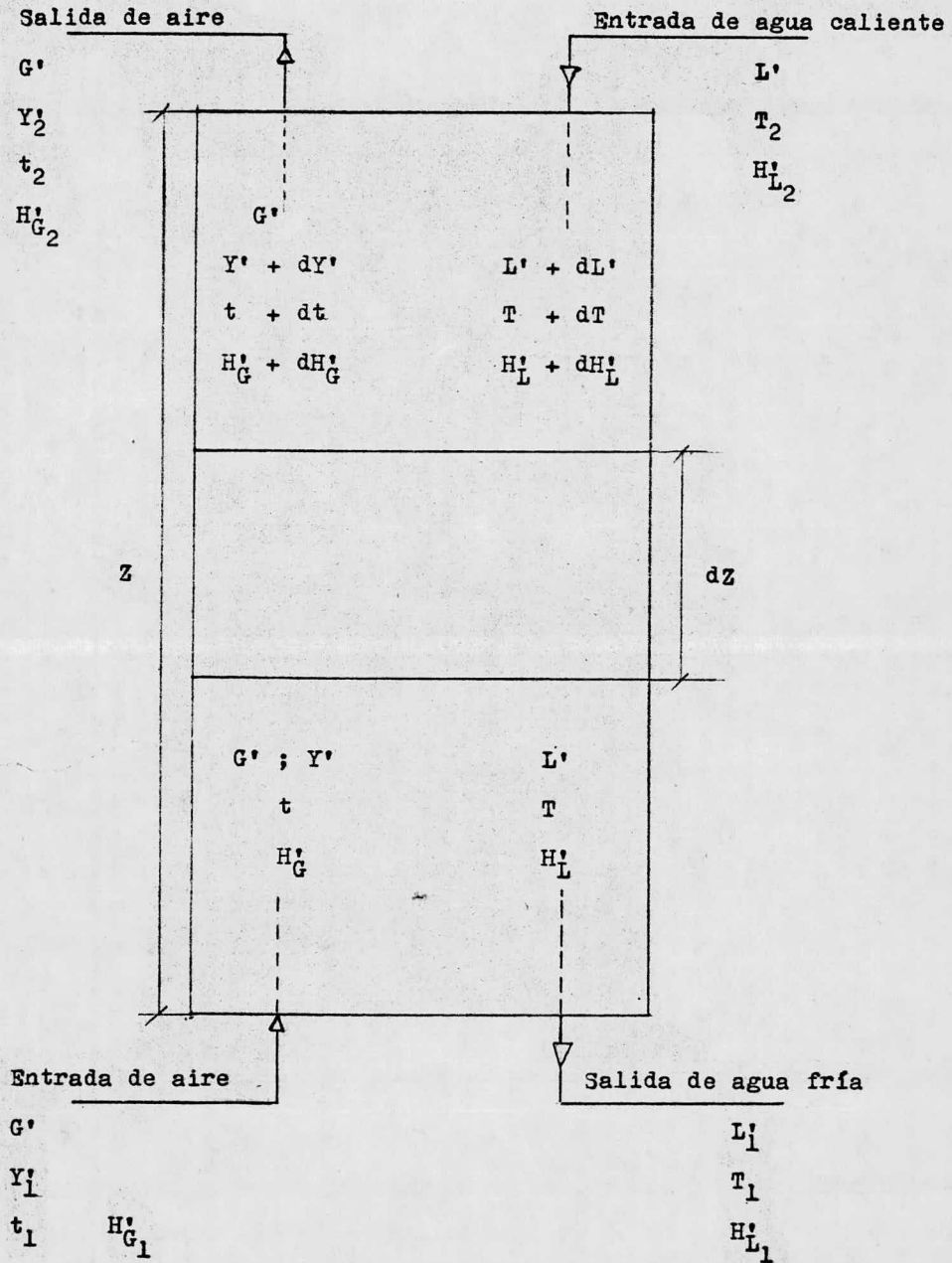
$$H_L' = C_{AL} T \quad (65)$$

En las que  $C_s$ ,  $\lambda_o$  y  $C_{AL}$ , representan respectivamente el calor húmedo del aire, calor latente de vaporización del agua a  $0^\circ\text{C}$  y calor específico del agua. Por consiguiente, diferenciando las ecuaciones anteriores nos queda:

$$dH_G' = C_s dt + \lambda_o dY' \quad (66)$$



FIGURA # 14



$$dH'_L = C_{A_L} dt \quad (67)$$

Puesto que la transferencia de materia entre fases es pequeña comparada con el caudal de agua que circula a lo largo de la torre, puede despreciarse el término  $(H'_L dL)$  de la ecuación (63) y tomar para  $L'$  un valor constante; con ello la ecuación (63) se simplifica a :

$$G' dH'_G = L' dH'_L \quad (68)$$

De las ecuaciones (67) y (68) por una parte y de las ecuaciones (66), (67) y (68) por otra, resultan:

$$G' dH'_G = L' C_{A_L} dT \quad (69)$$

$$G' C_s dt + \lambda_o G' dY' = L' C_{A_L} dT \quad (70)$$

Transferencia de materia a través de la fase inerte (aire).

Si se representa por  $(a_M)$  la superficie de contacto entre ambas fases por unidad de volumen de relleno, se comprende que en el elemento de volumen que se considera, la superficie de contacto útil para la transferencia de materia vendrá expresado así :

$$dA_M = a_M S dz \quad (71)$$

De acuerdo a la ecuación básica de transferencia de materia de una sustancia a través de otra que no se difunde:

$$\text{Flujo} = \text{Coeficiente ( diferencia de concentración )}. \quad (72)$$

Ya que la concentración puede definirse de modos diferentes se tiene una variedad de coeficientes para cada situación.

$$N_A = k_G ( P_{A_i} - P_{A_G} ) \quad (73)$$

$$N_A = k_y ( Y'_{A_i} - Y'_{A_G} ) \quad (73a)$$

$$N_A = k_c ( C_{A_i} - C_{A_G} ) \quad (73b)$$

Por lo tanto se tiene:

$$G' dY' = k_y ( Y'_{A_i} - Y'_{A_G} ) ( a_M S dz ) \quad (74)$$

Transferencia de calor a través de la fase gaseosa.--Se transfiere calor por dos mecanismos: Calor sensible debido a una diferencia de temperatura entre la interfase y el seno del aire y calor latente asociado con la materia transferida a causa de una diferencia de concentración ( ecuación 74 ).

Las dos cantidades de calor transmitidas por ambos mecanismos aparecen como sumandos en el primer miembro de la ecuación (70).

Representando por  $(a_g)$  la superficie por unidad de volumen de relleno útil para la transferencia de calor entre las fases, y de la ecuación de transferencia de calor se tiene:

Calor sensible transferido.

$$G' C_s dt = h_g ( a_g S dZ ) ( t_i - t ) \quad (75)$$

donde:  $h_g$  = coeficiente individual de transferencia de calor a través de la fase gaseosa.

Teniendo en cuenta la ecuación (74), puede escribirse:

Calor latente transmitido

$$\lambda_o G' dY' = \lambda_o k_y ( a_M S dZ ) ( Y'_{A_i} - Y'_{A_G} ) \quad (76)$$

De las ecuaciones (69),(70),(75) y (76) se tiene finalmente:  
Calor total transmitido.

$$G' dH'_G = h_g (a_g S dZ)(t_i - t) + \lambda_o k_y dA_M (Y'_{A_i} - Y'_{A_G}) \quad (77)$$

Transferencia de calor a través del agua.--Aquí sólo se transfiere calor sensible a causa de la diferencia de temperatura entre la interfase y el seno del agua, por tanto:

$$L' C_{A_L} dT = h_L ( a_g S dZ ) ( T - t_i ) \quad (78)$$

donde:  $h_L$  = coeficiente individual de transferencia de calor a través de la fase líquida.

Si se utiliza la relación aproximada de Lewis; (ecuación 61)

$$h_g = k_y C_s \quad (79)$$

Sustituyendo el valor de  $(h_g)$  que resulta de la ecuación (79) en la ecuación (77) y suponiendo iguales las superficies  $(a_M)$  y  $(a_g)$  para transporte de materia y calor, circunstancia sólo cierta para caudales de líquido suficientes para mojar

completamente la superficie del relleno, se tiene:

Calor total transmitido.

$$G' dH'_G = k_y (a S dZ) (C_s t_i + \lambda_o Y'_{A_i}) - (C_s t + \lambda_o Y'_{A_G}) \quad (80)$$

siendo:  $a = a_g = a_M$ ; y suponiendo  $C_i = C_s$ ; recordando la ecuación (64), la ecuación (80) se convierte en:

$$G' dH'_G = k_y (a S dZ) (H'_{G_i} - H'_G) \quad (81)$$

donde:  $a =$  área interfacial (área real/unidad de volumen de empaque)

$S =$  área transversal de la torre vacía

$dZ =$  altura diferencial de empaque

Modificando la ecuación (81) se tiene:

$$(G' / S) dH'_G = k_{ya} (H'_{G_i} - H'_G) dZ \quad (82)$$

$$G'' dH'_G = k_{ya} (H'_{G_i} - H'_G) dZ \quad (83)$$

Separando variables e integrando la ecuación (83) a fin de abarcar toda la torre, resulta:

$$(G'' / k_{ya}) \int_{H'_{G_1}}^{H'_{G_2}} dH'_G / (H'_{G_i} - H'_G) = \int_0^Z dZ \quad (84)$$

De acuerdo con las ecuaciones (69), (78), (81) se deduce la relación:

$$h_L (T - t_i) = k_y (H'_{G_i} - H'_G) \quad (85)$$

Esta ecuación se aplica a cualquier sección transversal horizontal de la torre, para calcular las condiciones de interfase.

$$(H'_{G_i} - H'_G) / (t_i - T) = - (h_L / k_y) \quad (86)$$

Utilizando una fuerza impulsora total, representante de la diferencia de entalpia para las fases globales, la ecuación (84) se convierte en:

$$\int_0^Z dZ = (G'' / K_{ya}) \int_{H'_{G_1}}^{H'_{G_2}} dH'_G / (H'_G - H'_G) \quad (87)$$

donde:  $G''/K_{ya}$  = Altura de la unidad de transferencia ( HTG ) -

(88)

$$\int_{H'_{G1}}^{H'_{G2}} dH'_G / ( H'_G + H'_G ) = NTG \quad (89)$$

donde: NTG = Número de unidades de transferencia.

