



**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.**

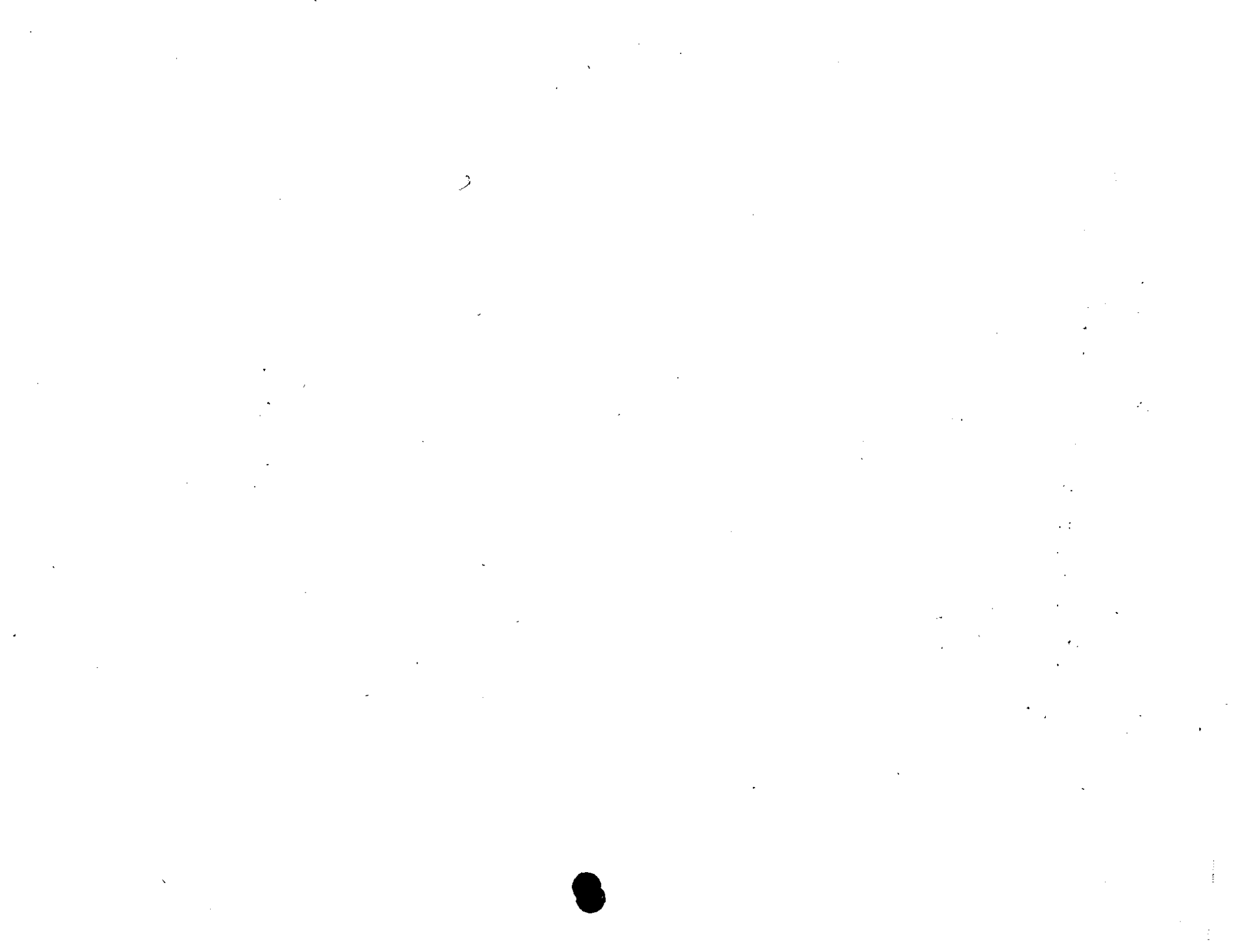
C U R S O S A B I E R T O S

T O R R E S D E E N F R I A M I E N T O

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

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

MAYO 1992.



TORRES DE ENFRIAMIENTO

I.- INTRODUCCION

1.- GENERALIDADES

El enfriamiento por evaporación del agua de circulación ha adquirido mucha difusión en una serie de ramas industriales importantes como la energética, química, metalúrgica, etc., en donde se tiene el problema de la necesidad de eliminar mucha cantidad de calor a baja temperatura.

En la mayoría de los casos, como medio para eliminar este calor en los aparatos industriales se emplea agua que desempeña el papel de agente de enfriamiento; de la inmensa cantidad de agua utilizada en la industria, la mayor parte se utiliza para enfriamiento.

El uso de agua de enfriamiento, está ligado en unos casos al mismo proceso tecnológico, como por ejemplo, la condensación de vapor después que se expande en una turbina de vapor o la dilución de sustancias producidas en la industria química; en otros casos se emplea para protección de diversos elementos tecnológicos, como por ejemplo, los cilindros de motores de combustión interna o "camisas" de hornos industriales contra un deterioro rápido por alta temperatura.

Las condiciones en que se debe desempeñar el agua con relación a temperatura y calidad es muy variable, en función del destino del agua de enfriamiento; en muchos casos, se requiere que la temperatura del agua no pase de un cierto límite relativamente bajo, y el contenido en impurezas no lleve a la formación de depósitos en el sistema o a la corrosión de partes metálicas. Estas condiciones se imponen por las características desarrolladas en el proceso de producción, así como por la necesidad de seguridad y del funcionamiento económico de la instalación; así por ejemplo, en las plantas eléctricas con turbina de vapor, la ele-

vación de temperatura del agua de enfriamiento, lleva a mayor consumo de combustible para producir energía eléctrica, y en unos casos a la reducción de potencia disponible. En las refinerías de petróleo y en una serie de instalaciones químicas la elevación de temperatura de enfriamiento está ligada a la caída de cantidad de producción y a veces a la pérdida de componentes más valiosos, como por ejemplo las fracciones de petróleo; en las instalaciones frigoríficas se tienen una caída de la capacidad de producción de hielo.

El efecto anterior y los depósitos (limo, sales) sobre la superficie sujeta a enfriamiento, empeora las condiciones en que tiene lugar el cambio de calor.

Por lo general, el régimen térmico del aparato sujeta a enfriamiento exige, junto a una temperatura bastante baja del agua que entra, una limitación en el calentamiento del sistema; lo anterior tiene como consecuencia un consumo grande de flujo de agua, que en algunas empresas de cientos de m^3 /hora (centrales eléctricas, plantas metalúrgicas, refinerías de petróleo, etc).

Si se dispone de una fuente de agua de capacidad suficiente (ríos, lagunas, mares), por lo general la alimentación de agua se aplica en un sistema de paso libre (un paso), en que el agua se usa solo una vez para enfriamiento. Cuando la aplicación de un sistema de un paso no es posible o es anti-económico, se puede realizar el enfriamiento con aire y el agua que circula en un sistema cerrado desempeña el papel de un agente térmico intermedio entre la instalación sujeta a enfriamiento y el aire exterior; en este caso, el sistema de suministro de agua se conoce como circuito cerrado, y el agua empleada como sistema de agua de circulación.

El uso directo de aire como medio de enfriamiento ha tenido un desarrollo reducido; esto se explica principalmente por el coeficiente tan pequeño de transferencia de calor entre la superficie sujeta a enfriamiento y el aire, lo que ocasiona la necesidad de una superficie de enfriamiento algunas veces más grande

que con enfriamiento con agua. Las dificultades de enfriamiento con aire se mantienen en la aplicación de sistemas de agua en - circuito cerrado, cuando el aire se usa para enfriar el agua de circulación en cambiadores de calor de superficie (radiadores).

Una intensificación considerable de cambio de calor entre el - agua de circulación y el aire, así como una reducción en la cantidad de aire necesaria, se realiza por el uso de un sistema de enfriamiento por contacto, que utiliza el sistema de enfriamiento por evaporación; en este enfriamiento por evaporación el - - agua de circulación adquiere una utilización predominante con - agua en circuito cerrado. Las instalaciones que usan este proceso se denominan torres de enfriamiento.

Según el tipo de enfriamiento, las torres de enfriamiento pueden ser cambiadores de calor de:

- . evaporativas
- . Superficie

A su vez, las torres evaporativas se dividen en tres grupos que son:

- . torres atmosféricas
- . torres con chimenea
- . torres con ventiladores

Los tipos anteriores se pueden dividir según el tipo para crear la superficie de enfriamiento:

- . con toberas
- . con dispositivos de riego

Los dispositivos de riego pueden ser los siguientes:

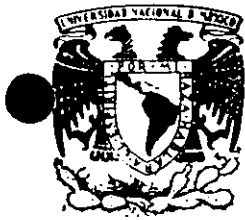
- . de gotas, en que el cambio de calor tiene lugar principalmente en la superficie de la gota de agua.

- . de tipo película, en que el cambio de calor tiene lugar en la superficie de la película.
- . mixtos (de gotas y de película)

Según la dirección de la circulación del aire, en el dispositivo de rociado, con relación a la circulación del aire, las torres de enfriamiento pueden ser de:

- . flujo a contra-corriente
- . flujo cruzado
- . flujo mixto (contra-corriente y cruzado)

La evaporación del agua depende principalmente de la humedad del aire a la entrada de la torre, es decir, del aire ambiente, por lo anterior, se presentan algunas nociones referidas a las dimensiones del estado del aire (Psicrometría).



**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.**

C U R S O S A B I E R T O S

T O R R E S D E E N F R I A M I E N T O

L O S S I S T E M A S D E E N F R I A M I E N T O

I N G . M A R T I N I A N O A G U I L A R R .

M A Y O 1 9 9 2 .

LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

3.01 G E N E R A L

En la generación de energía eléctrica, por medio de Plantas Termoeléctricas, más del 40% de la energía utilizada se rechaza del ciclo térmico en el condensador y aproximadamente un 15% en la caldera; la mayor parte del calor rechazado en la caldera sale con los gases de escape por la chimenea y se difunde en la atmósfera. El calor rechazado en el condensador es absorbido por el agua de enfriamiento y el calor se difunde en mares, ríos, lagos, estanques o torres de enfriamiento.

La eficiencia térmica más alta que puede obtenerse cuando se convierte calor en energía está dada por la ecuación del ciclo de Carnot :

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

en donde :

T_1 = temperatura de la fuente de calor, en °K

T_2 = temperatura del rechazo de calor, en °K

En la Fig. 3.01 se muestra el circuito térmico y el balance del ciclo térmico en una Planta Termoeléctrica; en el siguiente Capítulo se verá con mayor amplitud los ciclos térmicos y sus eficiencias.

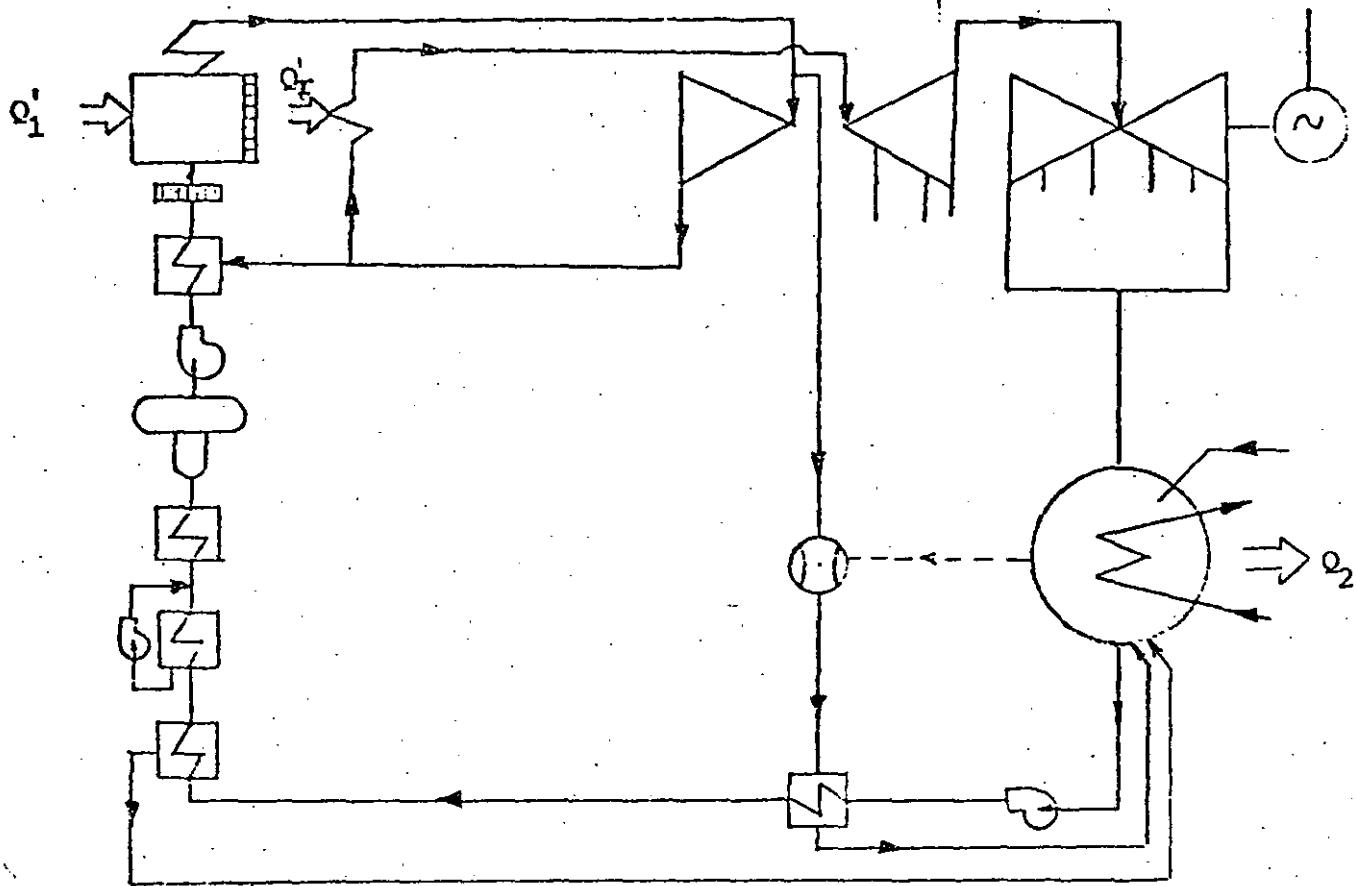
Para el rechazo de calor en el condensador, existen dos formas fundamentales :

- Circuitos abiertos
- Circuitos cerrados o de enfriamiento evaporativo

En la Fig. N^o. se muestra el balance de agua de enfriamiento de una Planta Termoeléctrica tanto para el circuito abierto, como el circuito cerrado.

En el primer caso (circuitos abiertos), se toma el agua de mares, ríos o lagos grandes haciéndola pasar a través del condensador en donde absorbe el calor del ciclo y después se regresa a la fuente; este regreso se efectúa mediante un diseño que evite la recirculación de agua, o bien, se disminuya dicha circulación al mínimo.

En el segundo caso (circuitos cerrados o enfriamiento evaporativo), el agua se toma de un depósito artificial de agua, se pasa a través del condensador y después se regresa al depósito de donde se recircula al condensador, enfriándose previamente el agua, ya sea en el depósito o antes de él; en los circuitos cerrados o sistemas de enfriamiento evaporativos



CIRCUITO TERMICO DE UNA PLANTA TERMOELECTRICA

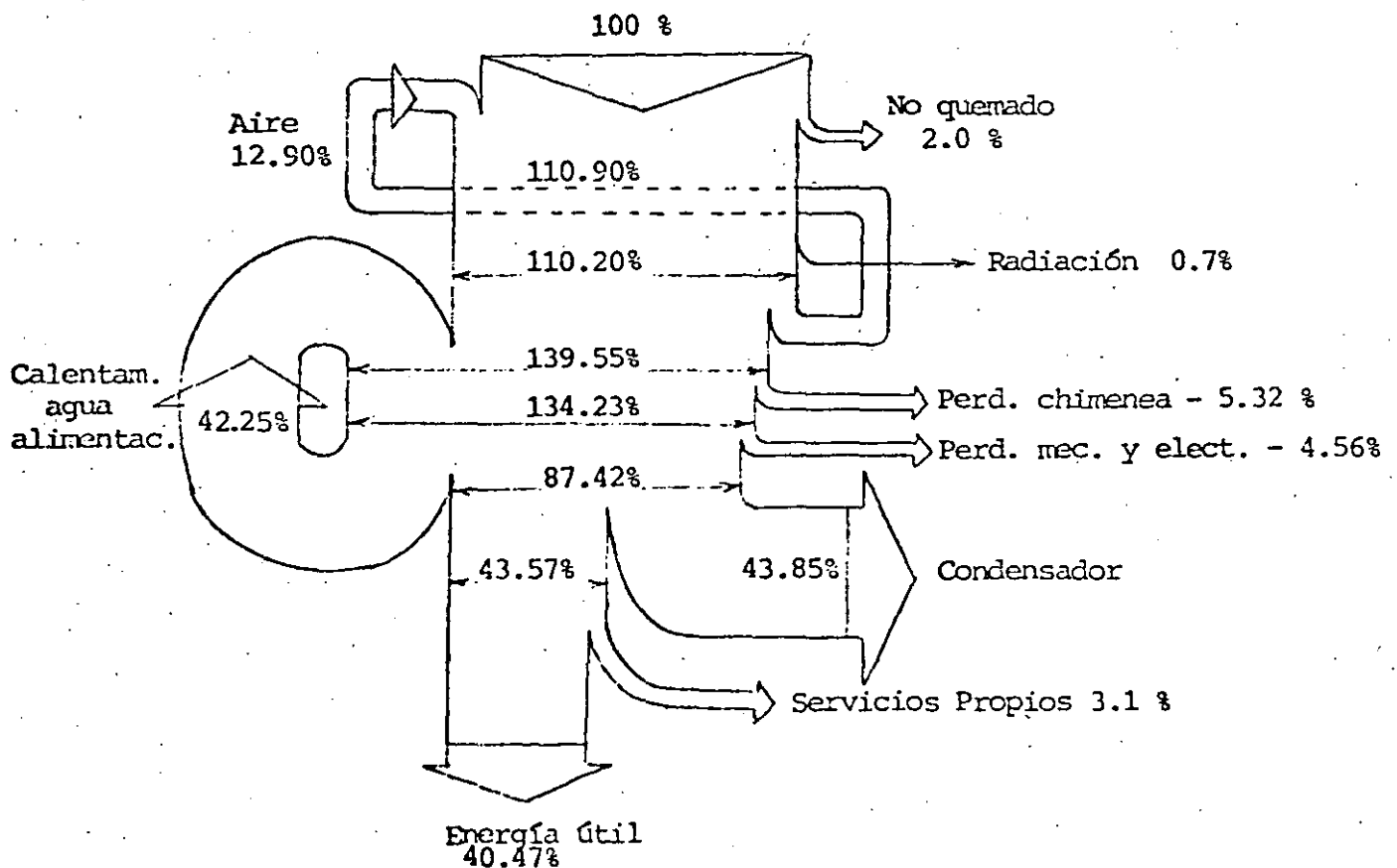


FIG. 3.01 .- FLUJO DE ENERGIA EN UNA PLANTA TERMOELECTRICA

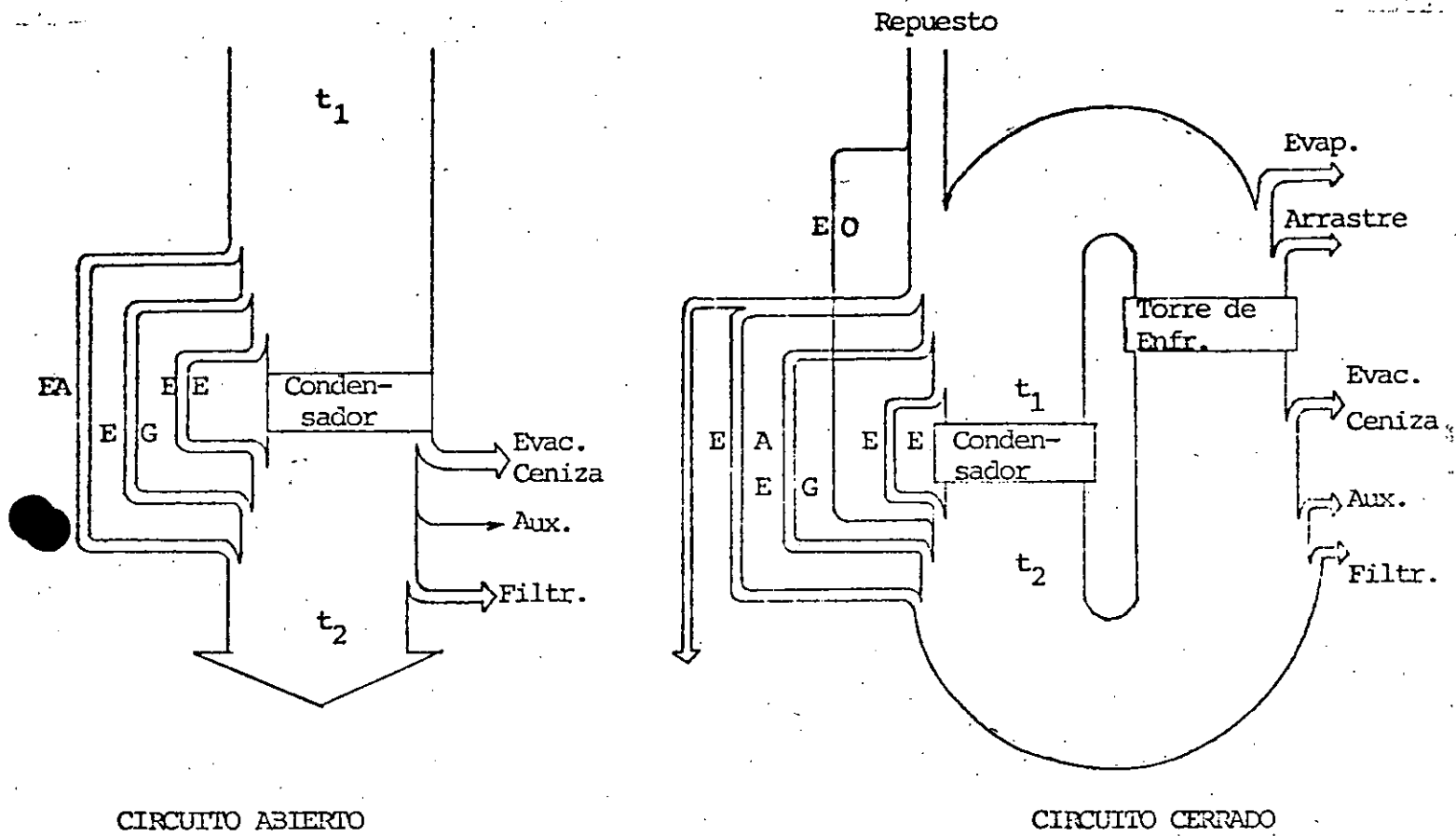


FIG. .- BALANCE DE AGUA DE ENFRIAMIENTO EN PTE.

tienen lugar tres procesos simultáneos :

- transferencia de calor por convección de calor sensible del agua caliente al aire frío.
- si la presión del vapor de agua en el aire es menor que la de la superficie del agua, se tiene transferencia de masa en la forma de moléculas de agua; normalmente la mayor transferencia de calor se realiza en este proceso.
- movimiento de calor desde el cuerpo del líquido a la superficie del mismo; este efecto es pequeño y normalmente se ignora en los cálculos de enfriamiento.