Por lo tanto la ecuación básica para el cálculo de la altura de empaque de la torre es :

$$Z = HTG \times NTG \quad (90)$$

El valor de la integral de la ecuación (89) puede determinarse gráficamente representando  $1/(H'_G + H'_G)$  contra  $( H'_G \text{ o } T )$  - midiendo el área bajo la curva entre los límites ( figura # 15 ).

La integración numérica se realiza considerando  $( \Delta H'_G )$  y  $( \Delta T )$  pequeños, la ecuación (89) puede expresarse así:

$$NTG = \sum_{H'_{G1}}^{H'_{G2}} \Delta H'_G / ( H'_G + H'_G )_m \quad (91)$$

Ya sea utilizando una fuerza impulsora media logarítmica -  $( m_l )$  o una fuerza impulsora media aritmética  $( m_a )$ .

$$( H'_G + H'_G )_{m_l} = \frac{( H'_G + H'_G )_2 - ( H'_G + H'_G )_1}{\ln \frac{( H'_G + H'_G )_2}{( H'_G + H'_G )_1}} \quad (92)$$

$$( H'_G + H'_G )_{m_a} = \left[ ( H'_G + H'_G )_2 + ( H'_G + H'_G )_1 \right] / 2 \quad (93)$$

Método gráfico de Baker.-Se funda en el empleo de una fuerza impulsora media aritmética y resulta aplicable aunque en el intervalo de las variables que se considere, la línea de equilibrio sea ligeramente curva, ( figura # 16 ). Se toman los puntos medios de los tramos de las verticales comprendidas entre las líneas de operación y de equilibrio, uniendo tales puntos mediante la llamada " línea media " .

Desde (B) extremo superior de la recta operativa se traza la horizontal hasta cortar a la línea media en (R). Se traza un

FIGURA # 15

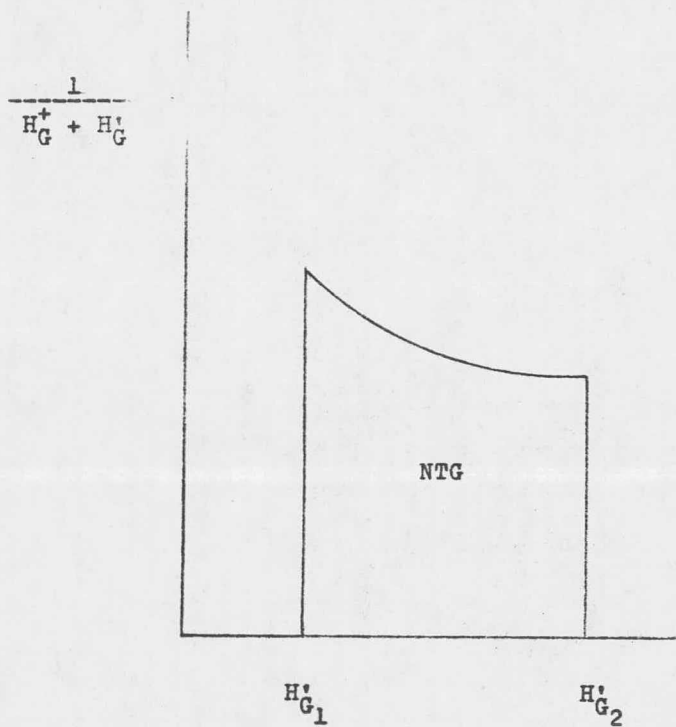
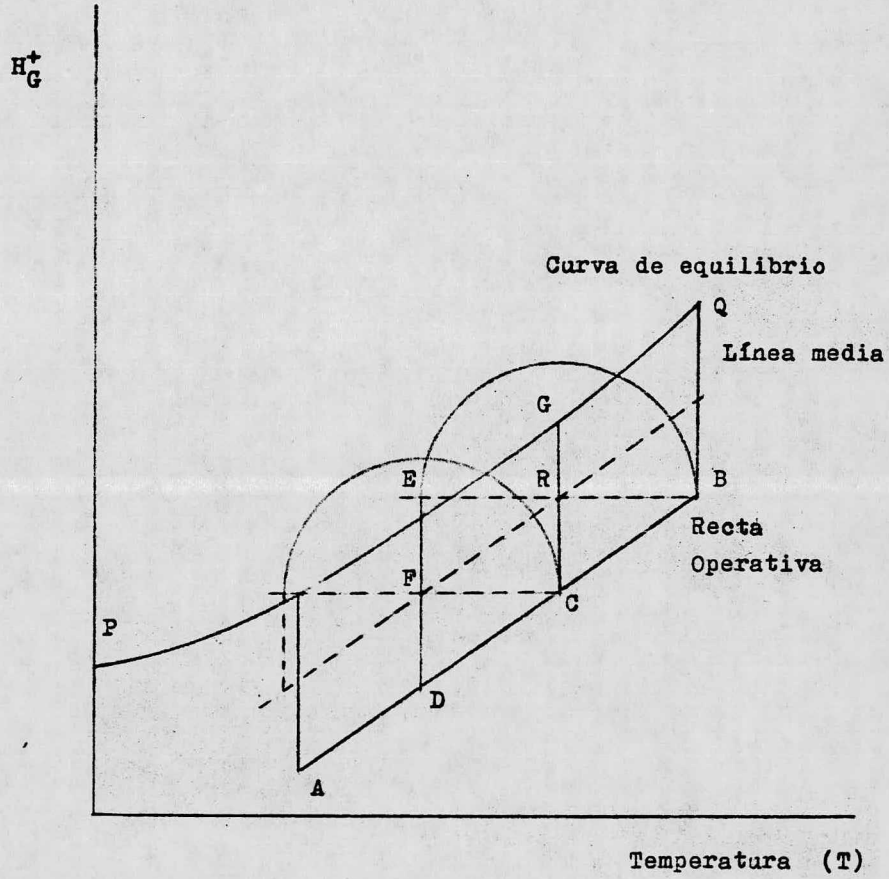


FIGURA # 16

Método Gráfico de Baker.



semicírculo con centro en (R) y radio (BR). Desde el punto en que este semicírculo corta a la horizontal (E), se baja la perpendicular hasta la recta operativa. Se repite la construcción. El número de escalones hasta alcanzar el punto (A), extremo inferior de la recta operativa, representando así el NTG.

Coeficientes de transporte.-El conocimiento de estos es indispensable para el cálculo de la altura de las unidades de transferencia. En la bibliografía se encuentra casi siempre datos referentes a coeficientes globales de transporte para la experiencia de interacción aire-agua.

Por ejemplo: Sawistowsky, H. y Smith, W. proponen las ecuaciones siguientes:

$$K_{ya} = 6.72 G^{0.75} \quad (94)$$

$$K_{ya} = 1.38 G^{0.75} \quad (95)$$

donde:  $G$  = velocidad másica del aire  
kg/hr  $m^2$  ( ecuación 94 )  
lb/hr  $ft^2$  ( ecuación 95 )

En el siguiente capítulo se procede al cálculo de las dimensiones del equipo ( altura de empaque, caída de presión, área de la torre, etc. ) y su comparación con los equipos que proporcionan los fabricantes de éstos.



IX.- CALCULOS Y RESULTADOS.

La determinación de la cantidad de aire expresada generalmente en función de la relación ( L/G ), ( agua/aire ) es de índole económica. Se ha encontrado que dicho óptimo es del orden de 1.2 a 1.5 veces el flujo mínimo teórico del aire; por lo tanto, se calcularán las características de la torre para este rango.

*DATOS ESCOGIDOS PARA LAS*  
Condiciones de diseño y de operación. *500*

Lugar de operación de la torre	Tizayuca, Hgo.
Altura sobre el nivel del mar	2 270 m 7 491 ft
Presión barométrica	11.3 psia 0.77 atm 586 mm Hg
Temperatura de bulbo seco promedio ( $T_G$ )	20 °C 68 °F
Temperatura de bulbo húmedo ( $T_w$ )	15.7 °C 60 °F
Velocidad de viento (v)	2.1 m/seg 6.93 ft/seg
Humedad relativa ( $Y_R$ )	60 %
Temperatura de entrada de agua caliente ( $T_2$ )	30 °C 86 °F
Temperatura de salida de agua fría ( $T_1$ )	20 °C 68 °F
Gasto de agua a enfriar (L)	10 000 lt/min 10 m <sup>3</sup> /min 2 642 gpm 359.37 ft <sup>3</sup> /min
Densidad del agua ( $\rho_A$ )	62.3 lb/ft <sup>3</sup> 1 000 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico del agua ( $C_{A_L}$ )	1 kcal/kg °C

Cálculo de la carga térmica removida ( Q ).

$$Q = L' C_{AL} \Delta T \quad (96)$$

$$L' = L \rho_A \quad (97)$$

$$L' = ( 10 \text{ m}^3/\text{min} ) ( 1000 \text{ kg/m}^3 ) ( 60 \text{ min/hr} )$$

$$L' = 600\,000 \text{ kg/hr}$$

$$L' = 1\,320\,000 \text{ lb/hr}$$

$$Q = ( 600\,000 \text{ kg/hr} ) ( 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} ) ( 30 - 20 ) ^\circ\text{C}$$

$$Q = 6\,000\,000 \text{ kcal/hr}$$

$$Q = 23\,808\,000 \text{ BTU/hr}$$

Cálculo del flujo mínimo teórico del aire (  $G_{\min}$  ).

Se obtiene de la curva de equilibrio para el sistema aire-agua ( figura # 18 ); es decir, se grafican las entalpias del aire saturado frente a sus correspondientes temperaturas.

TABLA # 10

Propiedades termodinámicas del aire húmedo ( 586 mm Hg y  $0^\circ\text{C}$  de referencia ).

Temperatura $^{\circ}\text{F}$	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Humedad			Entalpia		Volumen saturado	
		$\frac{\text{lb}}{\text{lb}}$	$\frac{\text{BTU}}{\text{lb as}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg as}}$	$\frac{\text{ft}^3}{\text{lb as}}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg as}}$		
50	10.0	0.009	14	7.76	17.1	1.046		
55	12.8	0.011	18	9.98	17.3	1.059		
→ 60	15.6	0.014	22	12.20	17.6	1.077		
65	18.3	0.017	26	14.42	17.8	1.089		
70	21.1	0.020	31	17.20	18.1	1.110		
75	23.9	0.024	37	20.51	18.4	1.130		
80	26.7	0.029	43	23.84	18.6	1.140		
85	29.4	0.034	51	28.27	19.0	1.160		
90	32.2	0.040	58	32.16	19.3	1.180		
95	35.0	0.047	69	38.25	19.7	1.210		
100	37.8	0.055	79	43.80	20.1	1.230		

De la tabla anterior, se obtiene la entalpia del aire de entrada, con la temperatura de bulbo húmedo del aire.

$$H'_{G_1} = 22 \text{ BTU/lb as}$$

Con este valor y la temperatura de salida del agua, se obtiene un punto fijo (  $H'_{G_1}$  ,  $T_1$  ) , que se situa en la figura # 18; trazando una línea recta de este punto al punto formado por la curva de equilibrio y la temperatura del agua caliente (  $H'_S$  ,  $T_2$  ), se obtiene así la relación mínima (  $L'/G'$  ), que es la pendiente de esa línea.

De la ecuación (69) y la figura # 18 , se obtiene esta relación:

$$( L'/G' )_{\min} = ( H'_S - H'_{G_1} ) / ( T_2 - T_1 ) \quad (98)$$

donde:  $H'_S = 53 \text{ BTU/lb as}$

$$H'_{G_1} = 22 \text{ BTU/lb as}$$

$$T_2 = 86 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_1 = 68 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$( L'/G' )_{\min} = ( 53 - 22 ) / ( 86 - 68 )$$

$$( L'/G' )_{\min} = L'/G'_{\min} = 1.722$$

despejando  $G'_{\min}$

$$G'_{\min} = L'/1.722 = ( 359.37 \text{ ft}^3/\text{min} ) / 1.722$$

$$G'_{\min} = 208.666 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$G'_{\min} = 5.806 \text{ m}^3/\text{min}$$

A.-Cálculo de las características de la torre para  $G'_{op} = 1.2G'_{\min}$

$$G'_{op} = 1.2 G'_{\min}$$

$$G'_{op} = 1.2 ( 208.666 ) \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$G'_{op} = 250.39 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$G'_{op} = 6.96 \text{ m}^3/\text{min}$$

Línea de operación.

$$( L'/G' )_{op} = L'/G'_{op} = ( 10 \text{ m}^3/\text{min} ) / ( 6.96 \text{ m}^3/\text{min} )$$

$$( L'/G' )_{op} = 1.43$$

de la ecuación (69)

$$(L'/G')_{op} = (H'_{G_2} - 22) / (86 - 68) = 1.43$$

$$H'_{G_2} = 1.43 (18) + 22$$

$$H'_{G_2} = 47.74 \text{ BTU/lb as}$$

$$H'_{G_2} = 26.46 \text{ kcal/kg as}$$

Flujo másico de aire ( $G'$ )

$$L'/G' = 1.43$$

$$G' = L'/1.43 = (600\ 000 \text{ kg/hr}) / 1.43$$

$$G' = 419\ 580.41 \text{ kg/hr}$$

$$G' = 118.19 \text{ kg/seg}$$

$$G' = 260.03 \text{ lb/seg}$$

de la tabla # 10 a la  $T_{w_1} = 60^\circ\text{F}$

$$v_s = 17.6 \text{ ft}^3/\text{lb as} = 1.077 \text{ m}^3/\text{kg as}$$

donde:  $v_s$  = volumen saturado

Area necesaria

$$S = G' v_s / v \quad (99)$$

donde:  $S$  = área

$G'$  = flujo másico de aire

$v_s$  = volumen saturado

$v$  = velocidad del aire

$$S = (260.03 \text{ lb/seg}) (17.6 \text{ ft}^3/\text{lb as}) / (6.93 \text{ ft/seg})$$

$$S = 660.99 \text{ ft}^2$$

$$S = 60.6 \text{ m}^2$$

Velocidad másica del aire y del agua ( $G''$  y  $L''$ ).

$$G'' = G'/S \quad (100)$$

$$G'' = (260.03 \text{ lb/seg}) (3600 \text{ seg/hr}) / (660.39 \text{ ft}^2)$$

$$G'' = 1\ 417.5 \text{ lb/hr ft}^2$$

$$G'' = 7\ 016.62 \text{ kg/hr m}^2$$

$$L'' = L'/S \quad (101)$$

$$L'' = ( 1\ 320\ 000\ \text{lb/hr} ) / ( 660.39\ \text{ft}^2 )$$

$$L'' = 2\ 034\ \text{lb/hr ft}^2$$

$$L'' = 10\ 068\ \text{kg/hr m}^2$$

Cálculo del caudal del líquido que garantice la humectación del relleno ( $L''_{\text{mín}}$ ), y del caudal de arrastre ( $L''_{\text{máx}}$ ) para asegurar el buen funcionamiento de la torre, desde el punto de vista de la circulación del líquido.

Relleno: Rejillas de madera de 2 in x 2 in x 3/8 in .

Factor de empaque:  $a' = 42.65\ \text{m}^2/\text{m}^3 = 12.52\ \text{ft}^2/\text{ft}^3$  .

Se recomienda un caudal mínimo de humectación de; ( $Q_{MH}$ ) .

$$Q_{MH} = 0.08\ \text{m}^3/\text{hr m}$$

$$Q_{MH} = 0.871\ \text{ft}^3/\text{hr ft}$$

$$L''_{\text{mín}} = Q_{MH} a' \rho_A \quad (102)$$

$$L''_{\text{mín}} = 0.871 ( 12.52 ) ( 62.3 )$$

$$L''_{\text{mín}} = 679.53\ \text{lb/hr ft}^2$$

$$L''_{\text{mín}} = 3\ 363.67\ \text{kg/hr m}^2$$

Para este tipo de relleno se tiene una gráfica ( figura # 19 ) en la cual están representados la razón de velocidad de gas entre velocidad de líquido ( $V_G / V_L$ ; es decir, la relación de caudales volumétricos gas/líquido, basados en el sistema aire---agua ), contra el caudal de humectación ( $L_h$ ).

$$V_G / V_L = ( v_s \rho_A ) / ( L'/G' ) \quad (103)$$

$$V_G / V_L = ( 17.6 ) ( 62.3 ) / 1.43$$

$$V_G / V_L = 766.7$$

Con este valor en la figura # 19 obtenemos un caudal de humectación y calculamos el caudal máximo permitido.

$$L_h = 3.65\ \text{ft}^3/\text{hr ft} = 0.335\ \text{m}^3/\text{hr m}$$

$$L''_{\text{máx}} = L_h a' \rho_A \quad (104)$$

$$L''_{\text{máx}} = ( 3.65 ) ( 12.52 ) ( 62.3 )$$

$$L''_{\text{máx}} = 2\ 846.98\ \text{lb/hr ft}^2$$

$$L''_{\text{máx}} = 14\ 092.55\ \text{kg/hr m}^2$$

La velocidad másica del líquido (  $L''$  ) para la sección calculada de la torre, está comprendida entre los dos límites:

$$L''_{\min} < L'' < L''_{\max}$$

$$679.53 < L'' < 2\,846.98 \quad L'' = 2\,034.1 \text{ lb/hr ft}^2$$

$$3\,363.67 < L'' < 14\,092.55 \quad L'' = 10\,068.79 \text{ kg/hr m}^2$$

Así pues, el relleno se humedece satisfactoriamente no habiendo tampoco riesgo de formación de cascada, lo que puede ocurrir si se sobrepasa el caudal de arrastre.

Cálculo del número de unidades de transferencia por el método de integración numérica (ecuación 91).

TABLA # 11

T °F	$H_G^i$ BTU lb as	$\Delta H_G^i$ BTU	$H_G^+$ BTU lb as	$H_G^+ - H_G^i$	$(H_G^+ - H_G^i)_m$	$\frac{\Delta H_G^i}{(H_G^+ - H_G^i)_m}$
68	22.00	3.00	28.70	6.70	6.350	0.4724
70	25.00	2.50	31.00	6.00	5.750	0.4348
72	27.50	3.50	33.00	5.50	5.250	0.6628
74	31.00	2.50	36.00	5.00	4.750	0.5263
76	33.50	3.00	38.00	4.50	4.250	0.7059
78	36.50	2.50	40.50	4.00	4.000	0.6250
80	39.00	3.00	43.00	4.00	4.000	0.7500
82	42.00	3.00	46.00	4.00	4.250	0.7059
84	45.00	2.83	49.50	4.50	4.835	0.5853
86	47.83		53.00	5.17		

$$NTG = 5.4684$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia ( volumétrico ).

A partir de las ecuaciones (94) o (95).

$$K_{ya} = 6.72 G^{0.75} = ( 6.72 ) ( 7\,016.62 \text{ kg/hr m}^2 )^{0.75}$$

$$K_{ya} = 5\,154.24 \text{ kg/hr m}^3$$

$$K_{ya} = 1.38 G''^{0.75} = (1.38) (1417.5 \text{ lb/hr ft}^2)^{0.75}$$

$$K_{ya} = 315.53 \text{ lb/hr ft}^3$$

Cálculo de la altura de la unidad de transferencia.