II.- PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

1.- EVOLUCION Y TRANSFERENCIA DE CALOR

Las torres, son dispositivos de enfriamiento artificial de agua, que se clasifican como cambiadores de calor, entre un volumen en circuito cerrado de agua y el aire atmosférico.

Inicialmente las torres de enfriamiento eran totalmente de madera; la más primitiva de las torres de enfriamiento consistía de ramas amontonadas, sobre las cuales escurría o goteaba el agua. En términos generales, la evolución ha sido la siguiente:

.Primeramente, se le instaló una cubierta para prevenir la contaminación del agua de circulación por hojas arrastradas por el viento, grasa o basura.

.Posteriormente se le dió forma a la cubierta para facilitar el flujo de aire y extenderla verticalmente para aumentar el tiro.

.Después, para mejorar el contacto entre agua y aire, se instalaron los rellenos en el interior de la torre.

En la década de los años 1920, se incorporaron los ventiladores mecánicos que proporcionaron un medio efectivo de mantener el flujo de aire.

La evolución anterior ha resultado en el desarrollo de una variedad de tipos y tamaños disponibles de torres de enfriamiento.

Los mecanismos de transferencia de calor del agua al aire son los siguientes.

.Convección o conducción.- Es el calor sensible transferido, que es directamente proporcional a la cantidad y característica de la interfase de superficie agua-aire y a la diferencia de temperatura entre el agua y la temperatura de bulbo seco del aire ambiente.

.Evaporación o cambio de sustancia.- Si la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente es más baja que la temperatura del agua junto al aire, el agua tiende a vaporizarse y a cambiar su fase de líquido a gas; este cambio de fase, extrae del agua el calor latente de vaporización que acompaña los cambios de fase con lo cual reduce la temperatura del agua. La transferencia de calor evaporativo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del agua y la de bulbo húmedo del aire ambiente.

.Radiación.

.Advección.- Calor específico contenido dentro de cualquier masa de agua, transportado o transferido a través de la interfase agua-aire.

La radiación y la advección en una torre de enfriamiento, son prácticamente despreciables, quedando únicamente la convección y la evaporación como los dos mecanismos de transferencia de calor.

El cálculo cuantificativo del comportamiento térmico de una torre de enfriamiento, tratando la transferencia de masa y calor separadamente es muy difícil y laborioso, por lo que es necesario hacer simplificaciones con aproximaciones del fenómeno que se desarrolla.

El primero que hizo un análisis satisfactorio de la transferencia de calor en las torres de enfriamiento fue Merkel en el año de 1926, y aún cuando las ecuaciones deducidas no son estrictamente precisas, si analizan los resultados en forma simple y con cierta precisión razonable.

El régimen de transferencia de calor en una torre de enfriamiento para los procesos de evaporación y convección, se incrementa con los correspondientes incrementos de:

.Relación aire a agua.- Para un flujo de agua necesario, es función de la capacidad de los ventiladores o la chimenea.

.Interfase de superficie aire-agua.- El relleno de las torres de enfriamiento tiene la finalidad de incrementarlo; el relleno puede ser tipo película o de salpicado.

.Velocidad relativa entre aire y agua.- Los ventiladores o las chimeneas, tienen el objetivo de crear la velocidad relativa entre el agua y el aire.

.Tiempo de contacto entre aire y agua.- Es una función del tamaño de la torres de enfriamiento.

.Diferencia de temperatura entre agua y aire.- Esta relacionada con las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente y es una función de las condiciones naturales.

Los primeros cuatro factores están influenciados por el diseño de la torre; el quinto factor, diferencial de temperatura, es independiente del diseño de la torre de enfriamiento y la variación de un parámetro como la temperatura de bulbo ^{húmedo} puede tener un efecto muy significativo sobre la torre de enfriamiento.

2.- PRINCIPALES COMPONENTES.

En la fig. 5 , en donde se muestra el balance de masa y calor de una torre de enfriamiento, se pueden observar algunos de sus principales componentes, que incluyen los siguientes.

Una estructura, en donde se hace escurrir el agua caliente que llega por la parte superior; esta estructura tiene aperturas adecuadas para que pueda fluir el ^{aire} atmosférico de enfriamiento. En el interior de la estructura se tienen rellenos especiales para aumentar la superficie del agua en contacto con el aire.

Un ventilador o ventiladores (en las t.e. de tiro mecánico) para ayudar a una circulación efectiva del aire; en las torres de enfriamiento de tiro natural, el ventilador se sustituye por una chimenea alta.

Una pileta en la parte inferior para recoger el agua fría, que escurre de la estructura.

Adicionalmente, se tienen otros componentes, para hacer funcional la torre, como por ejemplo, cubierta, eliminadores de humedad, persianas de entrada, etc., que pueden observarse en la Fig. 6.

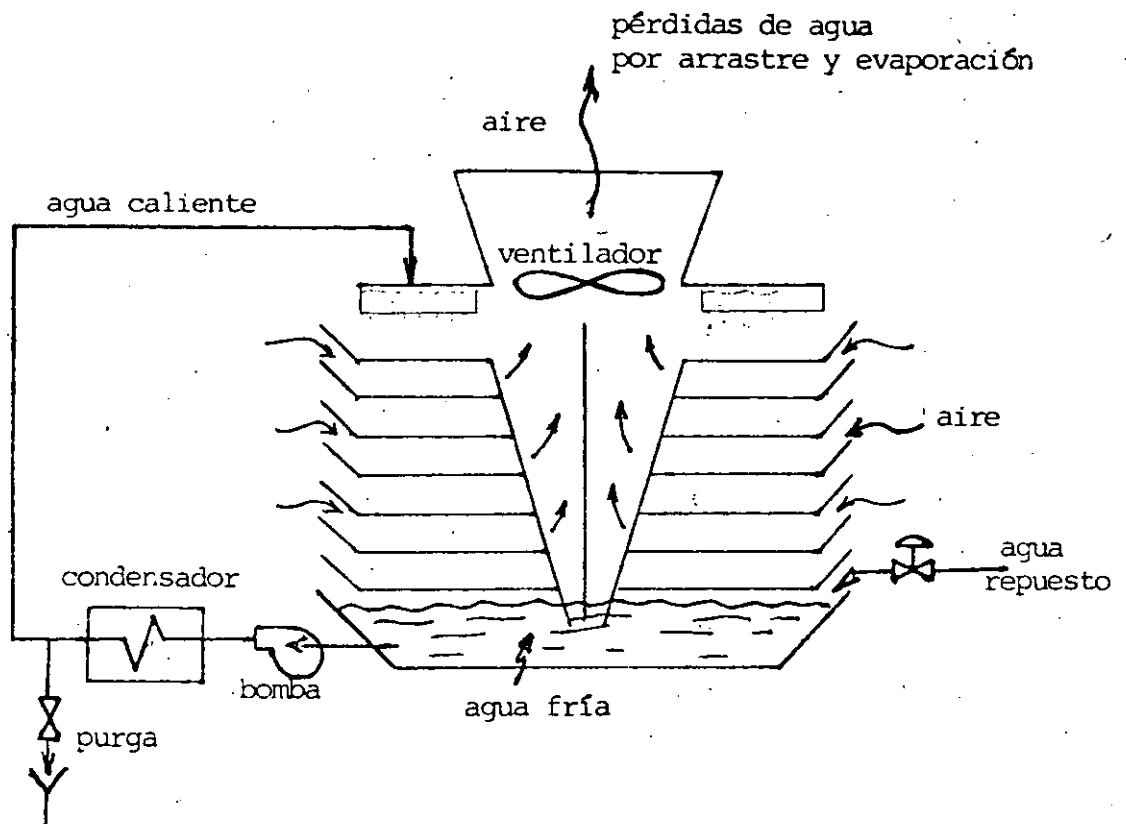
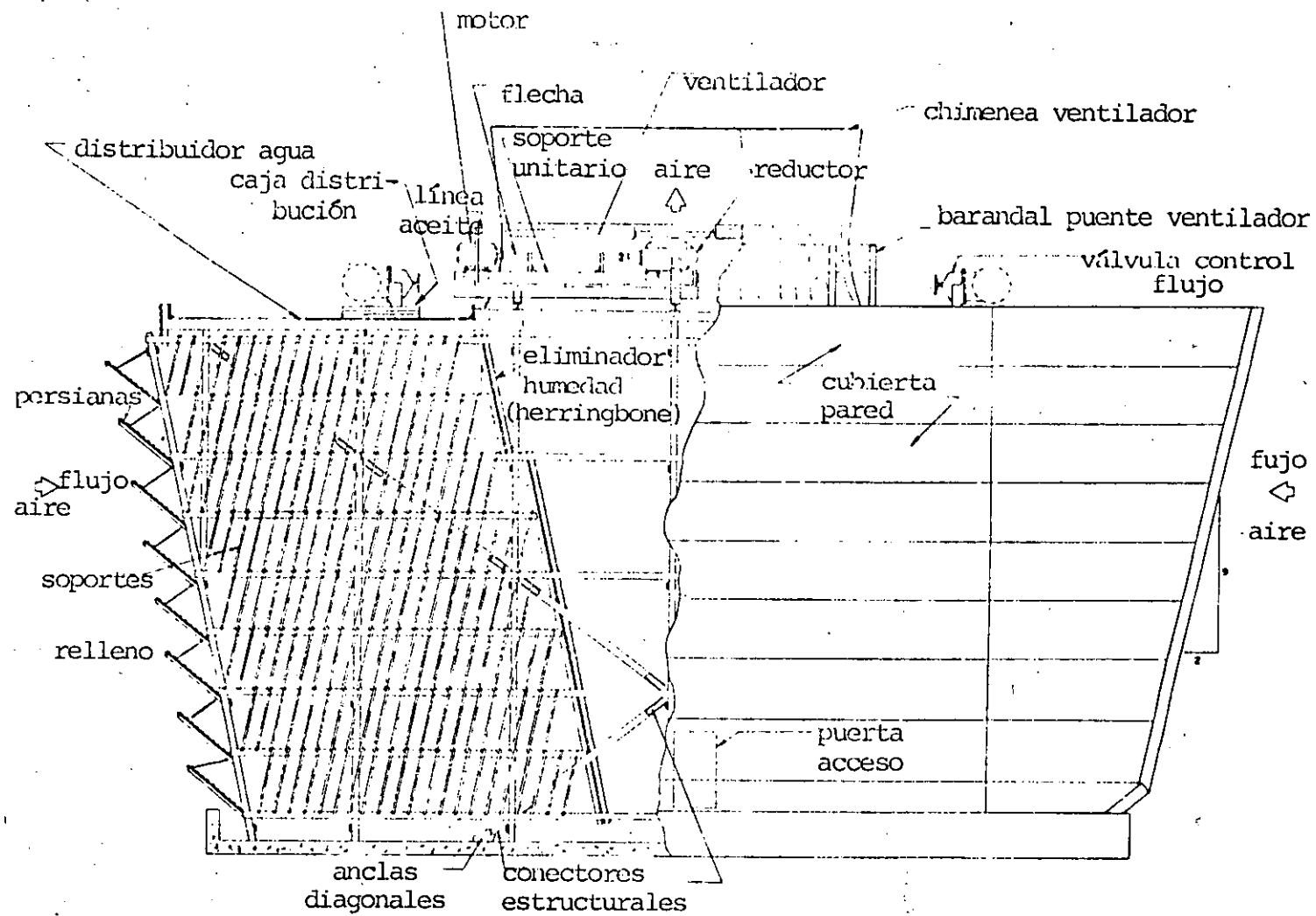


FIG. 5 .- BALANCE DE MASA Y CALOR EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO



20

FIG. 6 .- SECCION TRANSVERSAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE FLUJO CRUZADO Y SALPICADO

3.- EL PROCESO TERMODINAMICO EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Debido a que, en una torre de enfriamiento la transferencia de calor del agua, se hace hacia el aire atmosférico o atmósfera, en el ANEXO I se incluyen los principios de Psicrometría, que es la rama de la Física que relaciona las mediciones y las determinaciones de las condiciones atmosféricas. Este conocimiento es muy importante para comprender mejor el proceso termodinámico en una torre de enfriamiento.

El régimen de transferencia de calor en una torre de enfriamiento es igual al producto de un coeficiente de transferencia K por el área de transferencia de calor A en el volumen de la torre y multiplicados por la fuerza impulsora que, en este caso, es la diferencia de entalpia Δi entre el aire de entrada y el aire de salida.

Si se desprecian las pérdidas por evaporación en el agua, que tienen un valor entre 1 y 2% del flujo total, puede escribirse la siguiente ecuación de balance térmico:

$$W_L c_L \Delta T = W_g \Delta i$$

en donde:

W_L = flujo de líquido o agua

C_L = calor específico del agua

ΔT = diferencia de temperatura entre el agua de entrada y el agua de salida

W_g = flujo del aire

Δi = diferencia de entalpia entre el aire de salida y el aire de entrada a la torre

Si se considera que en términos generales c_L tiene un valor igual a la unidad, se tiene lo siguiente:

$$W_L \Delta T = W_g \Delta i$$

de donde,
$$\Delta i = \frac{W_L}{W_g} \Delta T$$

y haciendo $W_L/W_g = \lambda$, se tiene: $\Delta i = \lambda \Delta T$

En las siguientes ecuaciones los índices 2 se refieren a la entrada tanto del agua, como del aire y los índices 1 a la salida en ambos casos, haciéndose además las siguientes simplificaciones:

- se desprecia la aportación del calor sensible al vapor en la elevación de la entalpia del aire.
- se desprecia el calor que cede el aire al vapor que se condensa en la parte superior de la torre.
- se admite como universalmente válida la hipótesis de Lewis de que $\frac{\sqrt{c_p}}{\alpha} = 1$, que es sólo un

caso particular.

El régimen de transferencia de calor $W_L \Delta T$, expresado analíticamente en función del coeficiente de transferencia, el área de transferencia y la fuerza impulsora, queda en la siguiente forma:

$$W_L \Delta T = KA (i' - i_m)$$

en donde:

K = coeficiente de transferencia de calor total, en función de un coeficiente de cambio de sustancia y el coeficiente de convección de la superficie del agua al interior de la masa de aire.

A = área de transferencia = aZ

a = área de una sección de transferencia

Z = altura de volumen de transferencia

$(i' - i_m)$ = fuerza impulsora equivalente a la diferencia media de entalpia.

En la Fig. 7 se muestra un diagrama de temperatura entalpia del aire en una torre de enfriamiento, representando la línea de equilibrio las condi-

ciones de la película de aire que rodea al agua en la torre de enfriamiento y la línea de operación (con pendiente igual a W_L/W_g), las condiciones del aire que está inmediatamente después de la película de aire saturado representado por la línea de equilibrio; $T_2 - T_1 = \Delta T$.-

ΔT es el rango de enfriamiento. El punto A representa la temperatura de entrada del agua, el punto B la temperatura de salida del agua, el punto C las condiciones de entrada del aire y el punto D las condiciones de salida del aire de enfriamiento. La línea CC' representa la diferencia entre el aire de entrada y la temperatura de salida del agua y la línea DD' la diferencia entre el aire de salida y la temperatura de entrada del agua.

La diferencia media de entalpia entre la línea de equilibrio y la línea de operación en el área ABC'D' de la Fig. 7, representa la fuerza impulsora del aire de enfriamiento; de acuerdo con el diagrama de dicha figura se tienen los siguientes valores:

$$i_m = i_2 + \frac{\Delta i}{2}$$

pero como $\Delta i = \frac{W_L}{W_g} \Delta T$, entonces:

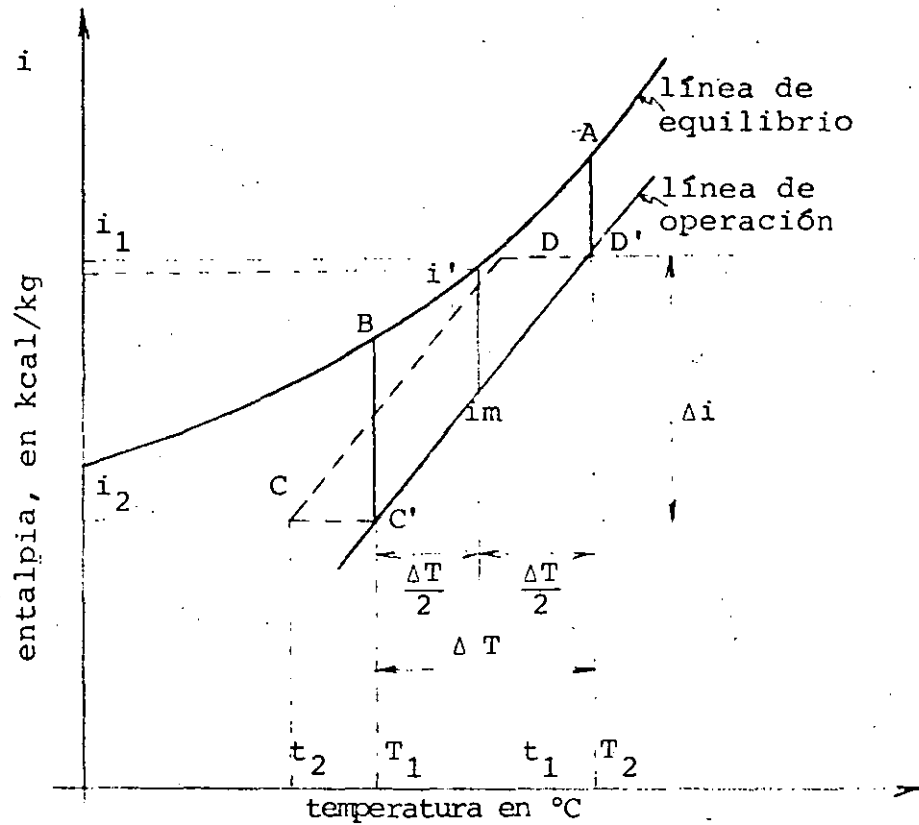


Fig. 7.- DIAGRAMA DE TEMPERATURA-ENTALPIA DEL AIRE EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

$$i_m = i_2 + \frac{W_L}{2W_g} \Delta T$$

y el régimen de transferencia de calor:

$$W_L \Delta T = K a Z \left(i' - i_2 - \frac{W_L}{2W_g} \Delta T \right)$$

de donde se obtiene:

$$\frac{W_L}{K a Z} + \frac{W_L}{2W_g} = \frac{i' - i_2}{\Delta T}$$

El segundo término de la ecuación se conoce como coeficiente de enfriamiento de Merkel α , el cual depende únicamente de la temperatura de entrada y salida del agua, así como de las condiciones de entrada del aire de enfriamiento.

FUNCIONAMIENTO

En la operación de torres de enfriamiento de las PTE, el agua del condensador se pasa a lo alto de la torre de enfriamiento a las válvulas de control de flujo desde donde pasa a los distribuidores de agua (o bien, directamente a éstos); de los distribuidores de agua, el agua pasa (normalmente por gravedad) y desciende uniformemente al relleno, en donde entra en contacto íntimo con el aire (ascendente) hasta llegar al fondo de la torre en donde se encuentra la pileta o depósito de almacenamiento de agua. De la pileta, el agua es regresada al condensador repitiéndose el ciclo.

El aire que entra a los lados por las persianas, cruza y pasa hacia arriba por el interior del relleno enfriando el agua y antes de salir de la torre, pasa a través de eliminadores de llovizna en donde la neblina que arrastra se reduce al mínimo; el aire y el agua pasan a contra-flujo en tal forma que el aire antes de salir de la torre se encuentra en contacto con el agua más caliente.

Para el arranque de la torre de enfriamiento deberá llenarse la pileta de agua fría, por medio de la válvula de agua de repuesto, y el sistema de agua de circulación hasta que se alcance el nivel correc

to de operación. En seguida deben abrirse completamente las válvulas de control de flujo de agua caliente (en la parte superior de la torre), válvulas de entrada y salida del condensador y después arrancar las bombas de agua de circulación, con las válvulas de descarga cerradas que se abren después lentamente para evitar vibraciones y choques al ponerlas en línea repentinamente, ajustando las válvulas de control de flujo para igualar al flujo de agua-caliente en cada parte de la torre; después de lo anterior se arrancan los ventiladores de aire. Durante las primeras semanas de operación de una torre de enfriamiento nueva, o después de un mantenimiento mayor, deberán limpiarse varias veces las rejillas del cárcamo de bombeo de agua fría y posteriormente, deberá limpiarse semanalmente con mayor frecuencia en caso necesario.

Antes de arrancar un ventilador, deberá verse que las aspas estén ajustadas al ángulo correcto de ataque, operándose durante más o menos una hora para calentar el lubricante del reductor de velocidad y verificar el voltaje y corriente del motor con objeto de compararlas con los valores de placa. Si la torre no tiene todo el flujo de agua y la carga de calor, es probable que el amperaje sea mayor que el nominal, pero si se excede del 10%, deberá investigarse y corregirse la causa. La torre deberá mantenerse limpia y el sistema de distribución de agua

uniforme, con objeto de obtener en forma continua la máxima capacidad de enfriamiento, no permitiendo que se formen excesivos depósitos o algas en los eliminadores de humedad y relleno; las toberas deben conservarse libres de basuras para asegurar una distribución y enfriamiento correcto de agua.

La capacidad de una torre para enfriar agua a una determinada temperatura varía, como se ha visto en Capítulos anteriores, con la temperatura de bulbo húmedo y con la carga de calor en la torre; cuando la temperatura de bulbo húmedo baja, la temperatura de agua fría también baja, pero esta no tanto como lo hace la temperatura de bulbo húmedo. Una torre de enfriamiento no controla la carga de calor, sino que la cantidad de agua de circulación determina el rango de enfriamiento para una determinada carga de calor; las temperaturas de agua fría y agua caliente aumentan con las cargas altas de calor.