A partir de la ecuación (88).

$$\text{HTG} = G'' / K_{ya} = (7016.62 \text{ kg/hr m}^2) / (5154.24 \frac{\text{kg}_3}{\text{hr m}})$$

$$\text{HTG} = 1.3613 \text{ m}$$

$$\text{HTG} = 4.4923 \text{ ft}$$

Cálculo de la altura de empaque (Z).

A partir de la ecuación (90)

$$Z = (\text{NTG}) (\text{HTG}) = (5.4684) (1.3613 \text{ m})$$

$$Z = 7.444 \text{ m}$$

$$Z = 24.56 \text{ ft}$$

Cálculo de la caída de presión total ( $\Delta P$ ).

Para el empaque utilizado, se utiliza la expresión:

$$\Delta P = 3.94 \times 10^{-10} (14.85 Z + 5) G''^2 v_{s1} \quad (105)$$

donde: Z = Altura de empaque (m)

G'' = Velocidad másica de aire (kg/hr m<sup>2</sup>)

v<sub>s1</sub> = volumen saturado de aire a la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la torre (m<sup>3</sup>/kg as).

de la tabla # 10

$$a T_{w1} = 60 \text{ }^\circ\text{F}; v_{s1} = 17.6 \text{ ft}^3/\text{lb as} = 1.077 \text{ m}^3/\text{kg as}$$

$$\Delta P = 3.94 \times 10^{-10} \left[ (14.85)(7.444) + 5 \right] (7016.6)^2 (1.077)$$

$$\Delta P = 2.41 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\Delta P = 24.1 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\Delta P = 0.950 \text{ in H}_2\text{O}$$

Cálculo del flujo de aire (F).

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$F = v_{s2} G' \quad (106)$$

25.36842105



donde:  $F$  = Flujo de aire (  $\text{ft}^3/\text{min}$  )

$v_{s_2}$  = volumen saturado del aire a temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida de la torre (  $\text{ft}^3/\text{lb as}$  )

$G'$  = flujo másico del aire (  $\text{lb}/\text{min}$  )

de la figura # 19

$$T_{w_2} = 83 \text{ } ^\circ\text{F}$$

de la tabla # 10

$$v_{s_2} = 18.8 \text{ ft}^3/\text{lb as}$$

$$F = ( 18.8 \text{ ft}^3/\text{lb as} ) ( 260.03 \text{ lb}/\text{seg} ) ( 60 \text{ seg}/\text{hr} )$$

$$F = 293 \text{ 313.84 ft}^3/\text{min}$$

Cálculo de la potencia en el eje del ventilador con un rendimiento total de 65 % .

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$P = 0.01573 \Delta P F / E_v \quad (107)$$

donde:  $P$  = potencia ( BHP )

$\Delta P$  = caída de presión ( in de  $\text{H}_2\text{O}$  )

$F$  = flujo de aire (  $\text{ft}^3/\text{min}$  )

$E_v$  = eficiencia del ventilador

$$P = ( 0.01573 ) ( 0.95 ) ( 293 \text{ 313.84 } ) / 65$$

$$P = 67.43 \text{ BHP}$$

Cálculo de la potencia real.

$$P_{\text{real}} = P / ( E_r E_m ) \quad (108)$$

Se considera una eficiencia en el reductor (  $E_r$  ) de 95 % y de 92 % en el motor (  $E_m$  ). Eficiencias recomendadas por los fabricantes de estos equipos.

$$P_{\text{real}} = 67.43 / [ ( 0.95 ) ( 0.92 ) ]$$

$$P_{\text{real}} = 77.15 \text{ BHP}$$

Cálculo de la potencia de bombeo.

Considerando como cabeza estática la altura de empaque calculada y de acuerdo a la ecuación (109).

$$P_b = 3.65 \times 10^{-6} L' Z / E_b \quad (109)$$

donde:  $P_b$  = potencia de la bomba ( BHP )

$L'$  = gasto de agua ( kg/hr )

$Z$  = altura de empaque ( m )

$E_b$  = eficiencia de la bomba

Se considera una eficiencia en la bomba de 70 % .

$$P_b = ( 3.65 \times 10^{-6} ) ( 600\ 000 ) ( 7.44 ) / 0.70$$

$$P_b = 23.25 \text{ BHP}$$

Cálculo del agua de reposición (  $W_{total}$  ).

$$W_{total} = W_{ev} + W_{am} + W_p \quad (110)$$

donde:  $W_{ev}$  = cantidad de agua evaporada

$W_{am}$  = cantidad de agua por arrastre mecánico

$W_p$  = cantidad de agua por purgas.

La cantidad de agua evaporada se calcula con la expresión:

$$W_{ev} = G' ( Y'_{s_2} - Y'_1 ) \quad (111)$$

donde:  $W_{ev}$  = cantidad de agua evaporada ( lb/hr )

$G'$  = flujo másico del aire ( lb/hr )

$Y'_{s_2}$  = humedad final o de salida del aire

$Y'_1$  = humedad inicial o de entrada del aire.

de la tabla # 10

$$a \ T_{w_2} = 83 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$Y'_{s_2} = 0.032 \text{ lb H}_2\text{O} / \text{lb as}$$

De la carta psicométrica ( figura # 20 ).

$$a \ T_G = 68 \text{ }^\circ\text{F} \text{ y } Y_R = 60 \%$$

$$Y'_1 = 0.011 \text{ lb H}_2\text{O} / \text{lb as}$$

$$W_{ev} = (260.03 \text{ lb/seg})(3600 \text{ seg/hr})(0.032 - 0.011) \frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb as}}$$

$$W_{ev} = 19\ 658.26 \text{ lb H}_2\text{O} / \text{hr}$$

$$W_{ev} = 214.45 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} / \text{día}$$

Otro tipo de pérdidas lo constituyen los arrastres de tipo mecánico de una cierta cantidad de agua, debido al flujo de aire en la torre. Estas pérdidas se estiman del orden de 0.1 a 0.3 % del total de agua recirculada.

$$W_{am} = ( 0.1 L' ) / 100 \quad (112)$$

$$L' = 1\ 320\ 000\ \text{lb/hr}$$

$$W_{am} = (0.1) (1\ 320\ 000) / 100$$

$$W_{am} = 1\ 320\ \text{lb/hr}$$

$$W_{am} = 14.4\ \text{m}^3\ \text{agua} / \text{día.}$$

Purgas.-Es la cantidad de agua circulante descargada como desperdicio, ya sea en forma intermitente o continúa, para limitar la concentración de sólidos.

La cantidad de agua por purgas se calcula de la siguiente manera.

Efectuando un balance de cloruros en el sistema de enfriamiento, se tiene:

$$W_{total}\ Cl_{w_t} = W_{ev}\ Cl_{ev} + W_{am}\ Cl_{am} + W_p\ Cl_p \quad (113)$$

pero  $Cl_{ev} = 0$  (no se pierden cloruros por evaporación)

En condiciones de equilibrio:

$$Cl_R = Cl_{am} = Cl_p$$

Por lo tanto:

$$W_{total}\ Cl_{w_t} = W_{am}\ Cl_R + W_p\ Cl_R$$

$$W_{total}\ Cl_{w_t} = Cl_R (W_{am} + W_p) \quad (114)$$

despejando:

$$Cl_R / Cl_{w_t} = W_{total} / (W_{am} + W_p)$$

$$Cl_R / Cl_{w_t} = (W_{ev} + W_{am} + W_p) / (W_{am} + W_p) \quad (115)$$

De la ecuación (39) y despejando  $W_p$ :

$$W_p = \left[ W_{ev} - W_{am} (X - 1) \right] / (X - 1) \quad (116)$$

Por lo tanto:

$$W_{total} = 19\ 658.26 + 1\ 320 + W_p$$

$$W_{total} = 20\ 978.26 + W_p \quad \text{lb agua} / \text{hr}$$

$$W_{total} = 228.85 + W_p \quad \text{m}^3\ \text{agua} / \text{día}$$

NOTA: La  $W_p$  es una función del análisis del agua de repuesto.

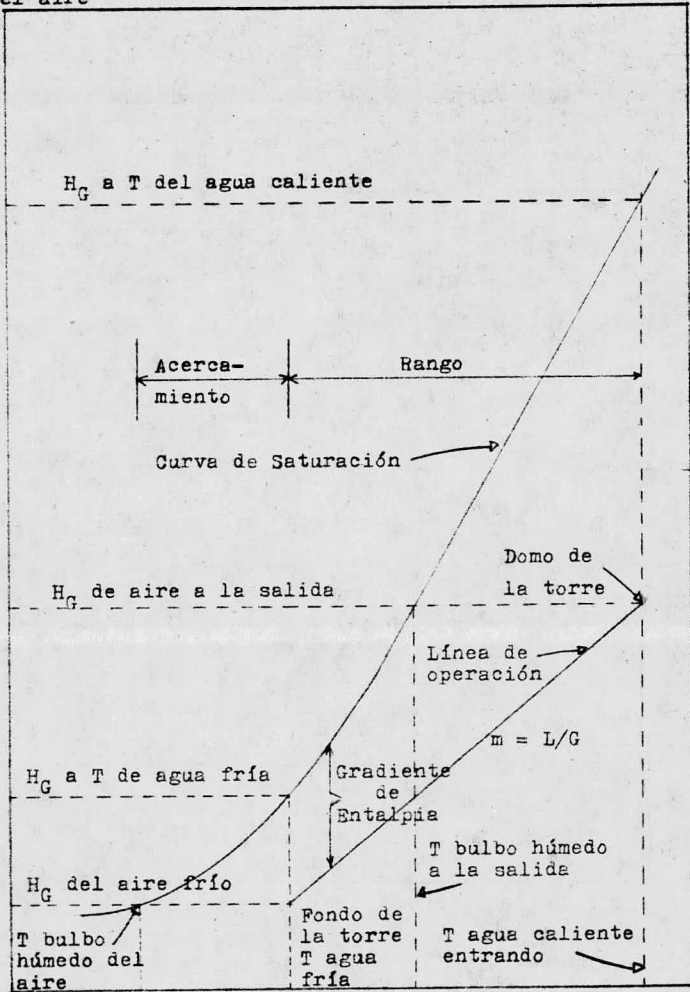
Para el cálculo de las características de la torre de los siguientes flujos óptimos de aire, se resumen en la tabla # 12.

TABLA # 12

	Unidades	$G'_{op} = 1.2G'_{min}$	$1.3G'_{min}$	$1.4G'_{min}$	$1.5G'_{min}$
$G'_{min}$	$m^3/min$	5.806	5.806	5.806	5.806
	$ft^3/min$	208.666	208.666	208.666	208.666
$G'_{op}$	$m^3/min$	6.96	7.54	8.129	8.709
	$ft^3/min$	250.35	271.26	292.13	312.99
	kg/seg	118.19	128.49	137.89	147.74
	lb/seg	260.03	282.68	303.37	325.03
	lb/hr	936108	1017648	1092132	1170108
$(L'/G')_{op}$		1.43	1.32	1.23	1.148
$H'_{G_2}$	kcal/kg as	26.46	25.36	24.47	23.65
	BTU/lb as	47.74	45.76	44.14	42.66
$S$	$m^2$	60.60	65.92	70.74	75.80
	$ft^2$	660.39	717.91	770.46	825.47
$G''$	kg/hr $m^2$	7016.62	7016.62	7016.62	7016.62
	lb/hr $ft^2$	1417.5	1417.5	1417.5	1417.5
$L''$	Kg/hr $m^2$	10068.79	9262.24	8630.5	8055.36
	lb/hr $ft^2$	2034.1	1871.16	1743.53	1627.34
$L''_{min}$	kg/hr $m^2$	3363.67	3363.67	3363.67	3363.67
	lb/hr $ft^2$	679.53	679.53	679.53	679.53
$L''_{max}$	kg/hr $m^2$	14092.55	12741.23	12355.13	11969.03
	lb/hr $ft^2$	2846.98	2573.98	2495.98	2417.98
NTG		5.4684	4.1213	3.3659	2.8405
$K_{ya}$	kg/hr $m^3$	5154.24	5154.24	5154.24	5154.24
	lb/hr $ft^3$	315.53	315.53	315.53	315.53
HTG	m	1.3613	1.3613	1.3613	1.3613
	ft	4.4923	4.4923	4.4923	4.4923
$Z$	m	7.44	5.61	4.58	3.86
	ft	26.56	18.51	15.12	12.76
$\Delta P$	mm $H_2O$	24.1	18.4	15.2	13.05
	in $H_2O$	0.95	0.726	0.60	0.512
$F$	$m^3/min$	8161.89	8872.8	9471.61	10093.6
	$ft^3/min$	293313.84	318863.04	340381.14	362733.48
$P$	BHP	67.43	56.02	49.42	44.90
$P_{real}$	BHP	77.15	64.99	56.54	51.31
$P_b$	BHP	23.25	17.53	14.30	12.06
$W_{total}$	$m^3/día$	228.85	236.43	240.767	237.78
	$ft^3/día$	8224.18	8496.6	8652.4	8545.1

Figura # 17

Entalpia del aire



Temperatura del agua.