La profundidad normal del agua desde la parte superior del muro de la pileta, al nivel del agua, en una pileta de madera, es de 12 a 20 cms. y en una pileta de concreto es de 20 a 40 cms, debiéndose ajustar el suministro de agua de repuesto para mantener este nivel de agua, ya que profundidades más bajas de operación de agua requieren mamparas de aire, bajo el relleno, para evitar derivaciones de ai re, pero al mismo tiempo se deberá mantener suficien

te altura de agua para evitar cavitación en las bombas de agua de circulación.

Si se utilizan motores de dos velocidades, se debe permitir un retraso de tiempo de más o menos 20 s después de desenergizar el embobinado de alta velocidad y antes de energizar el embobinado de baja velocidad, debido a que tienen lugar grandes esfuerzos en la maquinaria de transmisión y el motor, a menos que se permita que el motor baje su velocidad lentamente antes de energizar el embobinado de baja velocidad. Cuando se cambie de dirección de rotación al ventilador, se deberá permitir un mínimo de dos minutos de retraso de tiempo antes de energizar nuevamente el motor del ventilador.

Durante períodos de operación a baja temperatura (0°C o menores) se forma hielo en las partes relativamente secas de la torre que están en contacto con el aire de entrada, como por ejemplo las persianas y los marcos estructurales adyacentes. Las características de la formación de hielo en una determinada torre varían con la velocidad y dirección del viento, flujo de agua de circulación y carga de calor. La formación de hielo puede controlarse recurriendo al control de los flujos de aire y agua en la torre, parando periódicamente el ventilador, usando la velocidad baja de los motores (cuando se tienen) o bajo condiciones extremas de frío girando el

ventilador en rotación inversa que no deberá exceder de 15 a 20 minutos.

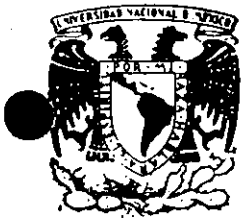
En la operación de torres de enfriamiento el papel del tratamiento del agua es un factor económico muy importante, ya que el mantenimiento del equipo, su eficiente operación y el ahorro de agua dependen, en gran medida, de dicho tratamiento.

Las torres de enfriamiento se diseñan para enfriar agua que se circula a través de ella; el enfriamiento se logra evaporando una parte del agua circulada, lo cual baja la temperatura del agua que permanece en el circuito pero las sales minerales disueltas, que se encuentran presentes en todas las fuentes de agua, permanecen disueltas en el agua de circulación y aumentan su concentración. También durante el paso a través de la torre de enfriamiento el agua pierde en la atmósfera CO_2 (ácido carbónico), lo cual causa que el agua de circulación se vuelva más alcalina y que en presencia de dureza de calcio puede causar incrustación.

Los fenómenos anteriores que producen corrosión o incrustación en el sistema de agua de circulación, se controlan por medio de las siguientes técnicas :

- tratamiento externo del agua de repuesto
- tratamiento químico interno del agua de circulación.

Existen varias formas de tratamiento externo del agua de repuesto para las torres de enfriamiento, de los cuales se incluyen ejemplos de suavización con zeolita y suavización en frío con cal; el costo de estos tratamientos puede calcularse a partir del consumo de sustancias químicas.



DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

CURSOS ABIERTOS

TORRES DE ENFRIAMIENTO

PSICROMETRIA

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

MAYO 1992.

III.- PSICROMETRIA

Debido a que, en una torre de enfriamiento, la transferencia de calor del agua se hace hacia el aire atmosférico o atmósfera, se requiere tener un conocimiento adecuado del comportamiento y características del aire atmosférico; la psicrometría es la rama de la física que relaciona las mediciones y las determinaciones de las condiciones atmosféricas, en particular, lo relacionado con la humedad del aire.

La atmósfera está compuesta por una mezcla de aire y vapor de agua. La composición volumétrica del aire, al nivel del mar, es la siguiente :

Nitrógeno	78.09% (peso molecular 28)
Oxígeno	20.95% (peso molecular 32)
CO ₂	.03% (peso molecular 44)
Neón	.0018 (peso molecular 20)
Helio	.00524 (peso molecular 4)
Hidrógeno	.00005 (peso molecular 2)
Kenón	.000008 (peso molecular 131)

Para el aire atmosférico es aplicable la ley de Dalton; de presiones parciales para la mezcla y de los gases perfectos para cada elemento constitutivo.

Desde el punto de vista técnico, en el estudio de las torres de enfriamiento, las medidas del aire húmedo más importantes, son las siguientes :

- a) temperatura
- b) presión
- c) humedad
- d) volumen
- e) densidad
- f) calor específico
- g) entalpia.

a) temperatura del aire.- Se distinguen tres temperaturas del aire que son importantes desde el punto de vista técnico :

- temperatura de termómetro seco, t_s
- temperatura de termómetro húmedo, t_h
- temperatura de rocío, t_r

La temperatura de termómetro seco es la temperatura del aire medida con un termómetro cuyo bulbo esté seco, medida en °C

La temperatura de termómetro húmedo es la temperatura del aire medida con un termómetro cuyo bulbo

esté humedecido con un trapo de lino o gasa empapado con agua, medido en °C; si no se suministra calor, la evaporación adiabática del agua en el aire hace descender la temperatura del termómetro hasta una temperatura dinámica de equilibrio de una superficie de agua, cuando el calor sensible proporcionado por el aire es igual al calor latente llevado por la evaporación del agua en el aire. Para una medición más real, se requiere que el aire sople sobre el bulbo y el trapo, a una velocidad de 4.5 m/s.

Temperatura de rocío, es la temperatura por debajo de la cual el vapor de agua contenido en el aire empieza a condensarse, medida también en °C.

Las tres temperaturas anteriores son diferentes excepto para aire con 100% de humedad en que las tres son iguales.

b) Presión del Aire.- Se distinguen tres presiones importantes del aire, desde el punto de vista técnico :

- presión barométrica, p_B
- presión parcial real del vapor de agua del aire, p_v
- presión parcial máxima de saturación del vapor de agua en el aire, p_{sm}

La presión barométrica p_B , medida en mm de Hg o en kg/cm^2 , es la presión atmosférica del lugar y corresponde a la suma de la presión parcial del vapor de agua más la presión del aire seco.

La presión parcial real del vapor de agua en el aire p_v , en mm de Hg, es la presión de saturación correspondiente a la temperatura de rocío del aire; cuando el aire no está saturado con vapor de agua, es decir, que contiene menos del 100% de humedad posible, el vapor de agua se encuentra sobrecalentado y la presión es una parte de la presión atmosférica. La presión parcial real del vapor de agua en la mezcla con aire puede calcularse de acuerdo con la siguiente ecuación :

$$p_v = p_{sh} - \frac{p_B (t_s - t_h)}{1500}$$

en donde :

p_{sh} = presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo, en mm de Hg. (Tabla 6.01)

p_B = presión barométrica del lugar, en mm de Hg

t_s = temperatura de bulbo seco, en °C

t_h = temperatura de bulbo húmedo, en °C

La presión parcial máxima posible del vapor de

TABLA 6.01.-PRESIONES DE SATURACION DEL VAPOR DE AGUA

t, °C	p, en mm de Hg	t, °C	p, en mm de Hg	t, °C	p, en mm de Hg	t, °C	p, en mm de Hg
- 30	0.285	- 10	1.948	10	9.21	30	31.81
- 29	0.315	- 9	2.13	11	9.85	31	33.69
- 28	0.351	- 8	2.33	12	10.51	32	35.65
- 27	0.386	- 7	2.54	13	11.23	33	37.72
- 26	0.429	- 6	2.77	14	11.98	34	39.89
- 25	0.475	- 5	3.01	15	12.78	35	42.17
- 24	0.523	- 4	3.27	16	13.63	36	44.55
- 23	0.579	- 3	3.58	17	14.52	37	47.06
- 22	0.640	- 2	3.89	18	15.47	38	49.69
- 21	0.704	- 1	4.22	19	16.47	39	52.44
- 20	0.775	0	4.57	20	17.53	40	55.31
- 19	0.853	1	4.92	21	18.64	41	58.33
- 18	0.935	2	5.29	22	19.82	42	61.49
- 17	1.029	3	5.68	23	21.06	43	64.80
- 16	1.133	4	6.10	24	22.37	44	68.25
- 15	1.242	5	6.54	25	23.75	45	71.87
- 14	1.359	6	7.02	26	25.20	46	75.6
- 13	1.488	7	7.52	27	26.73	47	79.60
- 12	1.623	8	8.05	28	28.34	48	83.72
- 11	1.783	9	8.62	29	30.03	49	88.03

agua en la mezcla con aire es la presión máxima de saturación p_{sm} , a la temperatura t_s , cuando la temperatura es menor de 100°C ; para temperaturas mayores de 100°C la presión máxima de saturación es igual a la presión barométrica.

Las presiones de saturación del vapor de agua para las temperaturas normales de trabajo en las torres de enfriamiento se encuentran en la Tabla 6.01.

c) Humedad del aire. - Desde el punto de vista técnico existen tres valores de humedad que son importantes en el diseño de torres de enfriamiento.

- humedad relativa, h_r
- humedad absoluta, h_a
- humedad específica, h_e

La humedad relativa se define como la relación entre el peso de vapor de agua contenido en un m^3 de aire húmedo y el peso de vapor de agua necesario para saturar este volumen de aire a la misma temperatura y presión.

Considerando las leyes de Dalton y la de los gases perfectos, la humedad relativa del aire puede también definirse como la relación entre la presión parcial real del vapor de agua en el ai-

re húmedo y la presión parcial máxima posible para una temperatura dada, en la siguiente forma :

$$h_r = \frac{p_v}{p_{sm}}$$

La humedad relativa no es una medida realmente física del aire atmosférico, sino más bien indica el grado en que puede ser aumentada la humedad en el aire.

La humedad absoluta es el peso de vapor de agua contenido en un m³ de aire húmedo.

La humedad específica h_e o contenido de humedad se define como el peso del vapor de agua en el aire con relación a 1 kg de aire seco y normalmente se mide en kg/kg. El valor numérico de la humedad específica puede calcularse utilizando la ecuación de los gases perfectos para el aire y el vapor de agua (índice v para vapor, e índice a para aire), en la siguiente forma:

Para aire :

$$p_a V = W_a R_a T$$

Para vapor :

$$p_v V = W_v R_v T$$

en donde :

$$R_a = 287 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$R_v = 461.5 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

De acuerdo con la definición de humedad específica se tiene :

$$h_e = \frac{W_v}{W_a} = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p_a}$$

Substituyendo la presión parcial del aire :

$$p_a = p_B - p_v$$

y la presión parcial real del vapor

$$p_v = h_r \times p_{sm}$$

se tiene :

$$h_e = 0.622 \frac{h_r p_{sm}}{p_B - h_r p_{sm}}$$

o bien ,

$$h_e = \frac{p_v}{1.61 (p_B - p_v)}$$

- d) Volumen específico del aire v.- El volumen de $(1+x)$ kg de aire húmedo puede determinarse considerándolo como gas perfecto (abajo del límite de saturación) de acuerdo con la siguiente ecuación :

$$V_{1+x} = R_v \left(\frac{R_a}{R_v} + x \right) \frac{T}{p_B}, \text{ en m}^3$$

$$= 461.5 (0.622 + x) \frac{T}{p_B}, \text{ en m}^3$$

para 1 kg de aire húmedo, el volumen específico será:

$$v = \frac{V_{1+x}}{1+x} = \frac{461.5 (0.622 + x)}{1 + x} \frac{T}{p_B}$$

expresando p_B en atm/m²

En la Tabla 6.02 se dan valores de propiedades del aire atmosférico, entre las que se incluye, el peso específico en kg/m³, que es el recíproco del volumen específico en m³/kg

e) Densidad del aire ρ .- Se distinguen tres densidades importantes desde el punto de vista técnico en la atmósfera o aire atmosférico :

- densidad del aire seco,
- densidad del vapor de agua,
- densidad de la mezcla.

La densidad del aire seco ρ_s , en kg/m³, puede obtenerse de acuerdo con la siguiente ecuación :

$$\rho_s = \frac{p_a}{R_a T} = \frac{(p_B - p_v)}{R_a T}, \text{ en kg/m}^3$$

La densidad del vapor de agua ρ_v , en kg/m³, puede obtenerse en la siguiente forma :

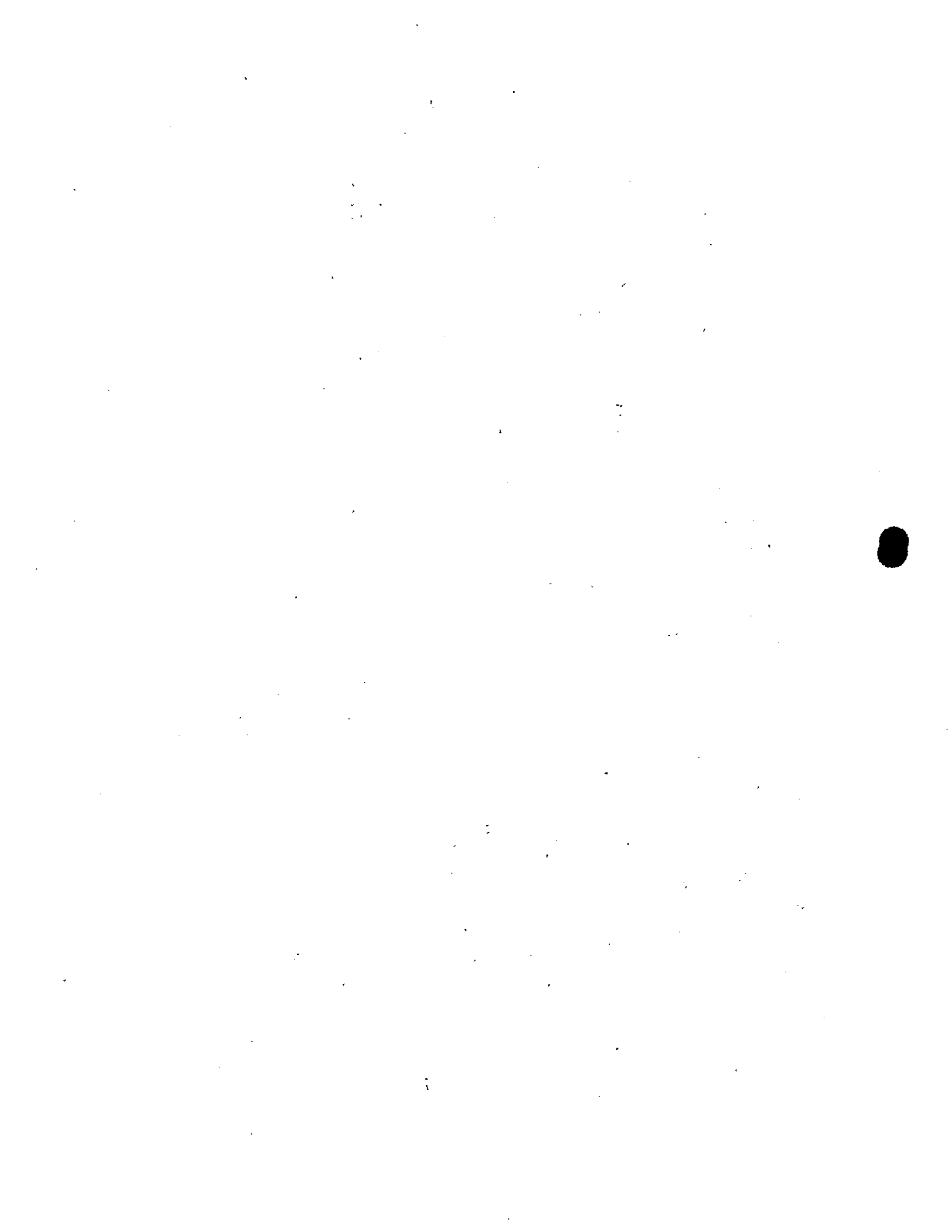


TABLA 6.02.- PROPIEDADES DEL AIRE

Temp. t °C	Presión del vapor de agua en mmHg	Contenido de agua en 10^{-3} kg/kg de aire seco	Contenido de calor en el vapor de agua saturado, en kcal/kg	Entalpia de la humedad del aire a t_h en kcal/kg de aire seco	Peso específico del aire seco, en kg/m ³	Peso específico del aire saturado en kg/m ³	Peso de aire seco por m ³ de aire saturado en kg/m ³	Peso del vapor de agua por m ³ de aire seco para aire saturado en kg/m ³
0	4.58	3.772	597.2	2.25	1.2923	1.2894	1.2845	0.0048
1	4.92	4.056	597.6	2.66	1.2876	1.2844	1.2793	0.0052
2	5.29	4.361	598.0	3.09	1.2859	1.2795	1.2740	0.0056
3	5.68	4.684	598.5	3.52	1.2782	1.2746	1.2686	0.0059
4	6.10	5.030	599.0	3.97	1.2736	1.2697	1.2634	0.0064
5	6.54	5.398	599.4	4.44	1.2691	1.2650	1.2582	0.0068
6	7.02	5.791	599.8	4.91	1.2645	1.2601	1.2528	0.0073
7	7.52	6.208	600.2	5.41	1.2600	1.2553	1.2475	0.0077
8	8.05	6.651	600.7	5.92	1.2556	1.2506	1.2423	0.0083
9	8.62	7.123	601.1	6.44	1.2511	1.2457	1.2369	0.0088
10	9.21	7.625	601.6	6.99	1.2466	1.2409	1.2315	0.0094
11	9.85	8.158	602.0	7.55	1.2423	1.2362	1.2262	0.0100
12	10.51	8.724	602.5	8.14	1.2379	1.2314	1.2208	0.0106
13	11.23	9.325	602.9	8.74	1.2336	1.2267	1.2154	0.0113
14	11.98	9.963	603.4	9.37	1.2293	1.2220	1.2099	0.0121
15	12.78	10.639	603.8	10.02	1.2250	1.2172	1.2044	0.0128
16	13.63	11.357	604.3	10.70	1.2208	1.2125	1.1989	0.0136
17	14.52	12.118	604.7	11.41	1.2166	1.2078	1.1934	0.0145
18	15.47	12.923	605.1	12.14	1.2124	1.2031	1.1877	0.0153
19	16.47	13.777	605.6	12.90	1.2082	1.1983	1.1820	0.0163
20	17.53	14.684	606.0	13.70	1.2041	1.1936	1.1763	0.0173
21	18.64	15.638	606.5	14.52	1.2000	1.1889	1.1706	0.0183
22	19.82	16.652	606.9	15.39	1.1960	1.1842	1.1648	0.0194
23	21.06	17.726	607.3	16.28	1.1919	1.1794	1.1589	0.0205
24	22.37	18.862	607.8	17.22	1.1879	1.1747	1.1529	0.0217
25	23.75	20.066	608.2	18.20	1.1839	1.1699	1.1469	0.0230
26	25.20	21.332	608.6	19.22	1.1800	1.1652	1.1409	0.0243

Temp. en °C	Presión del vapor de agua en mmHg	Contenido de agua en 10 ⁻³ kg/kg de aire seco	Contenido de calor en el vapor de agua saturado, en kcal/kg	Entalpia de la humedad del aire a t _p en kcal/kg de aire seco	Peso específico del aire seco, en kg/m ³	Peso específico del aire saturado en kg/m ³	Peso del aire seco por m ³ de aire saturado en kg/m ³	Peso del vapor de agua por m ³ de aire seco para aire saturado en kg/m ³
27	26.73	22.674	609.1	20.29	1.1760	1.1604	1.1346	0.0257
28	28.34	24.094	609.5	21.41	1.1721	1.1556	1.1284	0.0272
29	30.03	25.591	610.0	22.57	1.1683	1.1508	1.1221	0.0287
30	31.81	27.174	610.4	23.79	1.1644	1.1460	1.1157	0.0303
31	33.69	28.85	610.8	25.06	1.1606	1.1412	1.1092	0.0320
32	35.65	30.62	611.3	26.40	1.1568	1.1363	1.1025	0.0338
33	37.72	32.48	611.7	27.79	1.1530	1.1314	1.0958	0.0356
34	39.89	34.46	612.1	29.25	1.1492	1.1264	1.0889	0.0375
35	42.17	36.54	612.5	30.78	1.1455	1.1215	1.0819	0.0395
36	44.55	38.73	613.0	32.48	1.1418	1.1165	1.0749	0.0416
37	47.06	41.06	613.4	34.07	1.1381	1.1115	1.0676	0.0438
38	49.69	43.51	613.9	35.83	1.1345	1.1065	1.0603	0.0461
39	52.44	46.10	614.3	37.68	1.1308	1.1013	1.0528	0.0485
40	55.31	48.82	614.7	39.61	1.1272	1.0962	1.0452	0.0510
41	58.33	51.71	615.2	41.65	1.1236	1.0910	1.0374	0.0536
42	61.49	54.76	615.6	43.79	1.1201	1.0858	1.0295	0.0564
43	64.80	57.97	616.0	46.03	1.1165	1.0805	1.0213	0.0592
44	68.25	61.37	616.4	48.39	1.1130	1.0752	1.0130	0.0622
45	71.87	64.96	616.8	50.87	1.1095	1.0698	1.0046	0.0653
46	75.65	68.75	617.2	53.47	1.1060	1.0644	0.9959	0.0685
47	79.60	72.76	617.7	56.22	1.1026	1.0589	0.9871	0.0717
48	83.72	77.00	618.1	59.12	1.0991	1.0533	0.9780	0.0753
49	88.03	81.48	618.5	62.16	1.0957	1.0477	0.9688	0.0789
50	92.52	86.21	619.0	65.37	1.0923	1.0420	0.9593	0.0827
51	97.21	91.23	619.4	68.75	1.0890	1.0363	0.9497	0.0866
52	102.10	96.53	619.8	72.31	1.0856	1.0305	0.9398	0.0907
53	107.21	102.15	620.2	76.07	1.0823	1.0246	0.9296	0.0950
54	112.53	108.09	620.6	80.04	1.0790	1.0186	0.9192	0.0994