ENIA PLIA BIU / I B O U . D I A G R A M A D E O P E R A C I O N

FIGURA E 18

- 1 (L/G) MIN = 1.72
- 2 (L/G) OP = 1.48
- 3 (L/G) OP = 1.62
- 4 (L/G) OP = 1.25
- 5 (L/G) OP = 1.148

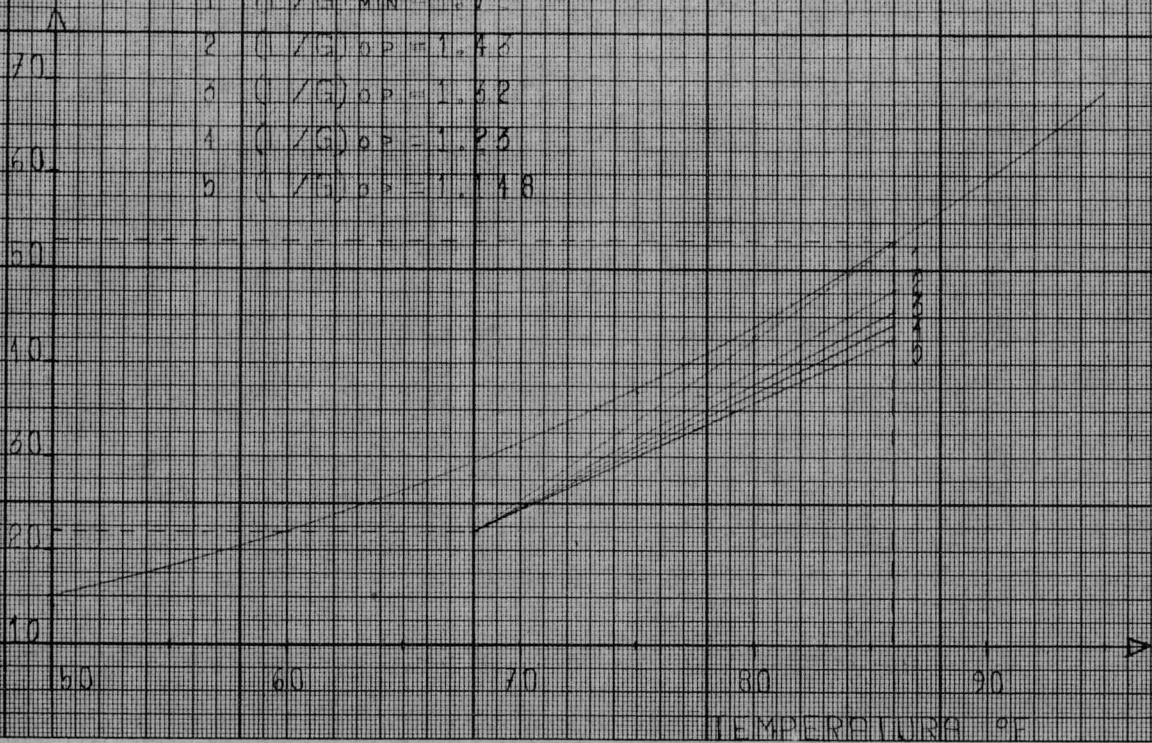




Figura # 19

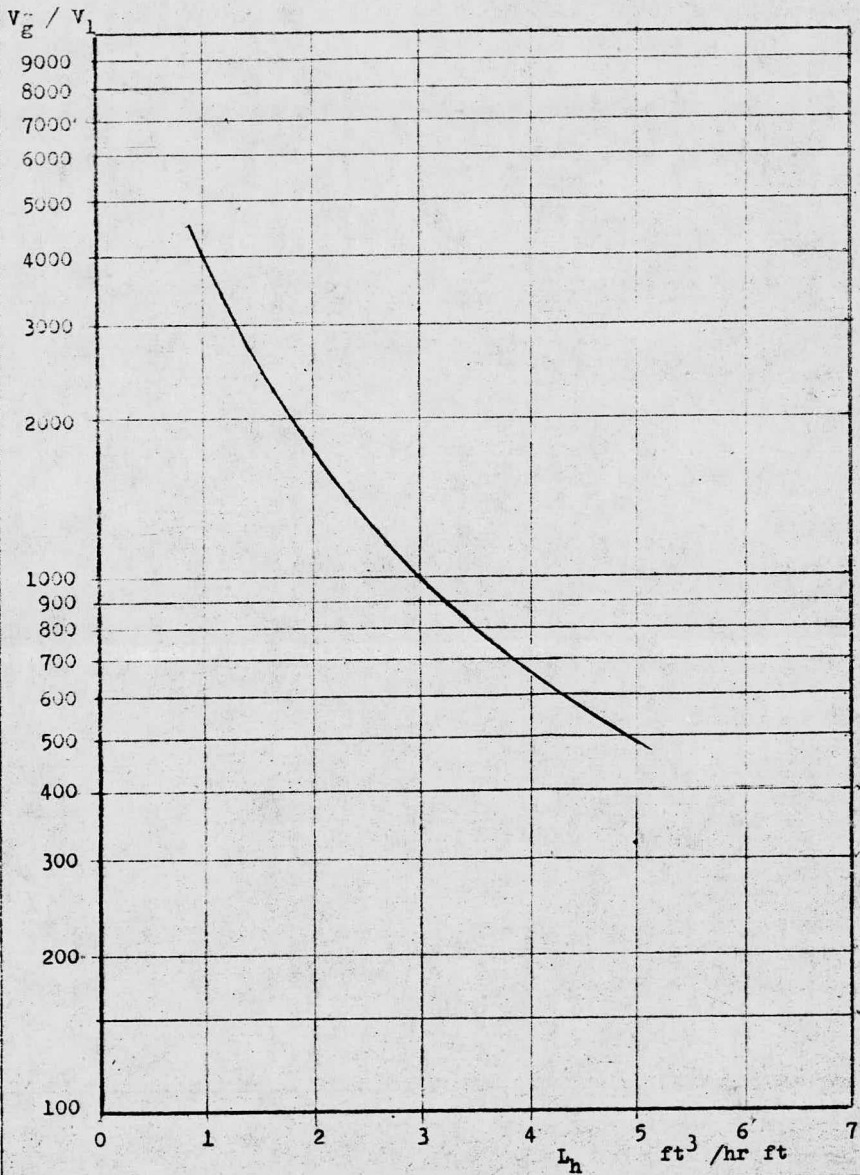


DIAGRAMA PSICOMETRICO  
FIGURA II 20

HUMEDAD  
L B / L B

0.04

0.03

0.02

0.01

0.00

50

60

70

80

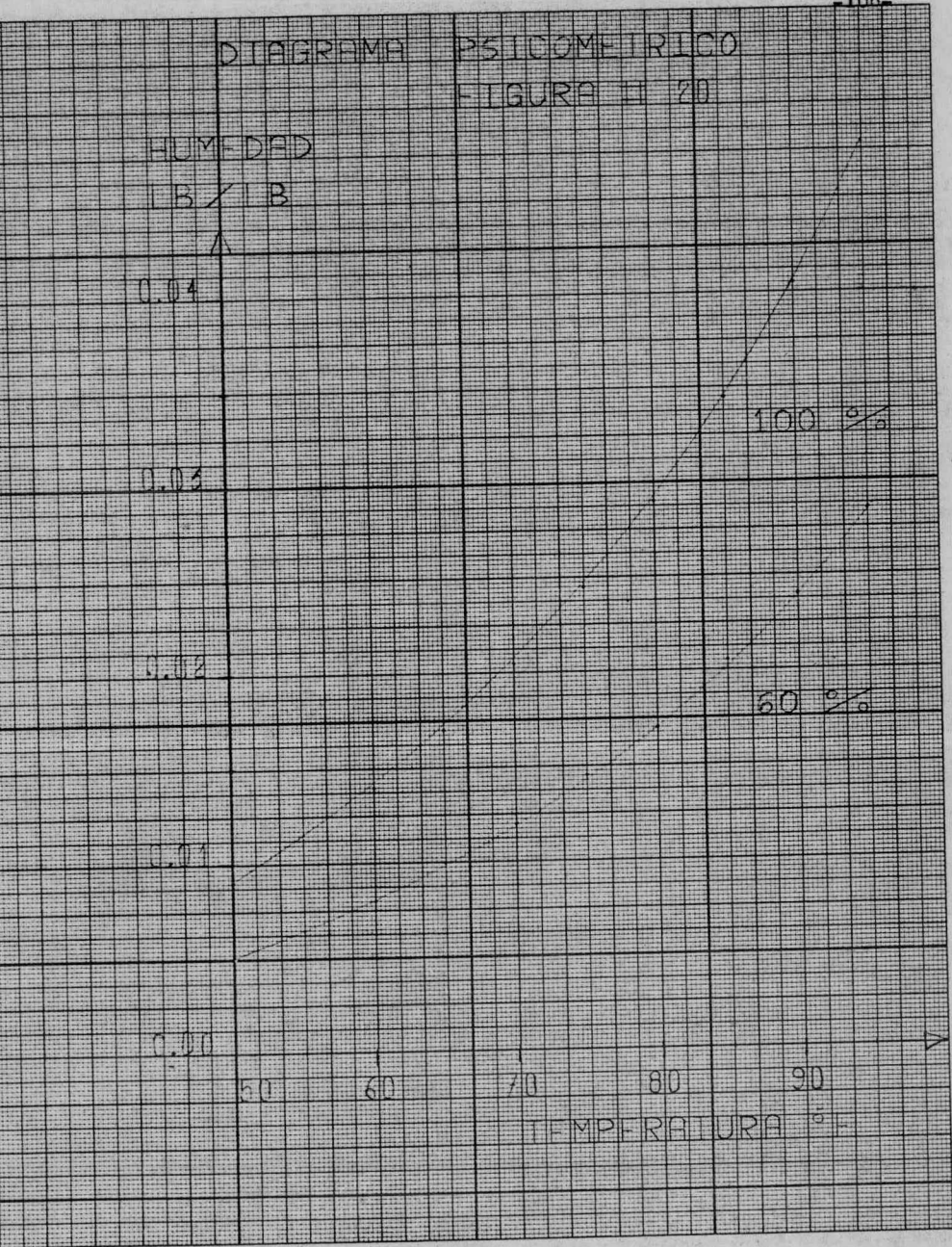
90

TEMPERATURA °F

100 %

60 %

V





A partir de la experiencia empírica y del conocimiento técnico económico, los fabricantes proporcionan el modelo de torre para el rango de enfriamiento requerido; el modelo adecuado, comprende todo el equipo mecánico, eléctrico y estructural necesario.

Los resultados obtenidos en este trabajo, se basan en conocimientos teóricos adquiridos de la literatura existente, y -- entre estos resultados y los proporcionados por los fabricantes de torres de enfriamiento, es necesario hacer una cuantificación de la relación existente entre estos.

Para este caso, los fabricantes proporcionan los siguientes modelos de torres de enfriamiento, los cuales se comparan con los resultados obtenidos del cálculo teórico.

ALTERNATIVA "A"

Fabricante : ECODYNE

Modelo : 253-4-346

( 2 celdas )

Largo	11.48	m
Ancho	11.00	m
Altura efectiva de empaque	3.785	m
Area	126.28	m <sup>2</sup>
Flujo de aire	326 600.00	ft <sup>3</sup> /min/celda
Caída de presión	0.508	in H <sub>2</sub> O/celda
Potencia real	50.0	BHP / celda

Se observa en la tabla # 12, que los datos proporcionados por el fabricante, se ajustan a los datos de la columna # 6, la cual tiene las siguientes características:

Largo		
Ancho		
Altura efectiva de empaque	3.860	m
Area	75.80	m <sup>2</sup>
Flujo de aire	362 733.48	ft <sup>3</sup> /min
Caída de presión	0.512	in H <sub>2</sub> O
Potencia real	51.31	BHP

## ALTERNATIVA "B"

Fabricante : MARLEY

Modelo : 574-48-01

Largo	15.703	m
Ancho	7.467	m
Altura efectiva de empaque	6.36	m
Area	52.3	m <sup>2</sup>
Flujo de aire	370 000.0	ft <sup>3</sup> /min
Caída de presión	0.730	in H <sub>2</sub> O
Potencia real	75.0	BHP

Nuevamente se observa en la tabla # 12, las características que se ajustan al modelo anterior ( columna # 4 ), las cuales son las siguientes:

Largo		
Ancho		
Altura efectiva de empaque	5.61	m
Area	65.92	m <sup>2</sup>
Flujo de aire	318 863.04	ft <sup>3</sup> /min
Caída de presión	0.726	in H <sub>2</sub> O
Potencia real	64.99	BHP

## ESPECIFICACIONES DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO ( ALTERNATIVA "A" )

## FUNCION

Gasto de agua	2 642	GPM
Temperatura de entrada	86	°F
Temperatura de salida	68	°F
Carga térmica de enfriamiento	23 808 000	BTU/hr
Código de prueba	CTI	

## SELECCION

Fabricante	BOODYNE
Modelo	253-4-346
Tipo	53
Número de celdas	2

## DISEÑO

Temperatura de bulbo húmedo	60	°F
Cabeza estática de bombeo	17 ft	5 in

Volumen efectivo de enfriamiento	3 166 ft <sup>3</sup> /celda
Factor de empaque	12.52 ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup>
Superficie húmeda total	39 639 ft <sup>2</sup>
Superficie de salpiqueo efectiva	13 777 ft <sup>2</sup>
Número de ventiladores requeridos	2
Flujo de aire/ventilador	326 600 ft <sup>3</sup> /min
Presión estática	0.508 in H <sub>2</sub> O
Potencia nominal/ventilador	43.7 BHP
Pérdidas por evaporación	1.8 %
Pérdidas por arrastre mecánico	0.1 %

MATERIALES DE CONSTRUCCION

Armazón	Madera tratada
Cubierta	Asbesto cemento
Empaque	Madera tratada
Cilindro del ventilador	Lámina
Escalera	Madera
Pernos, tuercas, ferretería	Acero galvanizado
Clavos	Acero doble galvanizado
Cabezal de entrada	Acero galvanizado
Boquillas	Plástico
Estanque	Concreto
Hojas del ventilador	Aluminio
Eje del ventilador	Acero galvanizado
Flecha del ventilador	Acero inoxidable

EQUIPO AUXILIAR

VENTILADOR

Fabricante	ECODYNE
Tipo	Axial paso ajustable
Diámetro	14 ft
Velocidad	274 rpm
Velocidad periférica	12 050 ft/min

REDUCTOR

Fabricante	Western
Tipo	Angulo recto
Tamaño	Fw - 50

Relación de reducción	6.45
Potencia nominal	47.5 BHP
Eficiencia mecánica	95 %
Factor de servicio	2.0

MOTOR

Fabricante	IEM
Tipo	Jaula de ardilla totalmente cerrado con ventilación ( TCCV )
Velocidad	1 800 rpm
Potencia eléctrica	50 BHP
Factor de servicio	1.7
Arreglo	Horizontal

ESPECIFICACIONES DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO ( ALTERNATIVA "B" )

FUNCION

Gasto de agua	2 642 GPM
Temperatura de entrada	86 °F
Temperatura de salida	68 °F
Carga térmica de enfriamiento	23 808 000 BTU/hr
Código de prueba	CTI

SELECCION

Fabricante	MARLEY DE MEXICO
Modelo	576 - 48 - 01
Tipo	500 doble flujo
Número de celdas	1

DISEÑO

Temperatura de bulbo húmedo	60 °F
Cabeza estática de bombeo	23 ft
Volumen efectivo de enfriamiento	12 096 ft <sup>3</sup>
Factor de empaque	12.52 ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup>
Superficie húmeda total	
Superficie de salpiqueo efectiva	
Número de ventiladores requeridos	1
Flujo de aire	370 000 ft <sup>3</sup> /min

Presión estática	0.730 in H <sub>2</sub> O
Potencia nominal/ventilador	65.55 BHP
Pérdidas por evaporación	1.8 %
Pérdidas por arrastre mecánico	0.1 %

MATERIALES DE CONSTRUCCION

Armazón	Madera tratada
Cubierta	Asbesto cemento
Empaque	Plástico
Cilindro del ventilador	Fibra de vidrio
Escalera	Madera, tipo marinero
Pernos, tuercas, ferretería	Acero al carbón galvaniza- do
Clavos	Acero inoxidable
Cabezal de entrada	Acero al carbón galvaniza- do
Boquillas	Plástico
Estanque	Concreto
Hojas del ventilador	Aluminio
Eje del ventilador	Acero al carbón galvaniza- do en caliente
Flecha del ventilador	Acero al carbón galvaniza- do

EQUIPO AUXILIAR

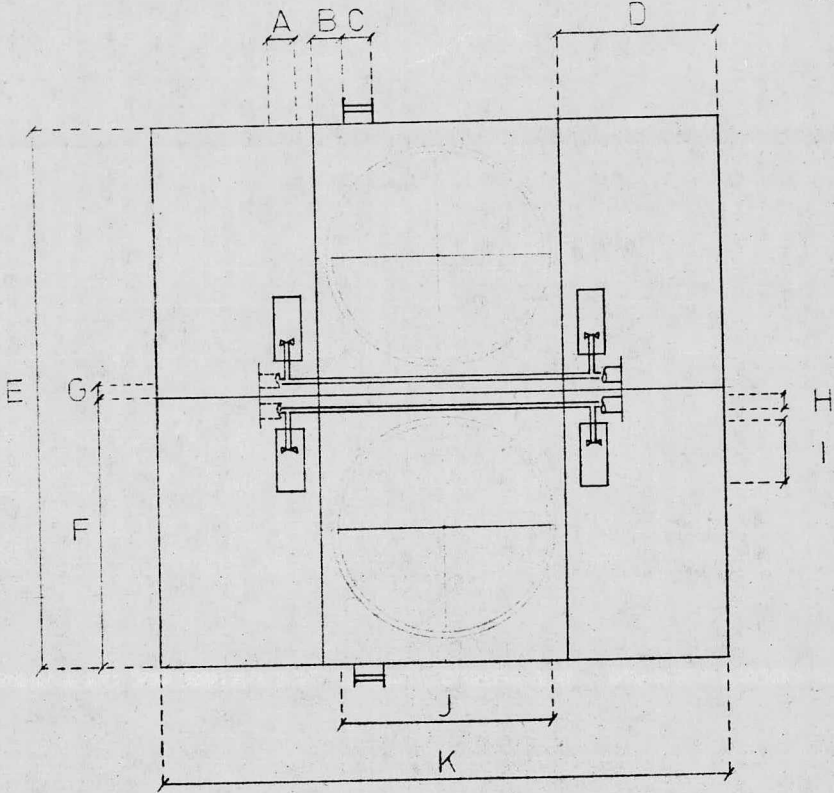
VENTILADOR

Fabricante	MARLEY DE MEXICO
Tipo	H - 3 ( axial paso ajusta- ble )
Diámetro	18 ft
Velocidad	227 rpm
Velocidad periférica	12 836 ft/min

REDUCTOR

Fabricante	MARLEY DE MEXICO
Tipo	Serie 32 ( ángulo recto )
Tamaño	
Relación de reducción	7.89
Potencia nominal	69 BHP

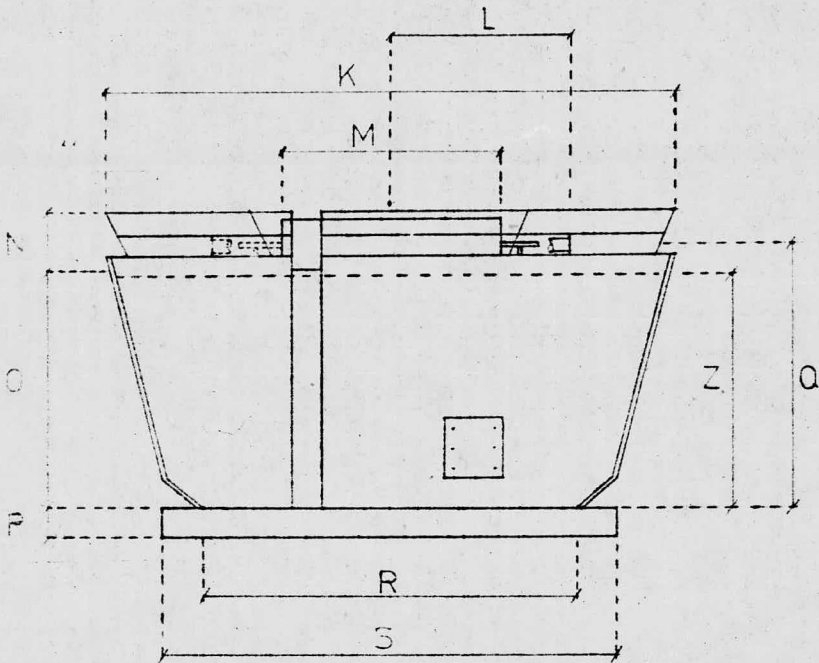
Eficiencia mecánica	95 %
Factor de servicio	2.0
MOTOR	
Fabricante	U. S. Motors
Tipo	Jaula de ardilla, totalmente cerrado con ventilación ( TCCV )
Velocidad	1 800 rpm
Potencia eléctrica	75 BHP
Factor de servicio	1.0
Arreglo	Horizontal



DIMENSIONES

A	0.55 m	1.83 ft
B	0.60	2.00
C	0.60	2.00
D	3.25	10.72
E	11.00	36.30
F	5.50	18.15
G	0.30	1.00
I	1.30	4.29
J	4.26	14.00
K	11.48	37.85

ALTERNATIVA	A
VISTA SUPERIOR	
ESCALA	1 100



DIMENSIONES

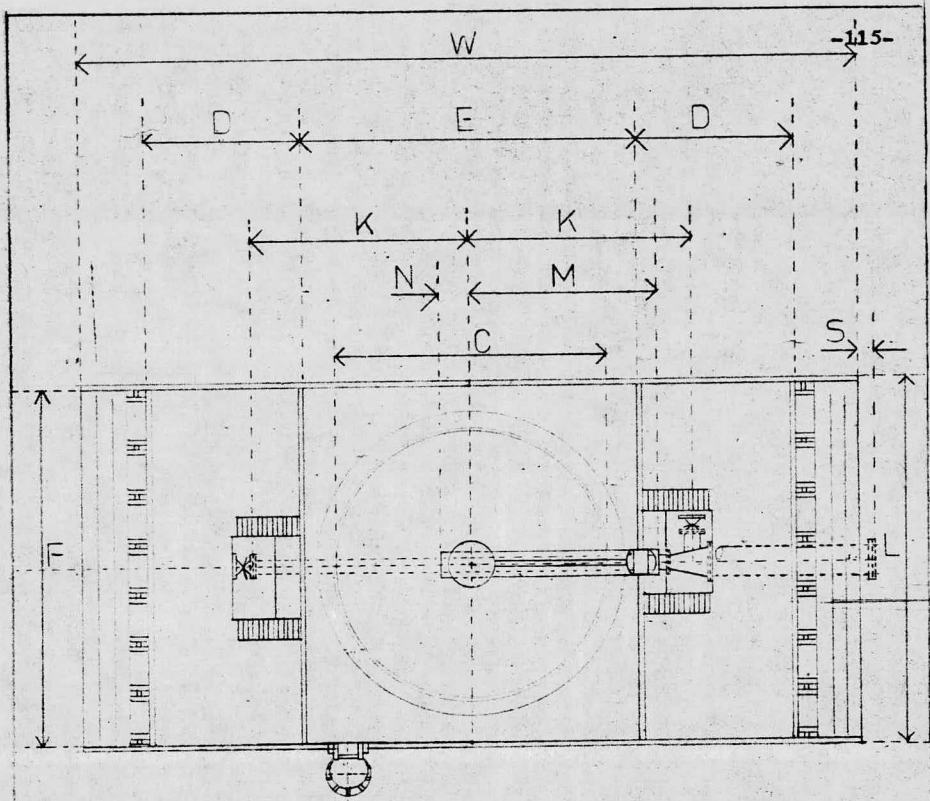
K	11.48 m	37.60 ft
L	3.65	12.00
M	4.36	14.33
N	1.10	3.66
O	5.15	16.91
P	0.60	2.00
O	5.31	17.41
R	7.98	26.18
S	9.18	30.25
Z	4.51	14.91
Z = altura de empaque		

ALTERNATIVA : A

VISTA : LATERAL

ESCALA : 1 : 100

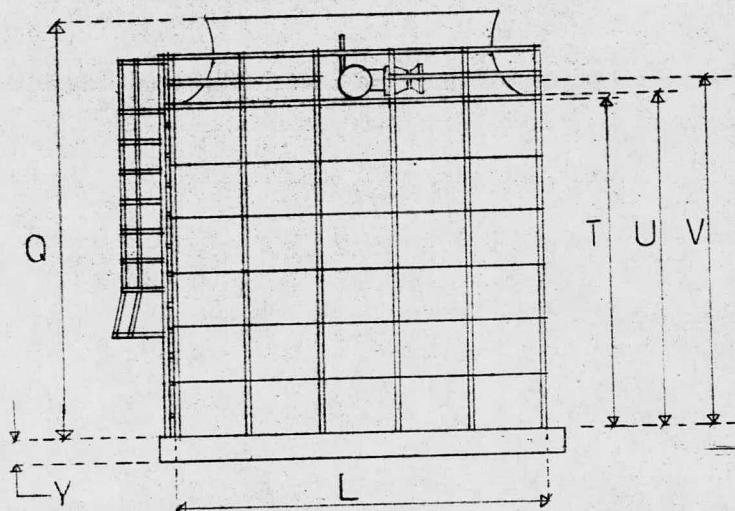




DIMENSIONES

W	15.70 m	51.81 ft
D	3.20	10.5
E	6.71	22.0
K	4.42	14.5
N	0.61	2.0
M	3.71	12.16
C	5.45	18.0
S	0.30	1.0
L	7.47	24.5
F	7.27	24.0