126

Temp. en °C	Presión del vapor de agua en mmHg	Contenido de agua en 10^{-3} kg/kg de aire seco	Contenido de calor en el vapor de agua saturado, en kcal/kg	Entalpia de la humedad del aire a t_h en kcal/kg de aire seco	Peso específico del aire seco, en kg/m ³	Peso específico del aire saturado en kg/m ³	Peso del aire seco por m ³ de aire saturado en kg/m ³	Peso del vapor de agua por m ³ de aire seco para aire saturado en kg/m ³
55	118.07	114.40	621.0	84.24	1.0757	1.0125	0.9086	0.1039
56	123.83	121.07	621.5	88.69	1.0724	1.0063	0.8977	0.1087
57	129.85	128.17	621.9	93.39	1.0692	1.0001	0.8865	0.1136
58	136.11	135.69	622.3	98.36	1.0659	0.9937	0.8750	0.1187
59	142.63	143.69	622.7	103.64	1.0627	0.9873	0.8633	0.1240
60	149.39	152.2	623.2	109.24	1.0595	0.9808	0.8512	0.1295
61	156.45	161.2	623.6	115.2	1.0564	0.9742	0.8389	0.1353
62	163.81	170.9	624.0	121.5	1.0532	0.9674	0.8262	0.1412
63	171.39	181.1	624.4	128.2	1.0501	0.9606	0.8133	0.1473
64	179.33	192.1	624.8	135.4	1.0470	0.9536	0.8000	0.1537
65	187.57	203.8	625.2	143.0	1.0439	0.9465	0.7863	0.1602
66	196.10	216.3	625.6	151.2	1.0408	0.9393	0.7722	0.1670
67	205.00	229.7	626.0	159.9	1.0377	0.9319	0.7578	0.1741
68	214.20	244.1	626.4	169.2	1.0347	0.9245	0.7431	0.1814
69	223.76	259.5	626.9	179.2	1.0317	0.9169	0.7280	0.1889
70	233.69	276.2	627.3	190.1	1.0287	0.9091	0.7124	0.1967
71	243.99	294.1	627.7	201.7	1.0257	0.9012	0.6964	0.2048
72	254.73	313.6	628.1	214.3	1.0227	0.8931	0.6799	0.2132
73	265.76	334.5	628.5	227.8	1.0198	0.8850	0.6632	0.2218
74	277.23	357.2	628.9	242.4	1.0168	0.8766	0.6459	0.2307
75	289.15	382.0	629.3	258.4	1.0139	0.8681	0.6282	0.2399
76	301.43	408.9	629.7	275.7	1.0110	0.8594	0.6100	0.2494
77	314.23	438.5	630.1	294.8	1.0081	0.8505	0.5913	0.2591
78	327.40	470.7	630.5	315.5	1.0052	0.8415	0.5722	0.2693
79	341.08	506.4	630.9	338.5	1.0024	0.8323	0.5525	0.2798
80	355.20	545.8	631.3	363.8	0.9995	0.8229	0.5323	0.2906

$$\rho_v = \frac{p_v}{R_v T} \quad , \text{ en kg/m}^3$$

$$= \rho_a h_e$$

La densidad de la mezcla de aire húmedo ρ_m , puede obtenerse en la siguiente forma :

$$\rho_m = \frac{\rho_a + \rho_v}{1+x} \quad , \text{ en kg/m}^3$$

Substituyendo el valor del volumen específico v , se tiene :

$$\rho_m = \frac{1}{(1+x) T} \left[\frac{p_B}{R_a} - \left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_v} \right) p_v \right]$$

y en forma aproximada :

$$\rho_m = \rho_a + \rho_v = \rho_a + \rho_a h_e = \frac{p_B - 0.38 p_v}{R_a T} \quad , \text{ en kg/m}^3$$

En la Tabla 6.02 se dan los valores de las densidades del aire, usuales en el cálculo de torres de enfriamiento.

f) Calor específico a presión constante c_p .- También en este caso, se tienen tres calores específicos importantes :

- calor específico del aire seco, c_{ps}
- calor específico del vapor de agua, c_{pv}
- calor específico del aire húmedo, c_{pm}

El calor específico a presión constante del aire

seco c_{ps} , entre 0° y $t^\circ\text{C}$, puede calcularse de acuerdo con la siguiente relación aproximada :

$$c_{ps} \Big|_0^t = 1.005 + 1.35 \times 10^{-8} (t + 30)^2, \text{ en kJ/kg } ^\circ\text{K}$$

para temperaturas entre 0° y 50°C puede utilizarse el siguiente valor aproximado constante :

$$c_{ps} = 1.006 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{K} \quad (0.2413 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C})$$

El calor específico a presión constante del vapor de agua c_{pv} , puede calcularse en la siguiente forma :

$$c_{pv} \Big|_0^t = 1.8584 + 0.00940 \left(\frac{t}{100}\right) + 0.00373 \left(\frac{t}{100}\right)^2, \text{ en kJ/kg } ^\circ\text{K}$$

para temperaturas entre 0° y 75°C en cálculos normales, puede utilizarse el siguiente valor:

$$c_{pv} = 1.863 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{K} \quad (0.445 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C})$$

El calor específico a presión constante del aire húmedo c_{pm} , es el siguiente :

$$c_{pm} = (1-x) c_{ps} + x c_{pv}, \text{ en kJ/kg } ^\circ\text{K} \quad (\delta \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C})$$

g) Entalpía del aire I. - En el aire atmosférico se tienen tres entalpías importantes desde el punto de vista técnico :

- entalpía del aire seco, i_s
- entalpía del vapor de agua, i_v

La entalpia de la mezcla formada por 1 kg de aire seco y x kg de vapor de agua a la temperatura t_s , es la siguiente :

$$I_{1+x} = i_s + i_v = c_{ps} t_s + x (c_{pv} t_s + c.l.v.)$$

en donde c.l.v. es el calor latente de vaporización del agua.

Como en muchos diagramas se tiene la entalpia del aire I_{1+x} , es decir, de $(1+x)$ kg, en lugar de 1 kg, entonces :

$$I_{1+x} = 1.006 t_s + x (2500 + 1.863 t_s), \text{ en kJ}/(1+x) \text{ kg}$$

o bien,

$$I_{1+x} = 0.240 t_s + x (597 + 0.445 t_s), \text{ en kcal}/(1+x) \text{ kg.}$$

Cuando el contenido de humedad X , es mayor que x_s correspondiente a la de saturación, se tiene:

$$I_{1+x} = 1.006 t_s + x_s (2500 + 1.863 t_s) + 4.19 (x - x_s) t_s$$

o bien,

$$I_{1+x} = 0.240 t_s + x_s (597 + 0.445 t_s) + 1.00 (x - x_s)$$

DIAGRAMAS PSICROMETRICOS

Con las mediciones y ecuaciones anteriores, pueden determinarse todas las características importantes,

desde el punto de vista técnico, del aire, sin embargo, cuando se trata de cálculos frecuentes por ejemplo en aire acondicionado es más fácil utilizar diagramas en donde mediante el conocimiento de dos variables se pueden determinar las demás características del aire, que sigue leyes constantes. Estos diagramas se conocen con el nombre de Diagramas Psicrométricos, pero tienen la desventaja de que se construyen para una determinada presión y la conversión a otras presiones no es sencilla.

Los diagramas psicrométricos más usuales son :

- diagrama Carrier
- diagrama de Mollier

En el primero, mostrado en la Fig. 6.01, las principales coordenadas son la temperatura de bulbo seco y la humedad específica ($t_s - h_e$) y en el segundo, la entalpía y la humedad específica ($I - h_e$) con los ejes de las ordenadas inclinadas un cierto ángulo para obtener una distribución conveniente de las líneas de humedad relativa (h_r) = constante. El diagrama de Mollier se muestra en la Fig. 6.02 y tanto éste como el Carrier, se construyen usualmente para una presión barométrica de 760 mm de Hg.

DATOS CLIMATOLÓGICOS

Los principales datos climatológicos que se requieren para el diseño de torres de enfriamiento, son: los

- temperatura de bulbo húmedo;
- temperatura de bulbo seco;
- velocidad y dirección del viento.

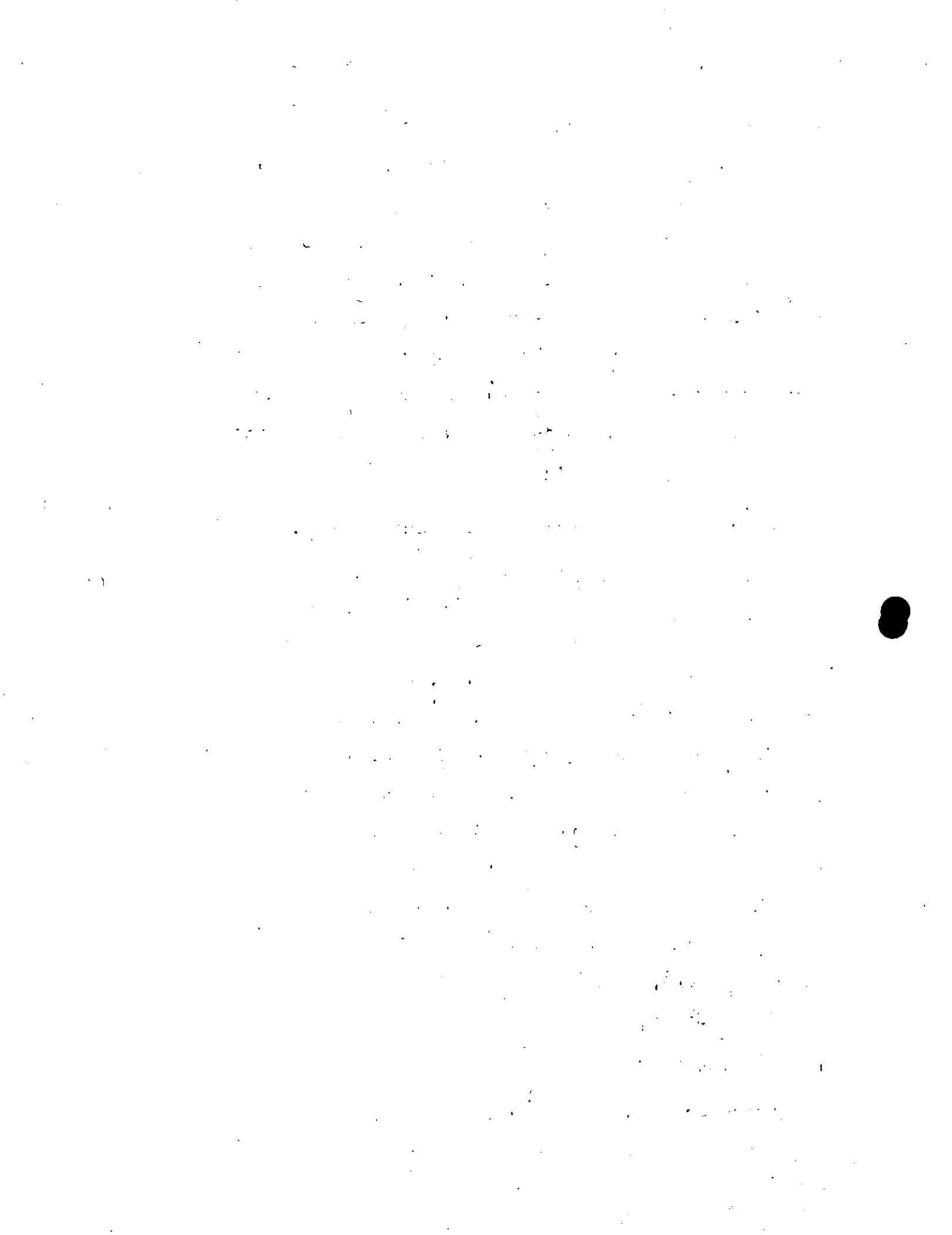
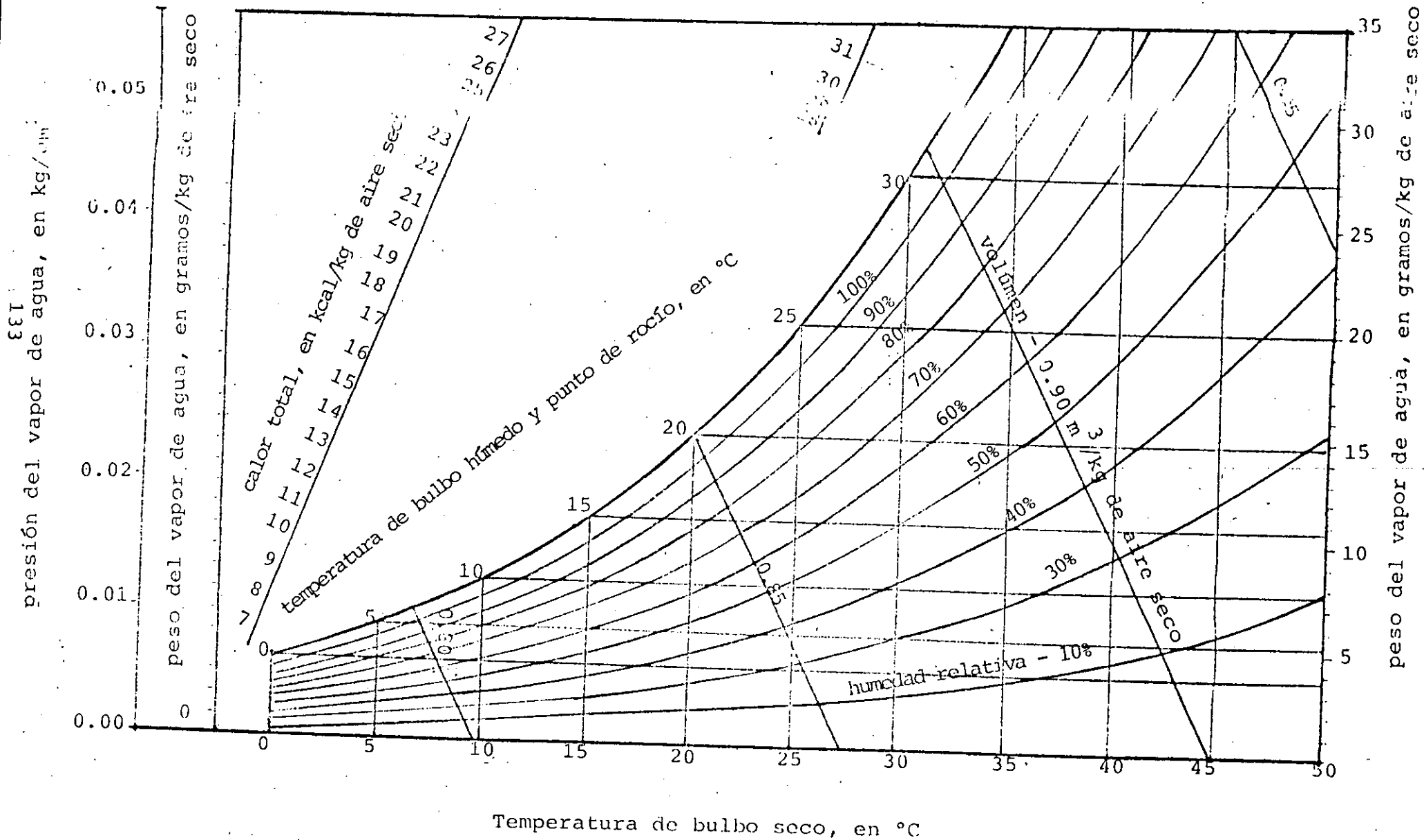


Fig. 6.01.- DIAGRAMA DE CARRIER O CAPSICOMETRICA (PARA 760 mm DE HG. DE PRE N BAROMETRICA)



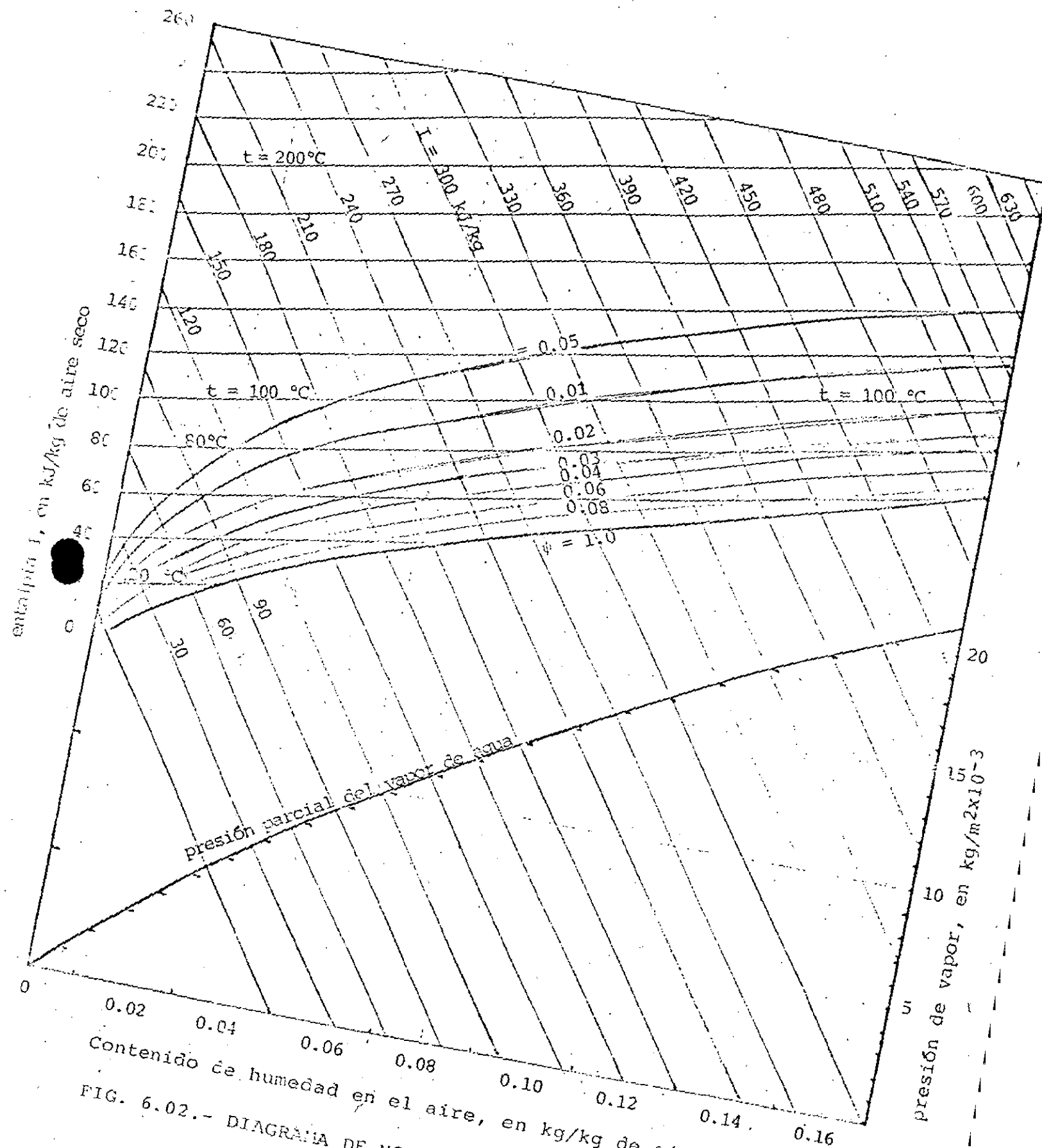


FIG. 6.02.- DIAGRAMA DE MOLLIER (I-X) PARA AIRE HUMEDO

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Los sistemas de enfriamiento evaporativo o circuitos cerrados, pueden clasificarse en la siguiente forma :

- estanques de enfriamiento
- piletas de enfriamiento
- torres de enfriamiento

El enfriamiento por evaporación de un líquido comprende el enfriamiento de éste por un cambio de calor y de masa que tiene lugar por contacto directo entre la superficie del líquido y el aire atmosférico

co; en este caso la disminución de la temperatura del líquido se produce cediendo calor por contacto y por evaporación del líquido.

El papel predominante en el enfriamiento del agua que juega la evaporación se comprende mejor si se conoce que cerca del 80 ó 90% del calor total eliminado en el agua se hace por evaporación; en temperaturas muy bajas del aire exterior, el papel de la evaporación se reduce y aumenta el calor cedido por contacto por el agua.

De acuerdo con la teoría cinética, el mecanismo de evaporación de un líquido respectivo es el siguiente: debido al movimiento térmico desordenado de las moléculas en el líquido, la velocidad de algunas moléculas se desvían mucho de los valores medios y parte de las moléculas en la superficie que poseen suficiente energía cinética para vencer la fuerza de cohesión alcanzan el medio gaseoso situado sobre la superficie del líquido; éstas moléculas chocan entre sí y con las moléculas del gas, ocasionando que parte de ellas se rechacen hacia la superficie del líquido en donde, o bien, se rechazan de nuevo, o son absorbidas por el líquido. Una parte de las moléculas desprendidas o rechazadas de la superficie del líquido penetran en seguida por difusión y

convección en el medio gaseoso y se pierden del líquido; en la evaporación del líquido las moléculas con mayor velocidad de movimiento se pierden del líquido y la energía cinética media se reduce por las moléculas despedidas, o en otras palabras, la temperatura del líquido baja. La energía que las moléculas desprendidas consumen para vencer la fuerza de cohesión y el trabajo mecánico para el aumento de volumen en la evaporación, se conoce con el nombre de calor de evaporación.

En la evaporación en el medio gaseoso, la velocidad de las moléculas de vapor que se separan de la superficie y la siguiente difusión y convección son despreciables comparados con la velocidad a la cual el líquido emite moléculas; en la capa que limita al líquido y el aire, se produce una acumulación rápida de moléculas de vapor que alcanzan la saturación y las moléculas de vapor que se separan de la superficie siguen las leyes de difusión.

Aunque la presión de vapor sobre la superficie del líquido sea algo más reducida que la presión de saturación correspondiente a la temperatura en la superficie, en forma práctica esta diferencia puede despreciarse puesto que se considera que el vapor en la superficie del líquido está saturado.

La evaporación del líquido se produce cuando la presión del vapor saturado a la temperatura de la superficie del líquido es mayor que la presión parcial del vapor en el medio ambiente, independientemente del hecho de que la temperatura del líquido sea mayor o menor que el aire sobre la superficie del líquido y de esta forma la evaporación del líquido está ligado a su enfriamiento; por la diferencia de temperatura, la transmisión de calor que se cede por contacto (conductividad y convección), puede producirse en el sentido del líquido-gas o en sentido del gas-líquido en función de cualquier medio que tenga la temperatura más alta.

Cuando la temperatura del líquido es más elevada que la del gas, el enfriamiento se produce siguiendo una acción simultánea de evaporación y cediendo calor por contacto y, en este caso, la temperatura del aire se eleva. Inversamente, cuando la temperatura del aire es más elevada, el calor cedido por contacto enfría el aire y transmite una parte del calor hacia el líquido; cuando la cantidad de este calor es más pequeña que la cantidad de calor que pierde el líquido por evaporación, el enfriamiento del líquido no se interrumpe y continúa hasta el momento cuando el flujo de calor del gas hacia el líquido (calor cedido por contacto) se hace igual a la pér-



**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.**

CURSOS ABIERTOS

TORRES DE ENFRIAMIENTO

PARTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

ING. ALBERTO PLAUCHU LIMA

MAYO 1992.

RELLENO

El principal objetivo de los rellenos en las torres de enfriamiento es el de proporcionar una superficie de contacto aumentada entre el agua y el aire, mediante un balance óptimo entre las pérdidas de

presión por fricción y la transferencia de calor, ya que existe una relación definida entre estos dos factores.

Aun cuando existen algunas ecuaciones matemáticas para relacionar los arreglos de rellenos con la fricción y la transferencia de calor, lo usual en los fabricantes es realizar pruebas con los diferentes arreglos para determinar el mejor de ellos. Los experimentos muestran que la fricción del agua que cae contribuye tanto como las pérdidas de presión estática del aire, aunque la distancia de caída de las gotas tienen muy poco efecto, y la principal contribución a las pérdidas se deben a la geometría del arreglo, es decir, a la forma y arreglo de las barras.

La forma usual para seleccionar un determinado arreglo es graficar el factor de transferencia de calor de una torre contra la caída de presión de aire que tiene lugar. La caída total de presión del sistema es la suma de las pérdidas por presión debidas al relleno y a las gotas de agua que caen; las pérdidas debidas al relleno son proporcionales a la cantidad de área expuesta incluyendo sus soportes y aproximadamente proporcionales al cuadrado del flujo de aire. Las pérdidas de presión debidas tanto a la caída del agua, como al tiempo requerido para que el agua caiga a través de la torre son proporcionales al cuadrado de la velocidad relativa entre el aire ascendente y las gotas descendentes de agua. El efecto de la geometría del relleno

no sobre las pérdidas de presión es de aproximadamente 3 ó 4 veces mayor que las causadas por las gotas descendentes cuando los rellenos tienen espacios horizontales grandes, es decir, con fricción mínima y se incrementan rápidamente cuando se alcanza flujo de película. En general puede decirse que los arreglos que causan máxima turbulencia provocan altas pérdidas.

Existen dos tipos básicos de rellenos: los de salpicado y los que no producen salpicado o de flujo de película. Para el relleno de salpicado se utilizan barras de diferentes formas y diferentes espacios con objeto de que el agua al caer y choque contra éstos, se rompa en pequeñas gotas; en el arreglo de no salpicado o de película, el agua se distribuye finamente sobre la superficie del relleno; en la Fig. 6.12 se muestran los arreglos típicos de éstos dos tipos de relleno.

El régimen de evaporación, que es la principal forma de enfriamiento de una torre, depende de los siguientes factores :

- el peso molecular del líquido
- velocidad del tiro aplicado
- saturación relativa y presión parcial de vapor, que están ligadas a la humedad del aire circulando
- superficie expuesta a la evaporación.

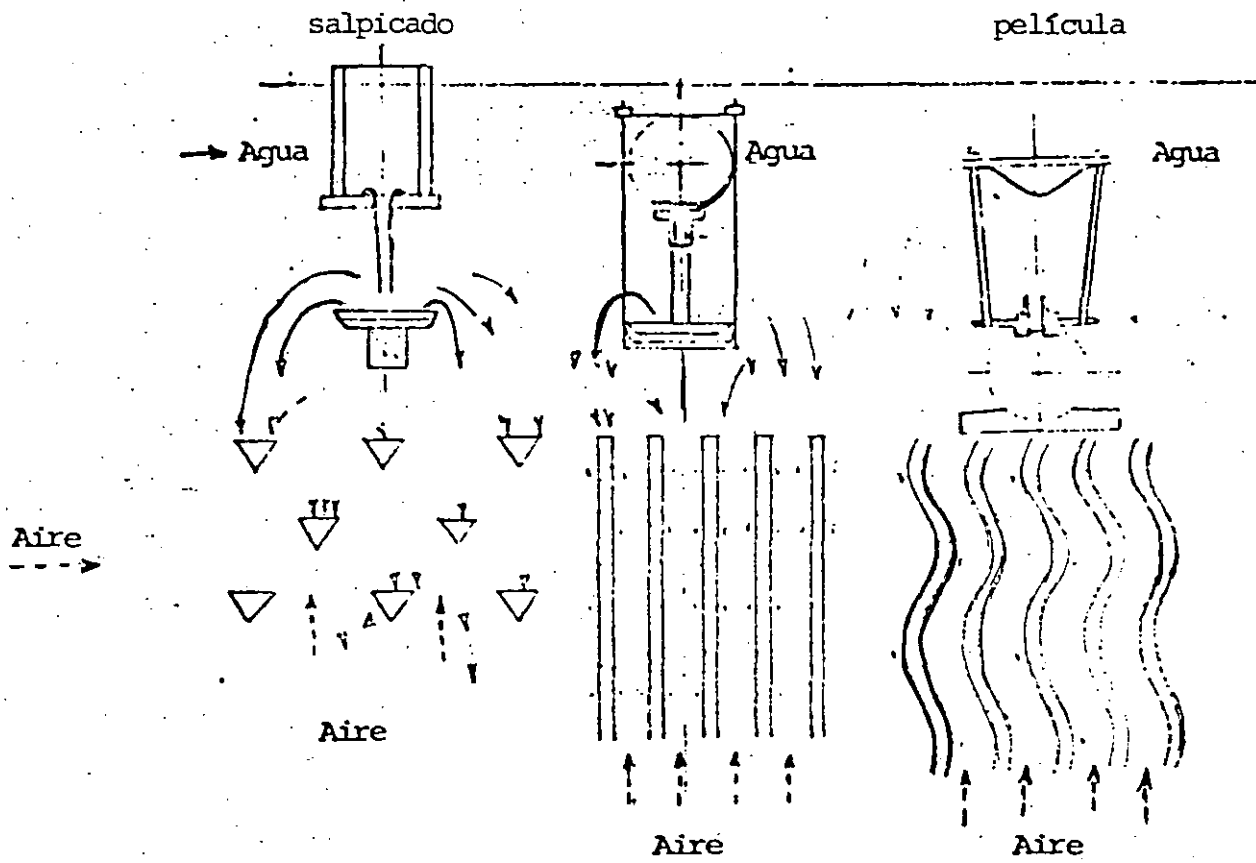


FIG. 6.12 .- SISTEMAS DE RELLENO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

- ser de material durable, de larga vida bajo las condiciones de operación de la torre.

En la Fig. 6.14, se muestra un tipo de apoyo o soportes de barras de salpicado, de plástico (poliester reforzado con vidrio).

En la Fig. 6.15, se muestran detalles estructurales de los sistemas de distribución de agua y de relleno de una torre de enfriamiento combinada de salpicado y de película; en las Figs. 6.16 y 6.17 pueden observarse arreglos de rellenos de película y salpicado, respectivamente.

El diseño económico de los rellenos de torres de enfriamiento debe relacionar los costos de capital, de operación y de mantenimiento para cada caso particular.

EQUIPOS AUXILIARES Y ACCESORIOS

De acuerdo con lo expuesto

, las torres de enfriamiento requieren, para su operación de equipos auxiliares y accesorios, entre los que se encuentran los siguientes, algunos de los cuales pueden observarse en la Fig. 6.06 :

- bombas
- ventiladores
- transmisión (flecha y reductores)

- motores
- relleno
- distribución de agua
- pileta
- estructuras
- alumbrado y comunicación
- cables
- válvulas (distribuidoras, purga)
- tratamiento de agua
- persianas de entrada
- eliminadores de humedad
- rejillas
- agua de repuesto
- sobreflujo o derrame
- seguridad
- conexiones de prueba
- caseta de control

- B O M B A S

Las bombas se utilizan para circular el agua fría desde la estructura de salida de la torre, a través del condensador principal, enfriadores de aceite, hidrógeno, cambiadores de calor, etc. y elevar el agua caliente a la parte superior de la torre desde donde se distribuye en ésta, a los rellenos, para su enfriamiento.

En general, las bombas se clasifican, de acuerdo con el mecanismo que mueve al flujo, en :

- centrífugas
- rotatorias
- alternativas

Las bombas de agua de circulación que se utilizan en las torres de enfriamiento son siempre bombas centrífugas. Las bombas centrífugas se dividen en : flujo radial, flujo mixto y flujo axial, tal como se muestra en el esquema de la Fig. 6.18

En las bombas centrífugas el flujo es constante y prácticamente no hay límites en cuanto a la potencia requerida para el flujo; la eficiencia se afecta grandemente con la relación entre el flujo y la altura de bombeo.

Las diferentes características de las bombas centrífugas pueden observarse del comportamiento de éstas y se pueden reducir a condiciones estándar.

El criterio más comunmente aplicado es el de "velocidad específica" que es la velocidad de una bomba ideal, geoméricamente similar a la bomba real, - que cuando trabaja a esta velocidad puede elevar la unidad de volumen en la unidad de tiempo, a través de una unidad de altura.

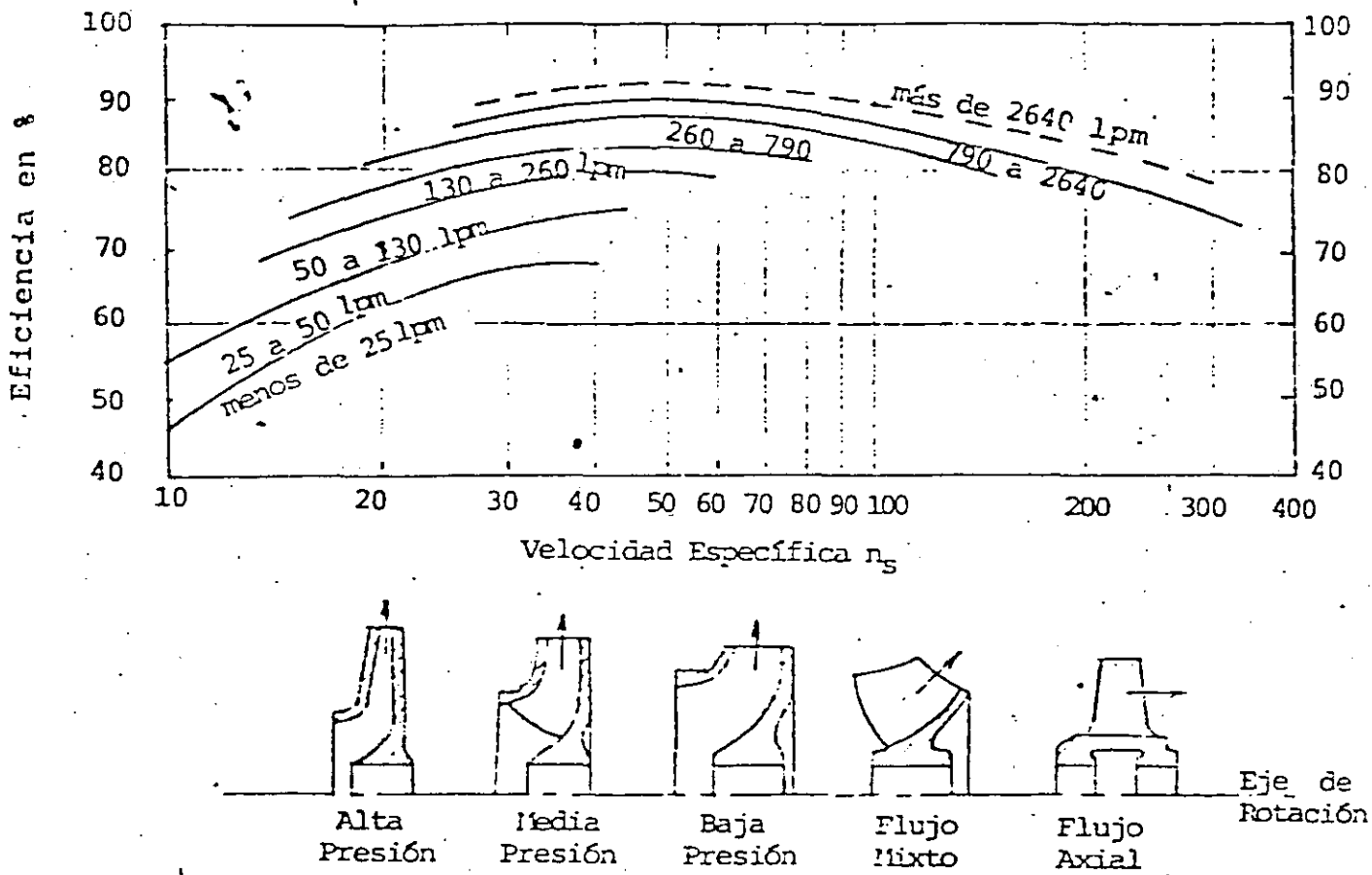


FIG. 6.18 .- RELACION ENTRE LAS FORMAS DE IMPULSOR, VELOCIDAD ESPECIFICA Y EFICIENCIA DE BOMBAS CENTRIFUGAS

Los valores de la velocidad específica n_s se derivan de los datos de la velocidad de operación, por medio de la siguiente expresión :

$$n_s = n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

en donde :

n = velocidad en rpm

Q = flujo en m^3/s

H = altura de bombeo en m

La velocidad específica no se afecta por el peso de los líquidos que están siendo manejados.

En la Fig. 6.18 se muestran las velocidades específicas de los diferentes tipos de impulsores de bombas centrífugas; en realidad no existe una línea de división real entre los varios diseños de impulsores. Para bombas centrífugas radiales eficientes, la velocidad específica no deberá ser nunca menor de 12, ni mayor de 96; cuando la velocidad específica es menor de 12 para un juego de condiciones dadas, la altura deberá ser dividida en varias etapas. En general las mejores eficiencias se obtienen para bombas con velocidades específicas entre 29 y 58.

La máxima eficiencia obtenible depende de la velocidad específica, que en general, aumenta con el

incremento de la velocidad específica tal como puede observarse en la Fig. 6.19.

Las bombas centrífugas están sujetas a las siguientes leyes físicas :

- a) si la velocidad se aumenta al doble, la capacidad de la bomba aumenta también al doble, manteniéndose constantes los demás factores.
- b) para aumentar al doble la altura de bombeo, la velocidad deberá aumentar al cuadrado.
- c) con el cubo de la velocidad la potencia aumenta al doble.

La eficiencia de la bomba está compuesta por el producto de las eficiencias mecánica, hidráulica y volumétrica. La eficiencia mecánica disminuye del 100% por las pérdidas por fricción entre las superficies en rotación y los cojinetes, la eficiencia hidráulica por la fricción del agua y la eficiencia volumétrica por las fugas de agua alrededor del impulsor. Una eficiencia de la bomba de 75% es razonablemente satisfactoria en las bombas de agua de circulación. (flujo axial, un paso y baja altura).

Para la altura de bombeo H_t desarrollada por una bomba, en forma preliminar se puede obtener la siguiente relación :

$$H_t = \frac{(d \cdot n)^2}{11280}, \text{ en m de columna de agua}$$

en donde :

d = diámetro del impulsor en m

n = rpm

La potencia al freno HPF de una bomba puede obtenerse por medio de la siguiente ecuación :

$$HPF = \frac{\omega Q H_t}{75 \eta_b}$$

en donde :

ω = peso específico del fluido, en kg/m^3

Q = flujo en m^3/s

H_t = altura dinámica total de bombeo

η_b = eficiencia del conjunto de bombeo, incluida la eficiencia del motor eléctrico y transmisión (96%) = 72%

En la Fig. 6.19 se muestran las potencias necesarias para accionar las bombas de agua de circulación en función del flujo y de la altura de bombeo, para una estimación preliminar.

La altura dinámica total H_t de las bombas de agua de circulación es la suma de la altura estática más las pérdidas por fricción en el sistema, es decir :

$$H_t = H_e + H_f, \text{ en m}$$

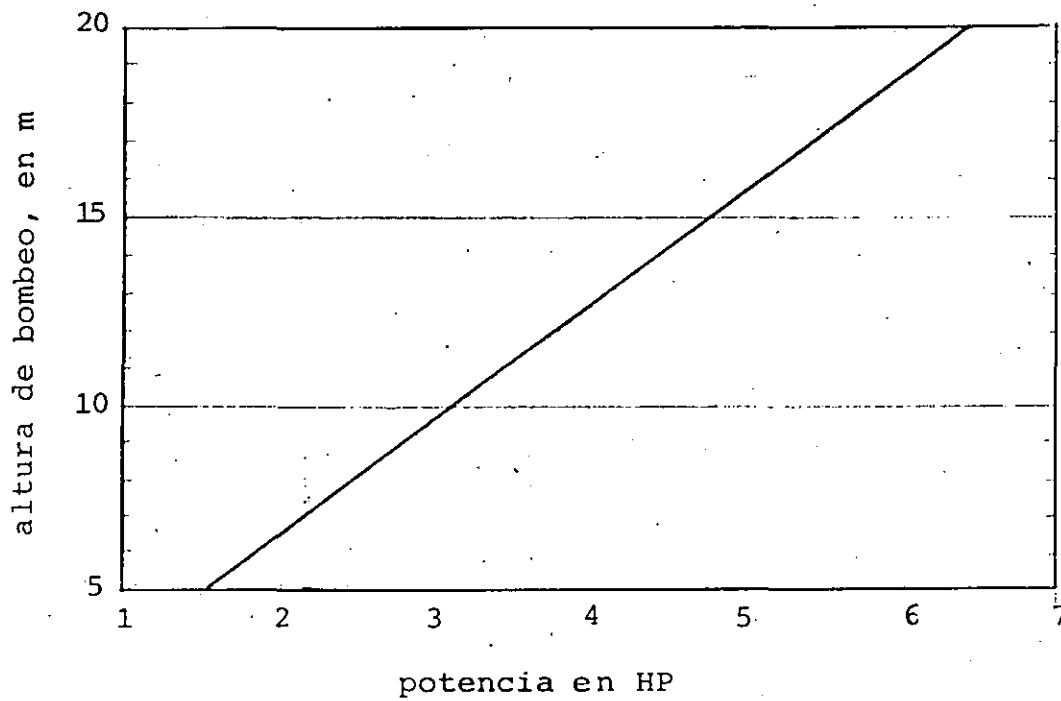


FIG. 6.19.- POTENCIA DE BOMBEO DE AGUA DE CIRCULACION, EN HP POR CADA 1 000 LPM

en donde :

H_e = altura de elevación del agua en la torre sobre el nivel de agua fría que tiene un valor usual de 8 a 10 m

H_f = resistencia hidráulica o pérdidas por fricción en el circuito, con valores reducidos que usualmente se encuentran entre 6 y 8 m

De acuerdo con lo anterior la altura total de bombeo es reducida por lo que se utilizan bombas de un solo paso de flujo axial y preferiblemente de eje vertical. Debido a su funcionamiento seguro, normalmente no se preve reserva en el sistema y se emplean dos bombas del 50% de capacidad cada una. La campana de succión deberá estar 3 m abajo del mínimo nivel posible esperado por requerimiento de sumergencia. La velocidad de rotación debe ser de unos 300 rpm, con un máximo de 450 rpm dependiendo del tipo y del tamaño del impulsor; la velocidad de descarga deberá ser 3 m/s como máximo y los materiales deberán seleccionarse de acuerdo con las características del agua.

- VENTILADORES

Los ventiladores en las torres de enfriamiento de tiro mecánico se utilizan para mover el aire a través de la torre, en grandes volúmenes y a bajas presiones. El movimiento del aire significa vent

cer la fricción o resistencia al flujo, lo cual representa trabajo, por lo que el ventilador puede verse como una máquina que suministra aire, requiriéndose energía para moverlo. La energía se suministra a la flecha del ventilador y se transfiere al aire manejado para elevar su presión y velocidad lo suficiente para vencer la resistencia presente y producir el flujo.

Existen dos tipos básicos de ventiladores :

- de flujo radial o centrífugos
- de flujo axial

Los ventiladores centrífugos pueden ser de aspas rectas, curvas hacia atrás y curvas hacia adelante. Los ventiladores axiales pueden ser de propela y tuboaxiales. Normalmente los ventiladores trabajan con presiones bajas (hasta 15 cms de columna de agua), sin embargo, no existe una línea límite de presión definida con los sopladores y compresores que se emplean para presiones más altas de aire.

Las principales leyes de los ventiladores son las siguientes :

- a) La capacidad varía directamente con la velocidad del ventilador
- b) La presión varía con el cuadrado de la velocidad del ventilador.

- c) La potencia varía con el cubo de la velocidad del ventilador
- d) A velocidad y capacidad constante la presión y la potencia varían directamente con la densidad del aire.
- e) A presión constante, la velocidad, capacidad y potencia varían inversamente con la raíz cuadrada de la densidad.
- f) Para un peso constante de aire, la velocidad, capacidad y presión varían inversamente con la densidad. También la potencia varía inversamente con el cuadrado de la densidad.

Algunas de las definiciones utilizadas con relación al trabajo de los ventiladores son las siguientes :

- La densidad del aire estandar es de 1.20 kg/m^3 de aire seco al nivel del mar y a 21°C
- El volumen manejado por un ventilador es la cantidad de $\text{m}^3/\text{min.}$ de aire a las condiciones de salida del ventilador.
- La potencia de salida de un ventilador se expresa en HP. y está basada en el volumen y la presión total del ventilador. La potencia de entrada se mide en HP y es la que se suministra a la flecha del ventilador.

- La eficiencia mecánica de un ventilador es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada.
- La presión total de un ventilador es la elevación de presión desde la entrada a la salida del ventilador, y es la suma de la presión de velocidad más la presión estática.
- La eficiencia estática de un ventilador es la eficiencia mecánica multiplicada por la relación de la presión estática, a la presión total.

La potencia necesaria para accionar un ventilador está dada por las siguientes ecuaciones :

$$HP = \frac{\text{volumen aire en m}^3/\text{min.} \times \text{presión en kg/m}^2}{60 \times 75 \times \eta}$$

o bien,

$$HP = \frac{\text{kg de aire/min.} \times \text{altura total en m}}{60 \times 75 \times \eta}$$

η = eficiencia del ventilador que varía de 0.50 a 0.75 dependiendo del diseño y capacidad del ventilador.

Debido a que se trata de presiones bajas, es muy importante que se tome en cuenta la densidad del agua con la que se mide la columna de presión del aire para hacer las correcciones correspondientes. Normal

mente los ventiladores para las torres de enfriamiento son de flujo axial, manejan grandes volúmenes de aire a baja velocidad de salida del aire (aproximadamente 10 m/s) y con baja caída de presión (menos de 1,3 cms de columna de agua).

En la gráfica de la Fig. 6.20 se muestran las potencias de salida de los ventiladores en función del flujo de aire y la caída de presión; para calcular la potencia de entrada o suministrada, el valor de la gráfica debe dividirse entre la eficiencia η .