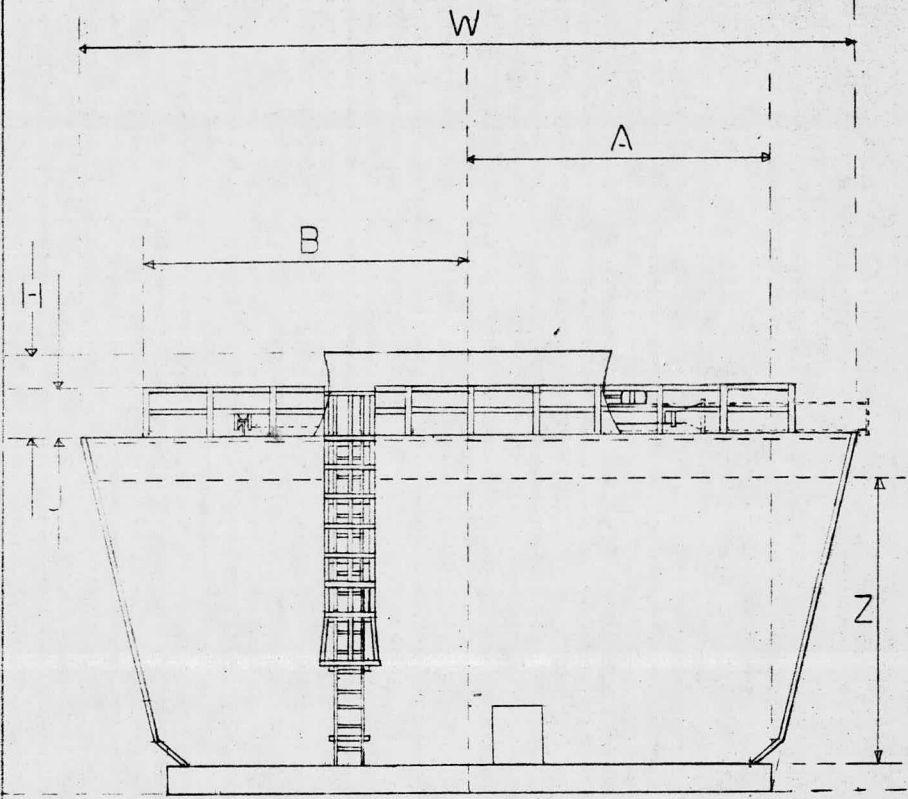
ALTERNATIVA:	B
VISTA:	SUPERIOR
ESCALA:	1:100



### DIMENSIONES

L	7.47m	24.5 ft.
Q	8.47	27.95
T	6.64	21.92
U	6.73	22.2
V	7.0	23.1
Y	0.51	1.68

ALTERNATIVA: B
VISTA: FRONTAL
ESCALA: 1:100



DIMENSIONES

W	15.70 m	51.81 ft
A	6.1	20.13
B	6.6	21.78
H	1.72	5.67
J	1.0	3.3
Z	5.82	19.2

Z = altura de empaque

ALTERNATIVA: B
VISTA: LATERAL
ESCALA: 1:100

X.- COSTOS.

Este capítulo junto con el anterior, son de suma importancia, ya que la selección de la torre de enfriamiento está basada en ellos.

El estudio económico de las alternativas, se determina haciendo un balance de los costos fijos y los costos de operación para cada una de ellas; posteriormente, por comparación entre los costos totales anuales, se obtiene la alternativa óptima.

El costo de las torres de enfriamiento que se estudian se obtiene a partir de datos de fabricantes o factores unitarios de costos.

#### ALTERNATIVA "A"

##### Costos fijos.

Costo de la torre	\$ 800 000.00
Costo de la cimentación	\$ 4 000.00 / m <sup>3</sup> concreto
Costo de la cimentación	\$ 71 130.00
Costo de instalación	18 % del costo de la torre
Costo de instalación	\$ 144 000.00
Costos fijos	<u>\$ 1 015 130.00</u>

##### Costos de operación.

Estos costos involucran el consumo de agua, reactivos y energía.

Los costos de agua y reactivos permanecen constantes para las dos alternativas, puesto que se utiliza el mismo gasto de agua, así como la misma cantidad de reactivos para su tratamiento químico.

Los costos de energía son diferentes para cada alternativa, debido a los motores utilizados en cada una de las alternativas ( potencia estática de bombeo y potencia del ventilador ).

Estos costos se rigen según las tarifas que fija la Compañía de Luz y Fuerza, para servicios generales en alta tensión.

Cargos fijos independientes de la energía consumida.

Se cobran \$ 11.00 por cada uno de los primeros 50 kilowatts de demanda base de facturación; \$ 15.00 por cada kilowatt adicional de demanda base de facturación.

Potencia total de motores = 130 HP

Potencia total = 97 kw

Consumo mensual = ( 720 hr/mes ) ( 97 kw )

Consumo mensual = 69 840 kw hr/mes

Cargos fijos mensuales = \$ 11.00 x 50 kw + \$ 15.00 x 47 kw

Cargos fijos mensuales = \$ 1 255.00

Cargos adicionales por la energía consumida.

\$ 0.25 por cada uno de los primeros 90 kw-hr.

\$ 0.20 por cada uno de los siguientes 180 kw-hr.

\$ 0.15 por cada kw-hr adicional a los anteriores.

Más el 30 % por variación en el costo de la hora de trabajo.

Como el consumo mensual es de 69 840 kw-hr/mes, el costo -  
será:

$$0.25 \times 90 = 22.50$$

$$0.20 \times 180 = 36.00$$

$$0.15 \times 69\ 570 = 10\ 435.50$$

---

$$\$ 10\ 494.00$$

$$\text{Total} = ( 1.30 \times 10\ 494.00 ) + 1\ 255.00$$

$$\text{Total} = \$ 14\ 897.20 \text{ ( mensual )}$$

$$\text{Costo de la energía eléctrica anual} = \$ 178\ 766.40$$

Costos de mantenimiento.

Estos se consideran aproximadamente igual al 5 % anual so--  
bre los costos fijos.

$$0.05 \times 1\ 015\ 130.00 = \$ 50\ 756.50$$

Amortización de la inversión.

Los pagos se hacen anualmente y la anualidad se calcula con  
la siguiente fórmula, que es la de pago uniforme con reinversión.  
El interés es del 10 % anual sobre el total de los costos fijos  
y el tiempo de recuperación es de 10 años ( tiempo de vida del -  
equipo ).

$$A = I i ( 1 + i )^n / [ ( 1 + i )^n - 1 ] \tag{117}$$

donde: A = anualidad

I = capital invertido

i = interés

n = tiempo de amortización

por lo tanto:

$$A = 1\ 015\ 130.00 \times 0.1 ( 1.1 )^{10} / [ ( 1.1 )^{10} - 1 ]$$

A = \$ 164 958.00

Costo total anual.

Costos fijos	\$ 1 015 130.00
Costos de operación	\$ 178 766.40
Costos de mantenimiento	\$ 50 756.50
Amortización	\$ 164 958.00
Costo total anual	<u>\$ 1 409 610.90</u>

ALTERNATIVA "B"

Costos fijos.

Costo de la torre	\$ 679 500.00
Costo de la cimentación	\$ 56 000.00
Costo de la instalación	\$ 82 300.00
Costos fijos	<u>\$ 817 800.00</u>

Costos de operación.

Potencia total de motores = 93 HP

Potencia total = 70 kw

Consumo mensual = ( 720 hr/mes ) ( 70 kw )

Consumo mensual = 50 400 kw hr/mes

Cargos fijos mensuales = \$ 11.00 x 50 kw + \$ 15.00 x 20 kw

Cargos fijos mensuales = \$ 850.00

NOTA: La tarifa es la misma que para la alternativa "A"

Cargos adicionales por la energía consumida.

0.25 x 90 = 22.50

0.20 x 180 = 36.00

0.15 x 50 130 = 7 519.50

\$ 7 578.00

Total = ( 1.30 x 7 578.00 ) + 850.00

Total = \$ 10 701.40 ( mensual )

Costo de la energía eléctrica anual = \$ 128 416.80

Costos de mantenimiento.

0.05 x 817 800.00 = \$ 40 890.00

Amortización de la inversión.

$$A = 817\ 800.00 \times 0.1 (1.1)^{10} / \left[ (1.1)^{10} - 1 \right]$$

$$A = \$ 132\ 321.60$$

Costo total anual.

Costos fijos	\$ 817 800.00
Costos de operación	\$ 128 416.80
Costos de mantenimiento	\$ 40 890.00
Amortización	\$ 132 321.60
Costo total anual	<hr/> \$ 1 119 428.40



**XI.- CONCLUSIONES.**

Como se observó en el capítulo IX, que entre el diseño teórico efectuado y los diseños proporcionados por los fabricantes, no existe una marcada diferencia al compararlos, es decir, las dos alternativas cumplen con el propósito requerido.

Es necesario hacer notar que el diseño se ha realizado dentro de un rango recomendable de relaciones ( L/G ), donde la operación puede llevarse a cabo en dos de éstas relaciones, pero de acuerdo a los diseños proporcionados por los fabricantes.

Cabe hacer recordar que el diseño efectuado en este trabajo es para un caso general de enfriamiento de agua y no particular o específico.

Para efectuar una selección más rigorista del equipo adecuado, es necesario considerar los puntos siguientes.

- 1.-Desde el punto de vista de operación, la alternativa "A" - tiene mayor adaptabilidad a los cambios de trabajo, puesto que en un momento dado, el equipo puede sufrir fallas mecánicas o eléctricas en una celda, pero, la otra celda puede seguir trabajando sin perjudicar grandemente el proceso que necesite del agua de enfriamiento; en cambio, en la alternativa "B", si sucedieran las mismas fallas anteriores, sería necesario parar totalmente la torre y consecuentemente dañaría al proceso.
- 2.-En función del factor economía, la alternativa "B", sería el equipo seleccionado para éste trabajo; puesto que habría un ahorro bastante grande de capital en comparación con la alternativa "A", como se ha observado en el capítulo anterior.
- 3.-Con lo que respecta al mantenimiento, no existe diferencia entre las dos alternativas, puesto que las dos laborarían bajo un mismo período de revisión ( tabla # 1 ), incluyendo el tratamiento de agua, que también es el mismo para las dos alternativas.
- 4.-El punto más importante para la selección concreta de la alternativa óptima, es indudablemente necesario conocer el tipo de servicio para el cual se destina el agua de enfriamiento, puesto que existen procesos en los que se requiere agua de enfriamiento cuya temperatura sea fija lo más posible, y otros en los que puede haber un rango razonable de variación

de ésta temperatura.

Conociendo el tipo de servicio y las consideraciones anteriores y con ayuda del criterio adquirido, se puede escoger la alternativa necesaria según sea el caso.

**XII.- BIBLIOGRAFIA.**