En los ventiladores de torres de enfriamiento se emplean principalmente, los materiales siguientes:

- sección de alas de aeroplanos recubiertas con metal. En éstas, el mantenimiento es alto y pueden ocurrir daños fácilmente.
- aspas de acero dulce o de acero inoxidable. Estas últimas casi no requieren mantenimiento, pero las primeras requieren un recubrimiento cada año.
- aspas de fundición de aluminio que requieren ser raspadas y recubiertas con zinc después de varios años de servicio.

flujo de aire, en $m^3/min. \times 10^3$

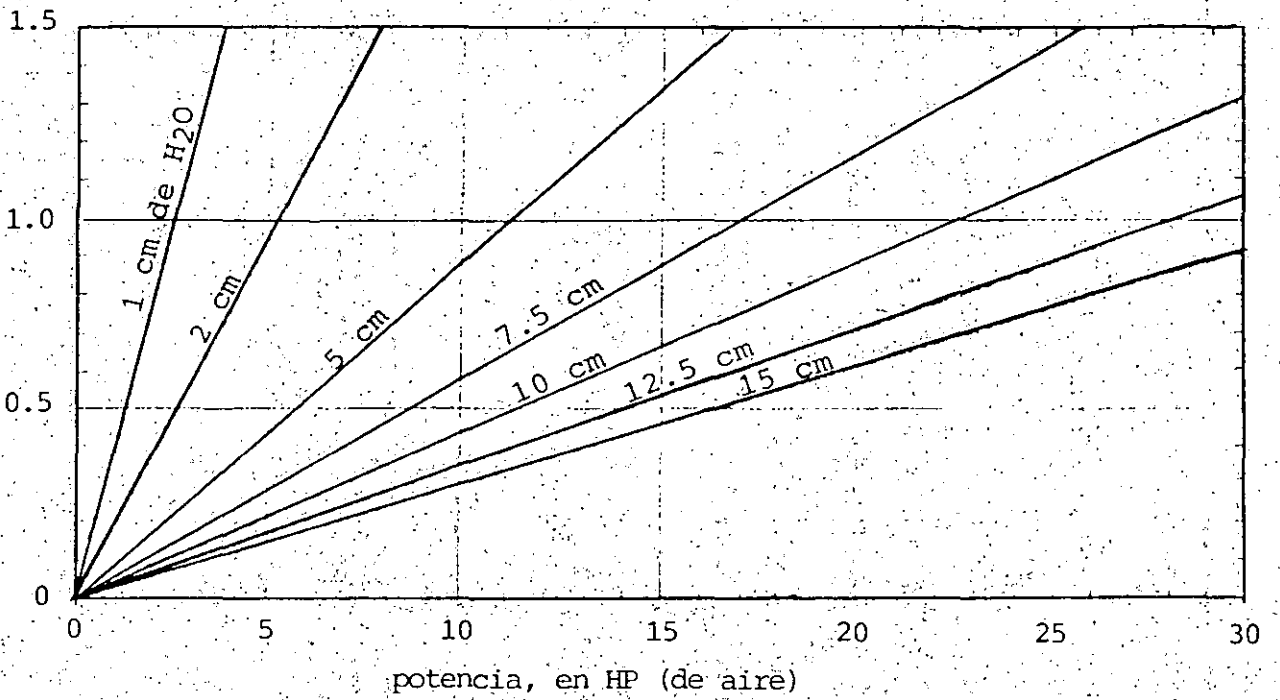


FIG. 6.20.- POTENCIA TEORICA PARA VENTILADORES
(SIN CONSIDERAR LA EFICIENCIA)

- aspas hechas de madera laminada que normalmente requieren un recubrimiento, en el lado de ataque, de acero inoxidable.
- plásticos (poliester reforzados para proporcionarles la resistencia y rigidez necesaria); no los ataca la corrosión ni los hongos.

El claro entre la punta de las aspas y la envolvente del ventilador normalmente se especifica entre 10 y 13 mm con tolerancias de ± 3 mm, siendo este claro muy importante por el efecto que tiene sobre la eficiencia del ventilador.

- CHIMENEA DE LOS VENTILADORES

La chimenea de los ventiladores se utiliza para ayudar a eliminar la turbulencia del aire en la sección de la garganta, producir un efecto de chimenea en la expulsión del aire en caso de que tenga altura suficiente y actuar como guarda del ventilador para reducir la recirculación. En el caso de chimeneas del tipo de recuperación de velocidad, con garganta Venturi de alturas de 4 m o más, se recupera la carga de velocidad de la corriente de aire descargada, en la forma de presión estática reducida, con lo cual se aumenta la eficiencia de los ventiladores. La superficie interior de las chimeneas debe ser lisa, sin rugosi-

dades para máximo flujo de aire, con juntas apropiadas en la base para evitar fugas, secciones y registros de acceso; tanto los materiales de la chimenea como tornillos y demás herrajes de las juntas deberán ser resistentes al deterioro, de acuerdo con las condiciones que prevalecen en la atmósfera de la torre.

- TRANSMISION (FLECHA Y REDUCTORES)

La transmisión de la potencia desde el motor eléctrico al ventilador, se efectúa normalmente por medio de una flecha horizontal y un reductor de velocidad de caja de engranes, tal como se muestra en la Fig. 6.21, a una flecha vertical en donde se coloca el ventilador; existe otra forma de transmisión como la mostrada en la Fig. 6.22, pero este tipo no se emplea en las instalaciones de CFE.

En la Fig. 6.23 se muestra un reductor de velocidad o caja de engranes, incluyendo el arreglo de la tubería de aceite, de los empleados en las torres de enfriamiento.

Las cajas de engranes o reductores normales no son adecuadas para usarse en las torres de enfriamiento de tiro mecánico, por lo que ha sido necesario que se desarrollen cajas de engranes especiales.

Las cajas de engranes enfriadas con ventiladores no deben usarse puesto que introducen un flujo de

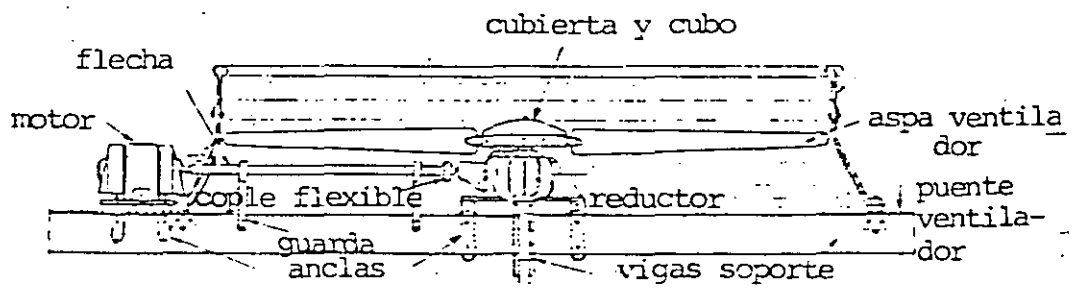
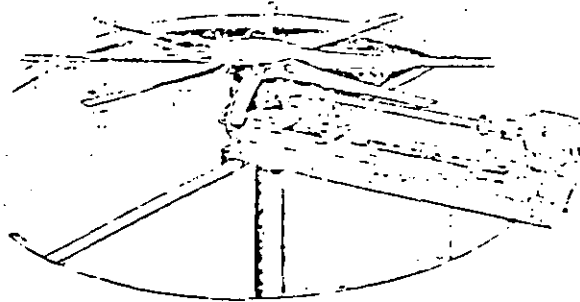


FIG. 6.21.-CONJUNTO DE VENTILADOR, REDUCTOR, FLECHA Y MOTOR

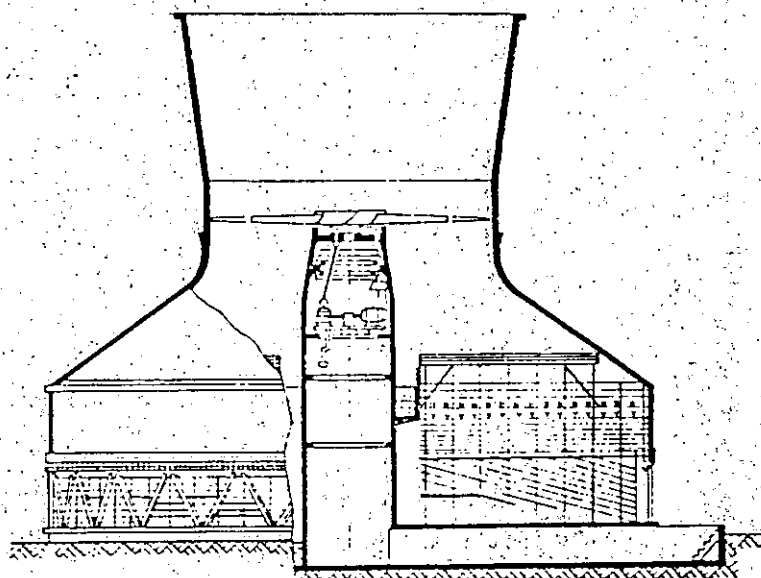
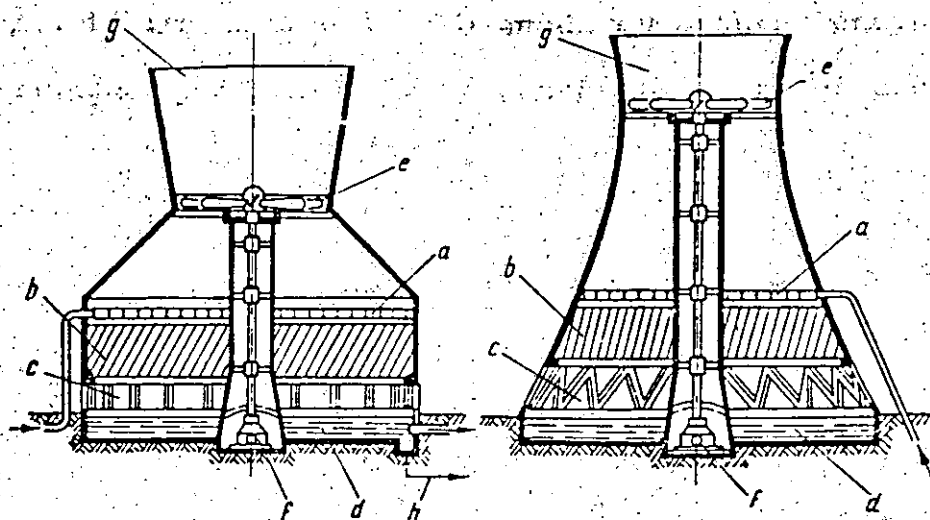
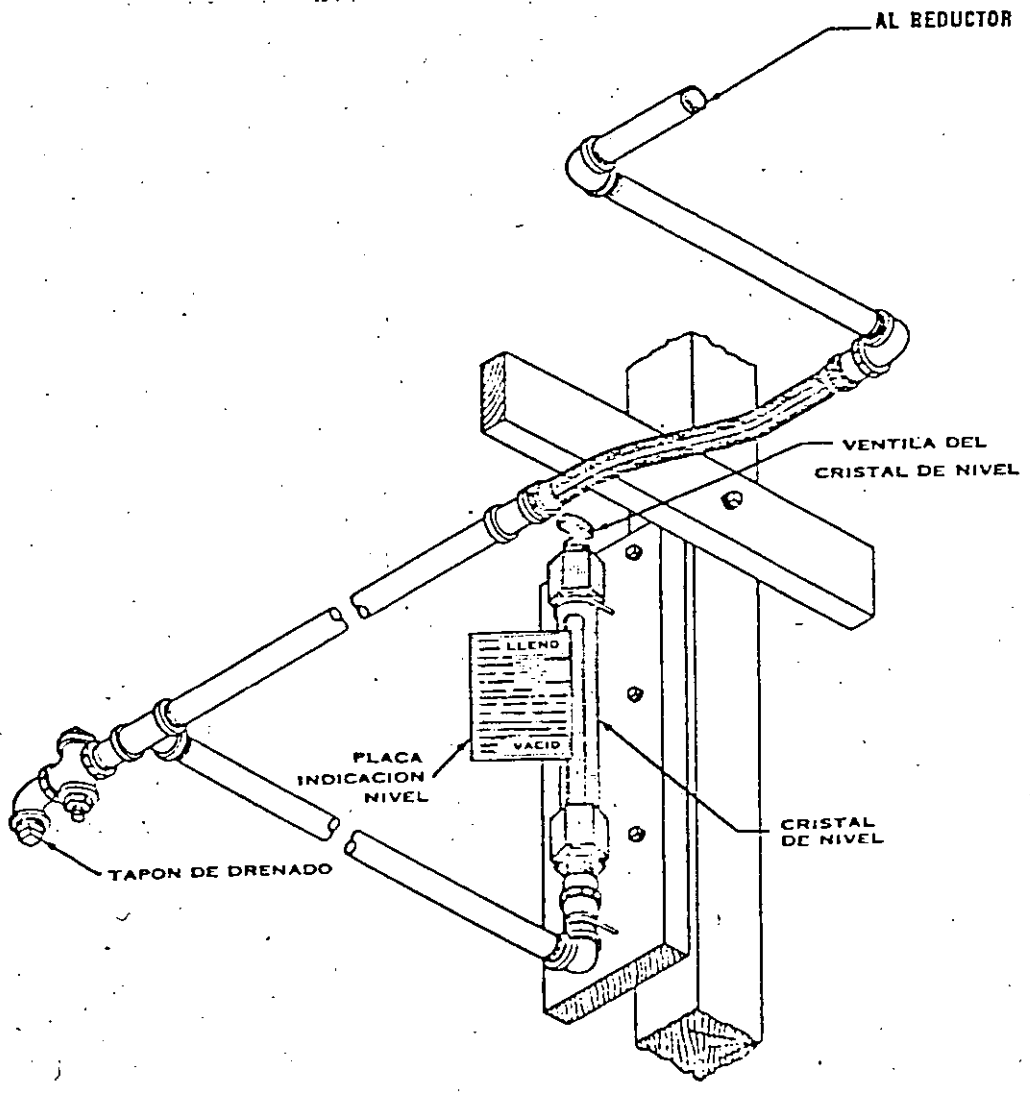
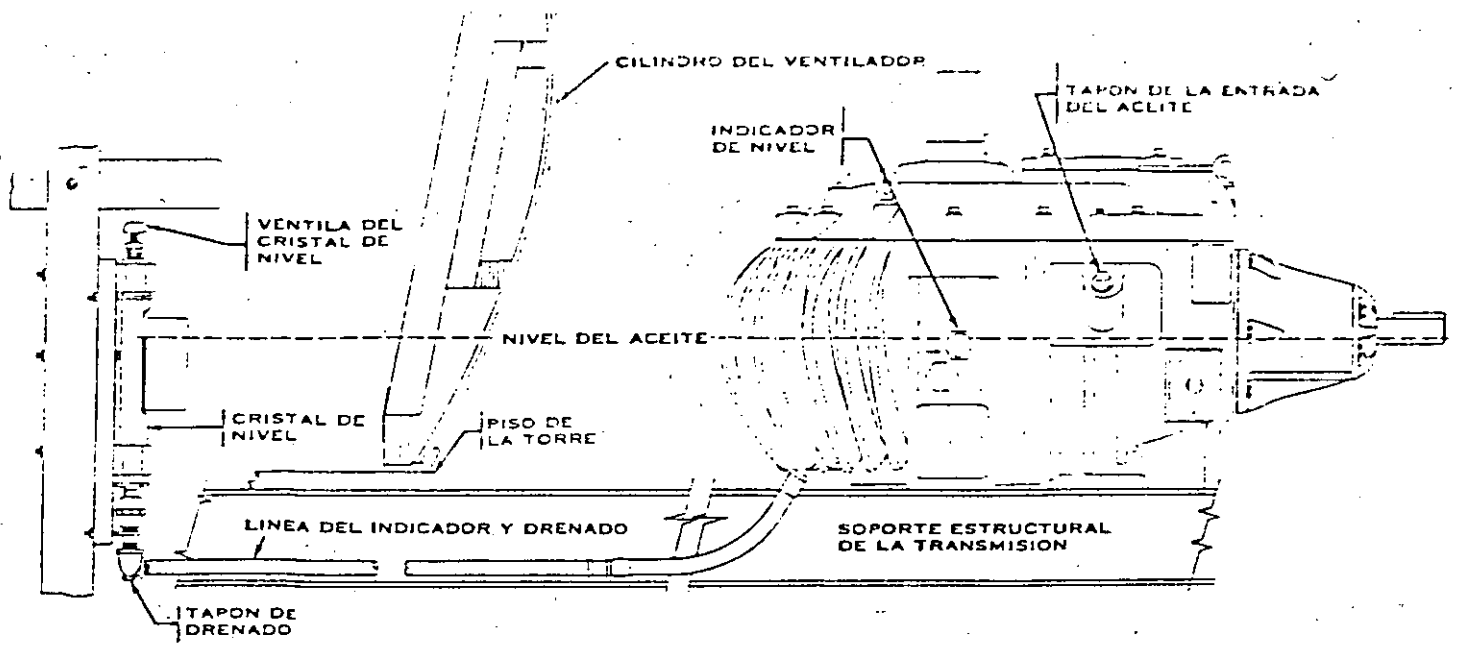


FIG. 6.22.- VENTILADOR SOPORTE CON FLECHA VERTICAL

- a) distribuidor de agua; b) relleno;
- c) entrada de aire; d) pileta;
- e) ventilador; f) acceso mantenimien
- to; g) difusor; h) purga.

REDUCTOR EQUIPADO CON INDICADOR DE NIVEL DE ACEITE Y LINEA DE DRENADO

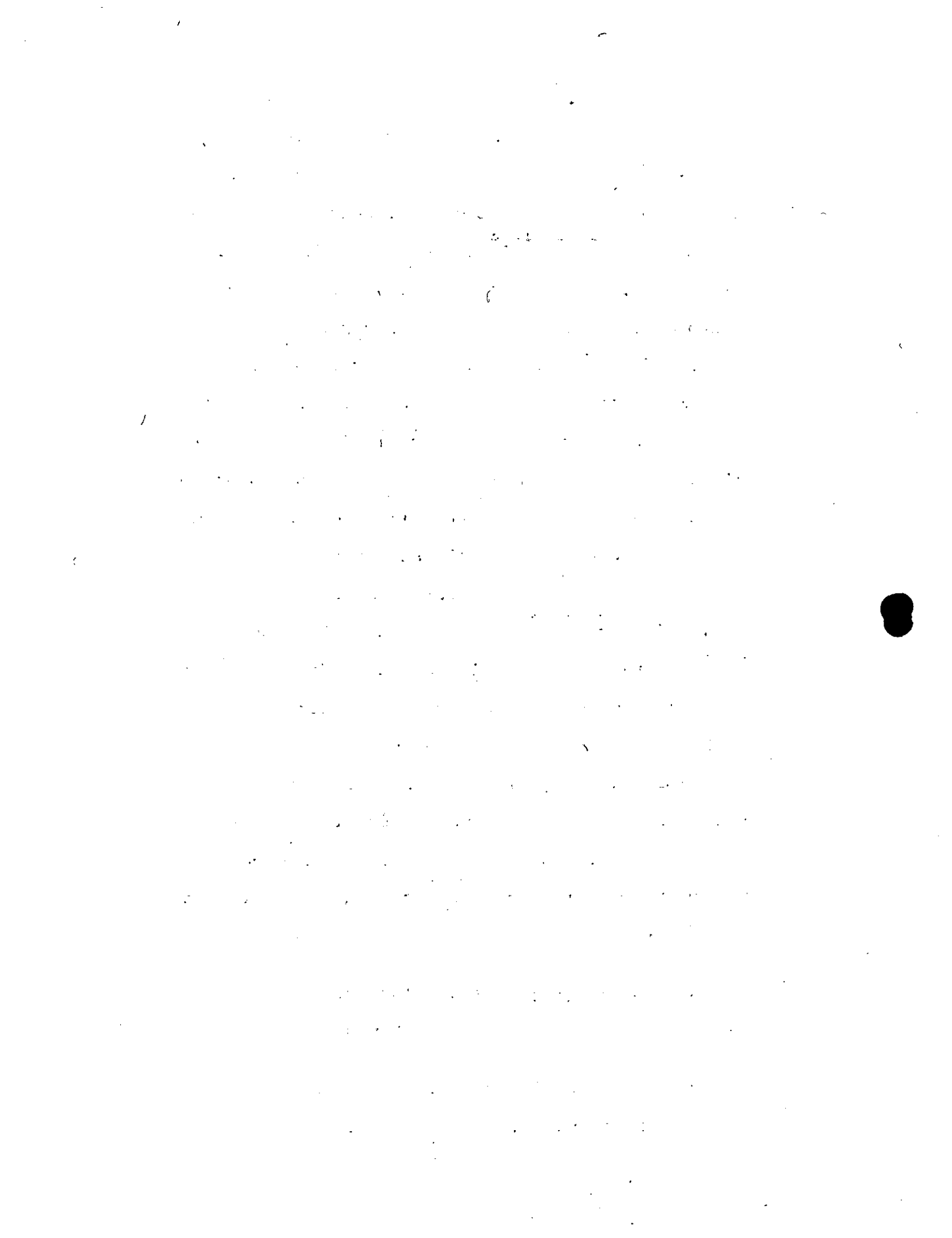


6.23.- REDUCTOR DE VELOCIDAD O CAJA DE ENGRANES Y TUBERIA DE ACEITE

aire cruzado que ayuda a la turbulencia y a la recirculación. Las cajas de engranes deberán sobredimensionarse generosamente y diseñarse con especial cuidado para que las respiraciones debido a calentamiento y enfriamientos, durante la operación, no permita la entrada de vapor de agua; el claro entre cojinetes no deberá ser muy pequeño y la caja de engranes debe rigidizarse adecuadamente. Las cajas de engranes más empleadas, son las que tienen una reducción sencilla de rueda a tornillo y que transmiten la potencia de un motor horizontal a una flecha vertical; la cimentación de la caja de engranes deberá estar nivelada para proporcionar un apoyo uniforme en toda la base - porque de otra manera la caja se distorsiona cuando se aprietan los tornillos y este desalineamiento causa condiciones de carga no uniforme, incrementando el mantenimiento en los cojinetes. El empleo de una larga flecha vertical sólida (Fig. 6.22), para soportar el ventilador tiene la ventaja de poder absorber el par de desbalance debido a ángulos no uniformes, de las aspas o a variaciones en la forma de éstas.

Los acoplamientos de flecha flotante de las torres de enfriamiento son de cuatro tipos :

- a) de discos metálicos (deberá examinarse dos veces al año para ver si no tiene grietas o ro-



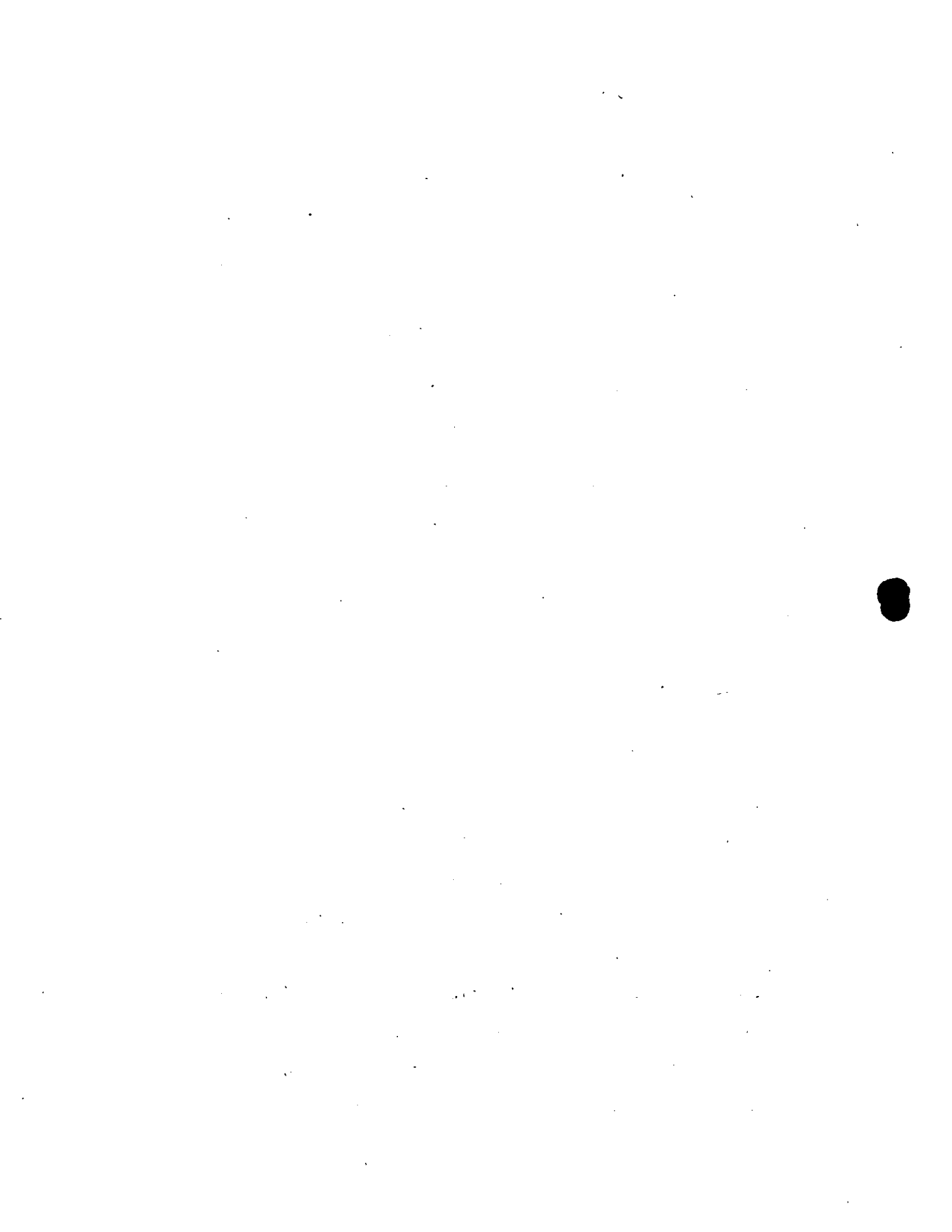
turas)

- b) sistemas de engranes. Debido a que existe peligro grande de introducción de agua a consecuencia de la acción centrífuga, el lubricante usado deberá ser a prueba de agua y con gravedad específica mayor que el agua.
- c) junta universal, que puede absorber cierto desalineamiento.
- d) bujes de hule, que pueden proporcionar cierta protección contra el desalineamiento pero que no se diseñan para absorberlo, por lo que deberán verificarse y alinearse regularmente.

En la Fig. 6.24 se muestra el ensamble de una flecha de transmisión.

- M O T O R E S

Los motores eléctricos usados para accionar los ventiladores de la torre de enfriamiento, deberán ser totalmente cerrados y podrán ser de enfriamiento con ventilador, en el caso de que no se en cuentren localizados en la corriente del aire de salida de la torre. En algunos casos se utilizan motores de dos velocidades en virtud de que presenta ventajas, ya que al reducirse a la mitad el flujo de aire la potencia se reduce a un octavo.



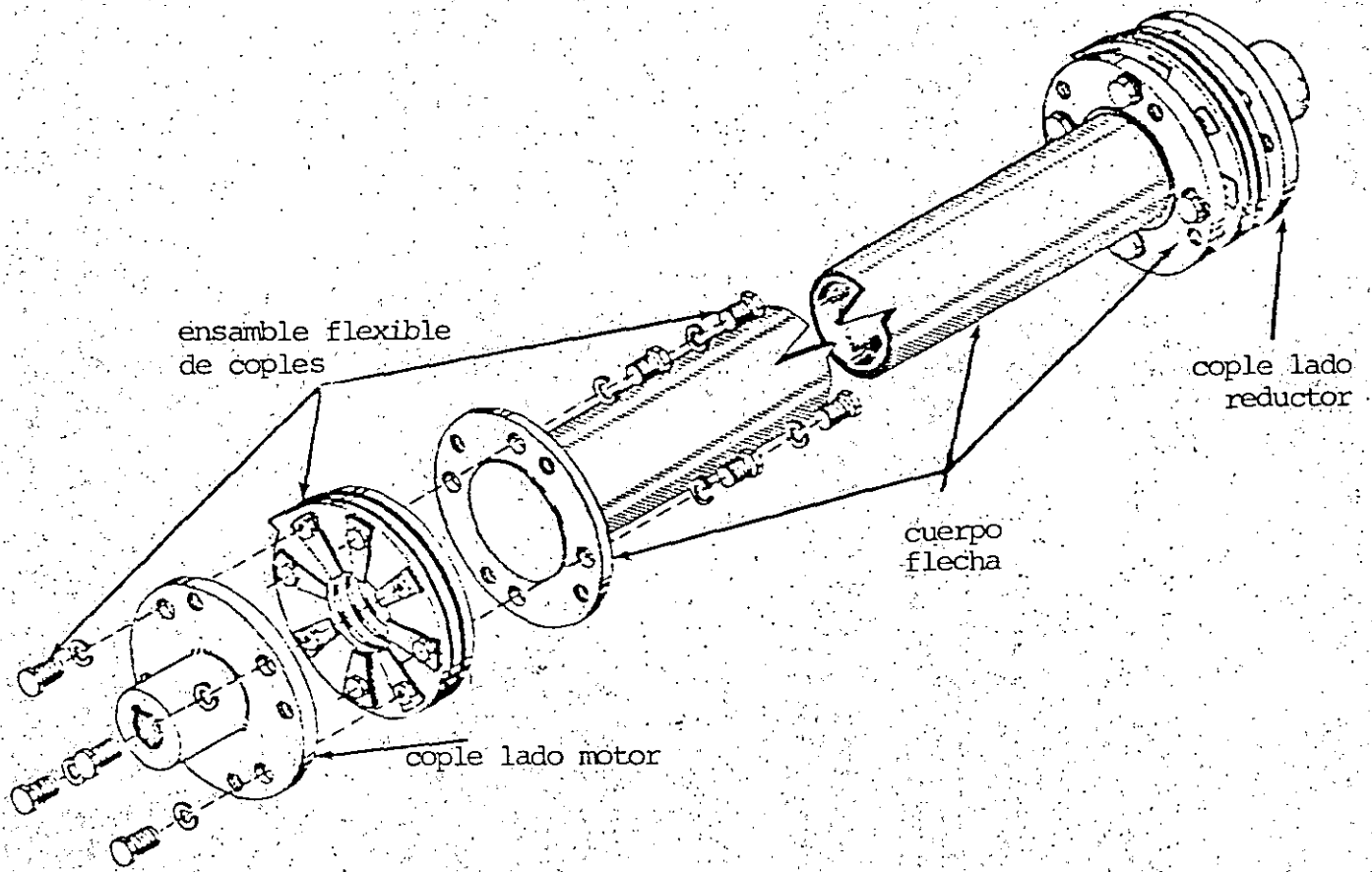
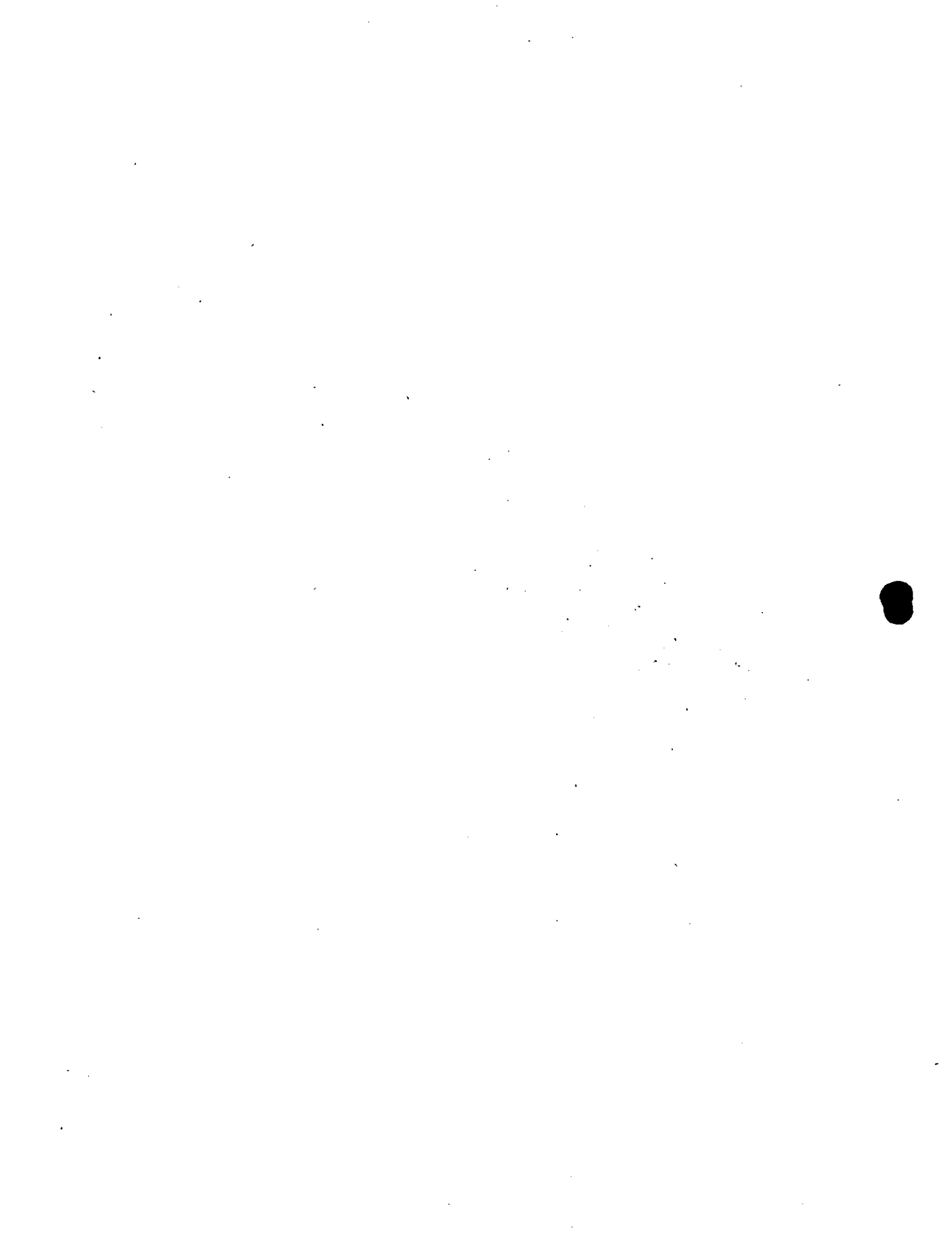


FIG. 6.24.- ENSAMBLE DE FLECHA DE TRANSMISION



Se recomienda que los motores se localicen fuera del contacto con el aire de salida de la torre para fácil acceso y mantenimiento.

- R E L L E N O S

Los rellenos o empaques se trataron en la Sección 6.06

- DISTRIBUIDORES DE AGUA

En las Figs. 6.25 y 6.26 se muestran dos tipos de distribución de agua.

En todos los sistemas de distribución, el agua es bombeada a la parte superior de la torre para que, por gravedad, pase a través del relleno, ya sea en forma de película o de gotas y se efectúe el enfriamiento por contacto con el aire atmosférico. La principal característica debe ser que la distribución sea uniforme.

En las torres de enfriamiento de flujo cruzado (Fig. 6.25), que son la mayoría de los empleados en CFE, la salida de las válvulas de control de flujo de agua es a las cajas de salpicado, en donde la parte inferior funciona para distribuir uniformemente el agua, y la parte superior para disipación de velocidad direccional y evitar salpicado.

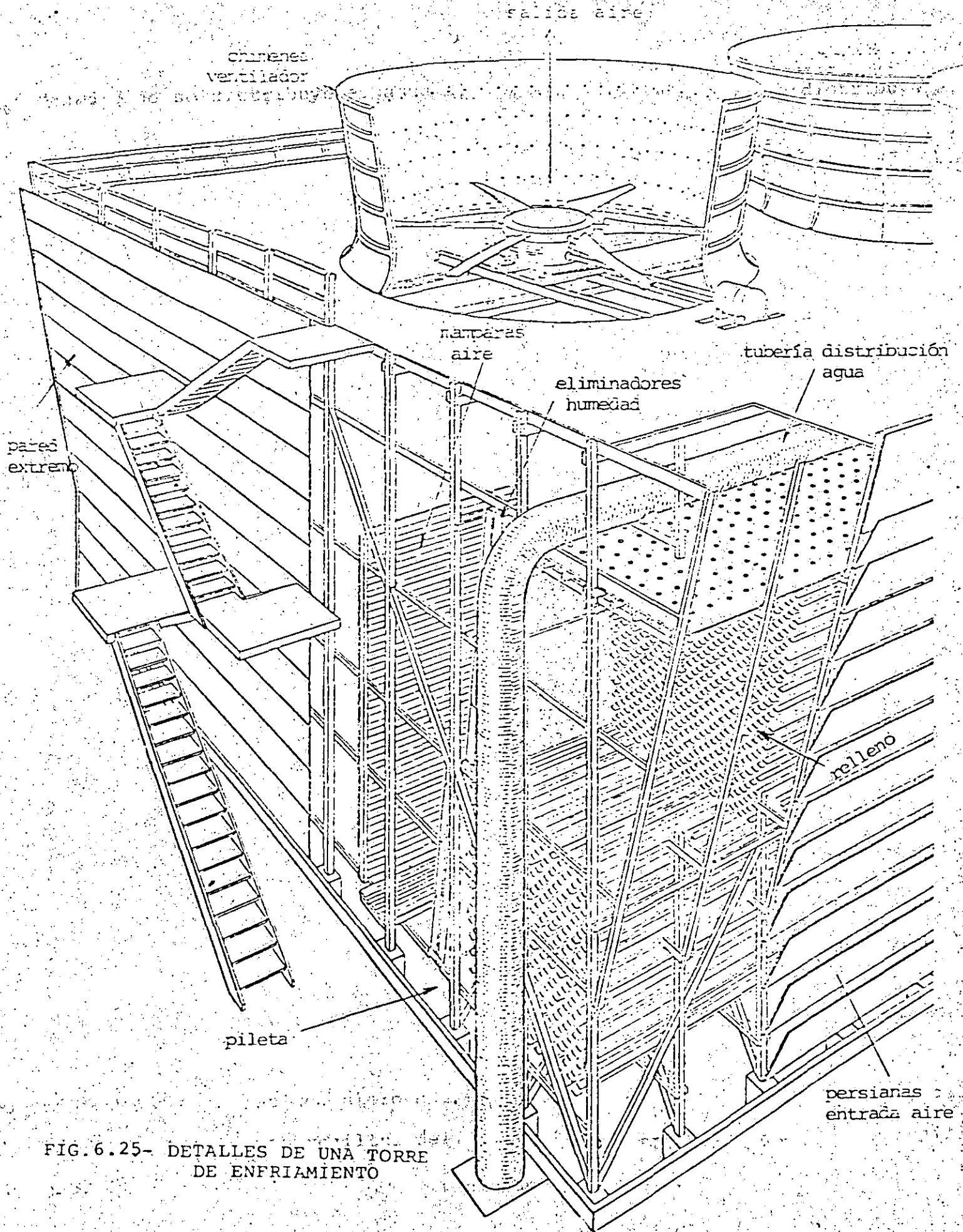
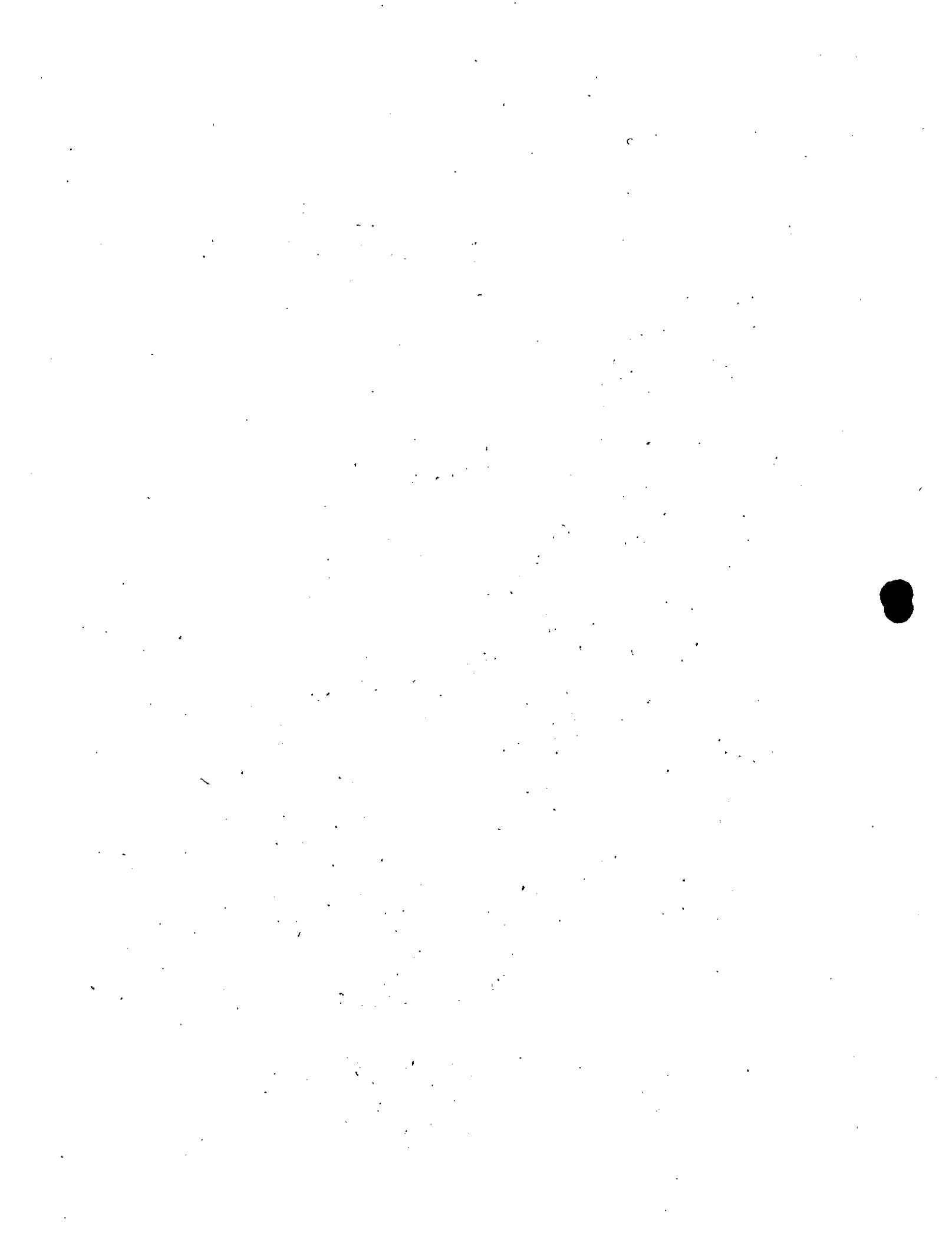


FIG. 6.25- DETALLES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO



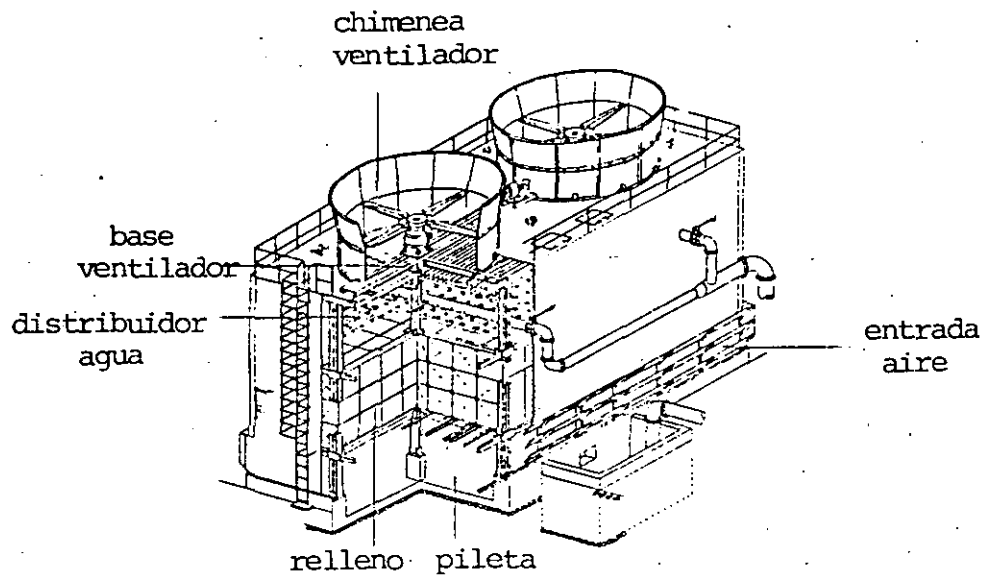
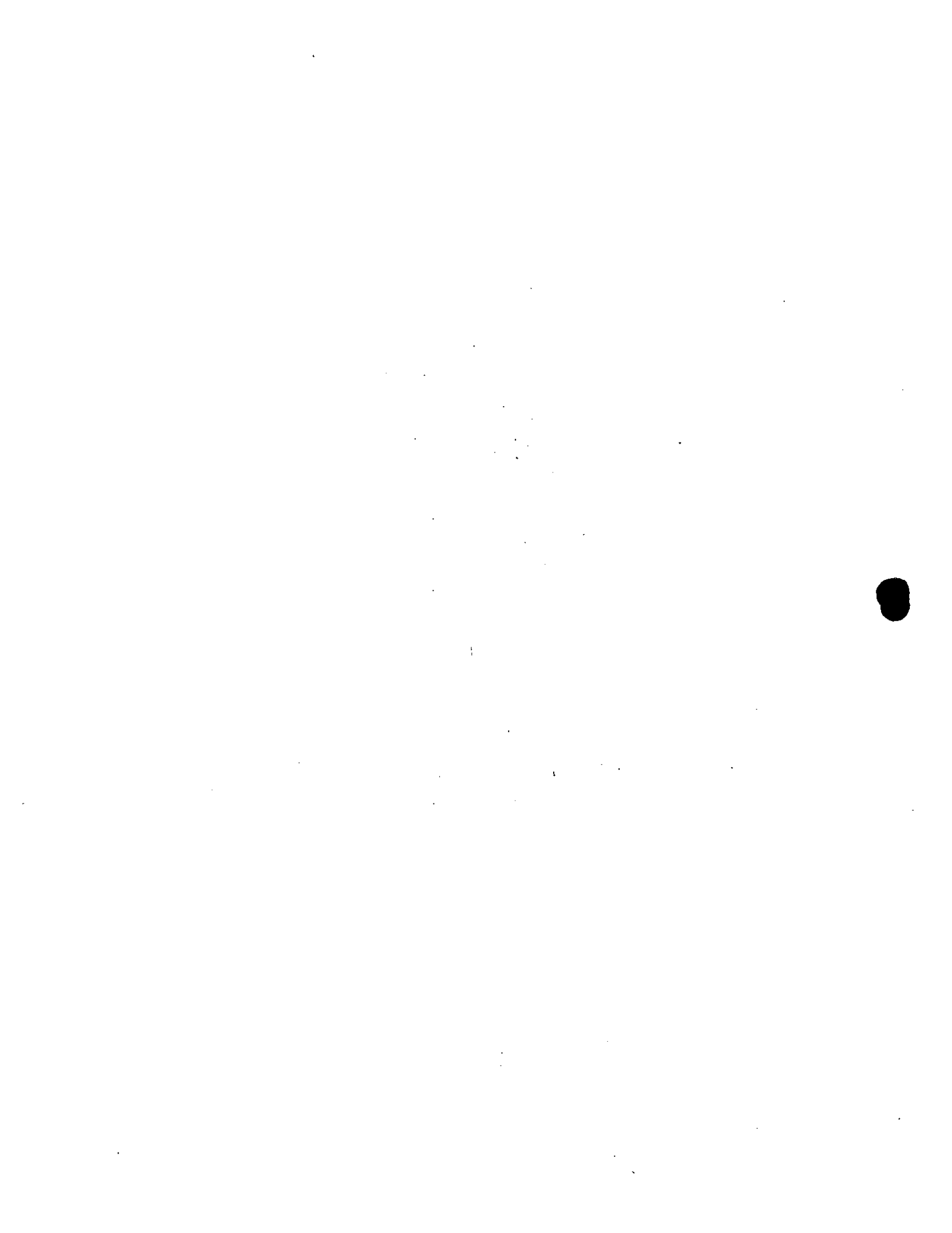


FIG. 6.26.- TORRE DE ENFRIAMIENTO DE CONTRA-FLUJO Y PELICULA



De las cajas de salpicado se distribuye el agua al recipiente distribuidor que efectúa esta función por medio de orificios de plástico removibles distribuidos uniformemente en el piso en donde cae el agua por gravedad al relleno de la torre para su enfriamiento.

Los sistemas de distribución deben ser autodrenables, evitar taponamiento y tener facilidades de inspección y mantenimiento.

- P I L E T A

Las piletas de la torre de enfriamiento normalmente se construyen de concreto, aunque, en algunos casos, para capacidades pequeñas, pueden ser de madera o metálicas.

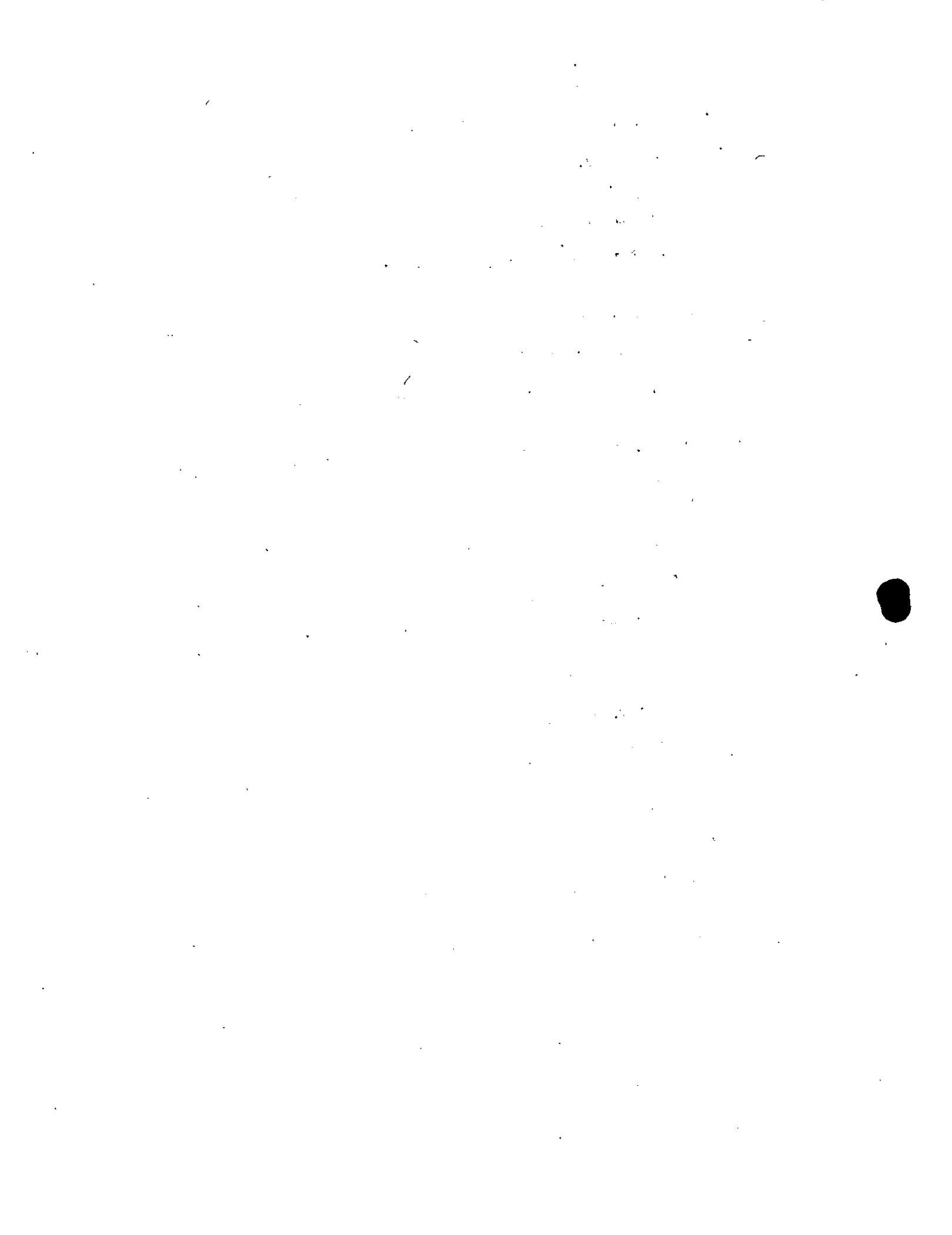
El principal problema de las piletas es la eliminación de fugas, principalmente en las juntas de construcción, siendo necesario efectuar pruebas hidrostáticas para asegurar su estanqueidad. Las piletas deberán tener pendiente normal hacia el cárcamo de bombeo y hacia la salida de la purga de fondo para eliminar lodos. Las principales conexiones que se tienen en las piletas son el dispositivo de derrame o sobreflujo, purga de fondo, agua de repuesto, inyección de ácido, cloro e inhibidor de corrosión, así como las rejillas del cárcamo de bombeo.

Por lo general, las piletas funcionan como cimentación de las torres de enfriamiento.

Para el diseño de las pilétas, deberán tomarse en cuenta los siguientes factores :

- El costo aumenta con la profundidad; debe conservarse entre 1.20 y 1.80 m, compatible con las necesidades de almacenamiento de agua.
 - Debe tener forma igual al área en planta de la torre.
 - Es recomendable acomodar las paredes de la pileta con los soportes de la torre, por conveniencia, resistencia o ahorro de material.
 - Cuando las piletas son grandes, los momentos desfavorables que ocurren cerca del centro pueden absorberse apoyando los soportes del relleno en las lozas de las piletas.
 - Debe estudiarse la posibilidad de hacer monolítica la pileta con la torre.
 - Deberán construirse con divisiones, por secciones para revisiones periódicas.
- E S T R U C T U R A

Esta parte de las torres de enfriamiento se trata en la Sección 6.08.



- ALUMBRADO Y COMUNICACIÓN

El alumbrado de la torre de enfriamiento deberá di señarse para proporcionar las condiciones de máxi- ma seguridad y eficiencia al personal de operación y mantenimiento. El nivel de iluminación deberá ser de 220 luxes como mínimo, en la zona de las bombas de agua de circulación.

El sistema de comunicación deberá estar constitui- do preferentemente con el sistema de comunicación interno de llamado a voces y un sistema de teléfo- no privado. Las unidades de comunicación de voces deberán localizarse en la parte superior de la to- rre en la zona de los ventiladores y en la zona de las bombas de agua de circulación dentro de la ca- seta de control; el teléfono privado deberá utili- zarse también en la caseta de control para propor- cionar una forma alternativa de comunicación con la sala central de control.

- C A B L E S

La capacidad de los cables de fuerza al motor, de be ser de 125% de la corriente nominal del motor con una caída máxima de voltaje en la línea de 3%. La alimentación debe estar conectada a través de un interruptor con protección por fusibles y con arrancador magnético con protección de sobrecarga

de acuerdo con el código nacional eléctrico.

Los controles del motor deberán poderse bloquear cuando estén en operación o fuera de servicio para evitar operación accidental. Las cubiertas o tuberías conduit deberán instalarse con determinada pendiente para que la humedad o el agua "entrapada" se descargue a través de una purga y no descargue a la caja de conexiones del motor. El motor deberá conectarse a la tubería conduit por medio de una unión flexible a prueba de agua.

Los cables para el suministro de energía y alumbrado deberán estar dentro de una cubierta protectora como tubería de PVC, resistente al deterioro y firmemente aseguradas a la estructura de la torre.

- V A L V U L A S

Las principales válvulas que se tienen en la torre de enfriamiento son las siguientes :

- descarga de la tubería (control de flujo)
- agua de repuesto
- purga continua

Las válvulas de descarga de la tubería o válvulas de control de flujo como la mostrada en la Fig. 6.27, en las torres de flujo cruzado, localizadas en la parte superior de la torre, se utilizan para

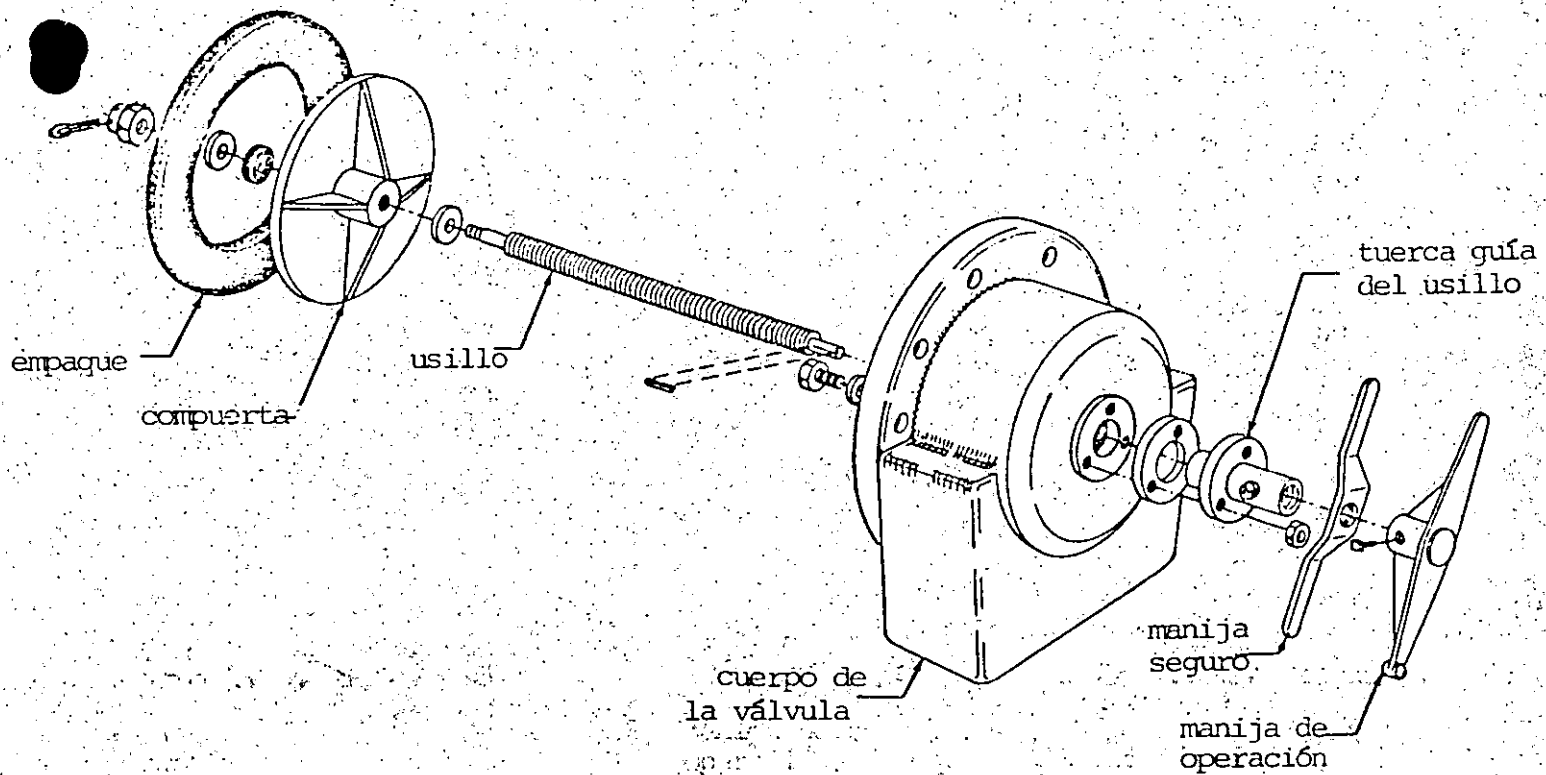
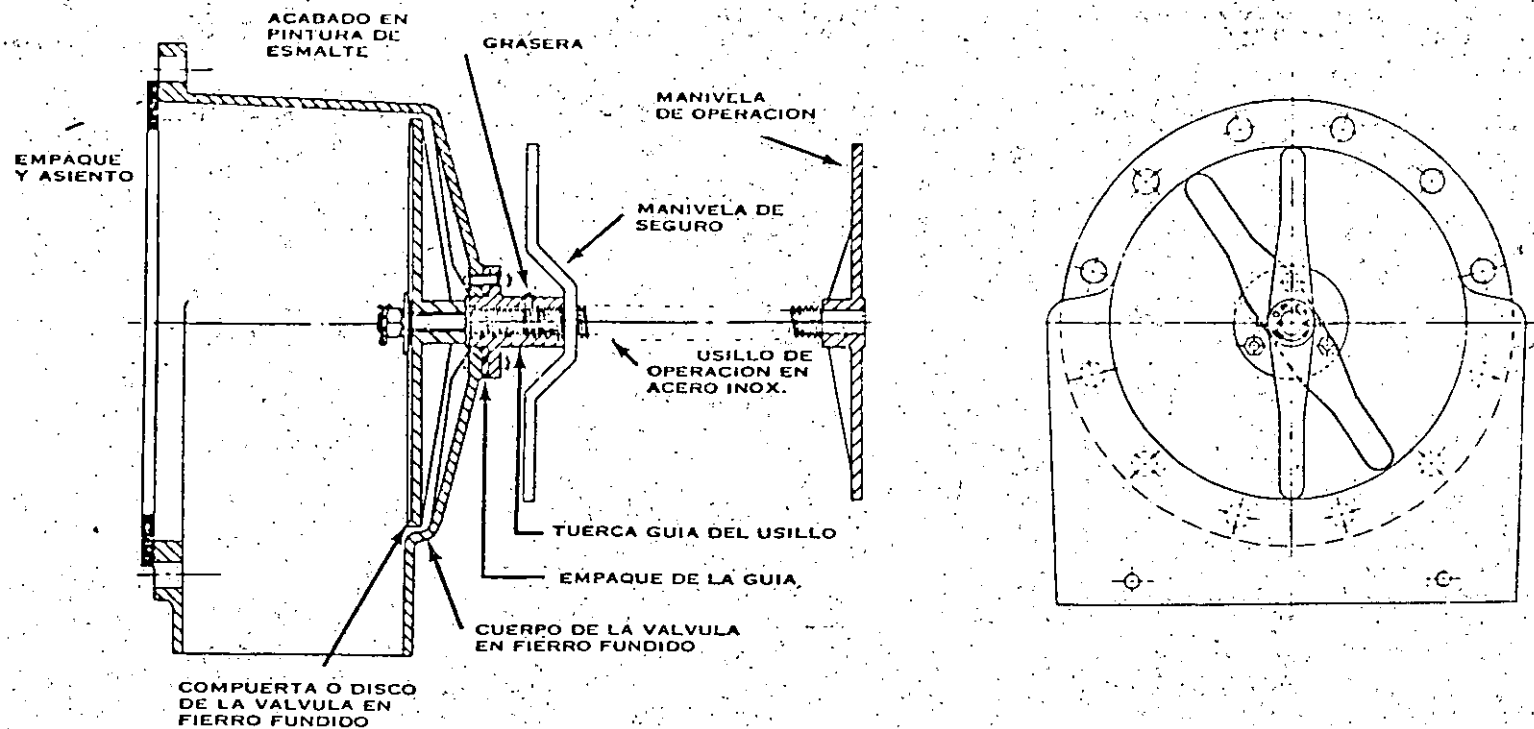


FIG. 6-27.- VALVULA DE CONTROL DE FLUJO

distribuir y controlar el flujo de agua a las celdas y su diseño debe ser para manejar flujos grandes de agua a baja presión, baja turbulencia de descarga y caída estática despreciable. Los arreglos y localizaciones de las válvulas deben considerar el fácil acceso y flexibilidad de operación; los materiales deben ser resistentes al deterioro, la presión de trabajo de $.4 \text{ kg/cm}^2$ (la máxima presión de operación no debe exceder de 1.8 kg/cm^2) y la velocidad de descarga está comprendida entre 1.5 y 3.0 m/s.

La válvula de agua de repuesto está controlada por el nivel de la pileta de la torre; la tubería de descarga, debe localizarse cuando menos dos veces el diámetro de la tubería más arriba que el máximo nivel de operación de la torre. En algunos casos la medición del flujo de esta agua controla la dosificación automática de ácido sulfúrico al agua de circulación.

Las válvulas de purga continua, así como las de fondo, deben tener sus descargas conectadas al drenaje; la pileta debe tener una ligera pendiente hacia la salida de la purga de fondo, y la purga continua puede conectarse a la pileta o a la tubería de agua caliente.

- TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA

Con objeto de evitar el deterioro de la madera de la torre de enfriamiento y también de evitar in-

crustaciones, depósitos y corrosión en el circuito de agua de circulación, normalmente se trata el agua con los siguientes compuestos :

- ácido
- cloro
- inhibidor de corrosión.

Este punto será tratado, posteriormente, en el Capítulo 7 siguiente .

- PERSIANAS DE ENTRADA

El objeto principal de las persianas de entrada es la admisión del aire rompiendo su velocidad para evitar que se formen canalizaciones y pérdidas de agua; normalmente las persianas se colocan con una pendiente hacia el centro de la torre de enfriamiento con un ángulo de 40° aproximadamente con la horizontal. El diseño deberá permitir que las persianas se puedan retirar deslizándolas de las ranuras, y como normalmente son de asbesto-cemento, la distancia entre apoyos no debe ser mayor de 90 cm, con sus juntas selladas para dirigir el agua hacia la pileta de la torre; el diseño de las persianas deberá ser tal que no haya resistencia al paso del aire.

- ELIMINADORES DE HUMEDAD

El objetivo de los eliminadores de humedad es el

de evitar el arrastre excesivo de agua a la atmósfera, con lo cual se ayuda a controlar la llovizna en los alrededores de la torre; básicamente los eliminadores de humedad funcionan forzando el aire a hacer un cambio brusco de dirección con lo que la fuerza centrífuga resultante separa las gotas de agua lanzándolas contra las placas de los separadores en donde se forma una película delgada de agua que fluye hacia la pileta de la torre. Para lograr lo anterior, los eliminadores de humedad se forman con placas colocadas en zigzag de materiales resistentes al deterioro y que produzcan la mínima caída de presión del aire; el área de la sección transversal de los eliminadores de humedad deberá ser igual o mayor que la sección transversal del relleno de la torre medida perpendicularmente al flujo de aire y las pérdidas de agua permitidas no deberán ser mayor de 0.2% del agua circulando en la torre. El diseño de los eliminadores de humedad deberá ser tal que permita fácilmente el retiro de las placas para su limpieza y mantenimiento.

- R E J I L L A S

En la descarga del agua fría y a la entrada del cámara de succión de las bombas de agua de circulación se instalan rejillas para evitar la entrada de materiales extraños a la bomba y al circuito de agua de circulación, siendo estas rejillas removibles, fa

bricadas de materiales resistentes a la corrosión y con aperturas apropiadas para evitar el paso de basura. Las rejillas deben poder deslizarse suavemente en ranuras o guías inclinadas de la pileta, para lo cual se requiere contar con una grúa (normalmente se emplea la de las bombas de agua de circulación); también deberá preverse espacio para retirar y lavar dichas rejillas.

SOBREFLUJO O DERRAME.

La torre de enfriamiento debe tener una conexión de sobreflujo o derrame, localizada en el máximo nivel de operación de la torre, con diámetro apropiado y con descarga conectada al drenaje.

SEGURIDAD O PROTECCION

Las torres de enfriamiento deben estar dotadas con sistemas de seguridad o protección, como red de agua contra incendio con hidrantes a intervalos apropiados, extinguidores y mangueras contra incendio, mascaros y guantes para manejo de ácido y cloro, y regaderas de agua cerca de los tanques de ácido.

INSTRUMENTACION Y CONEXIONES DE PRUEBA

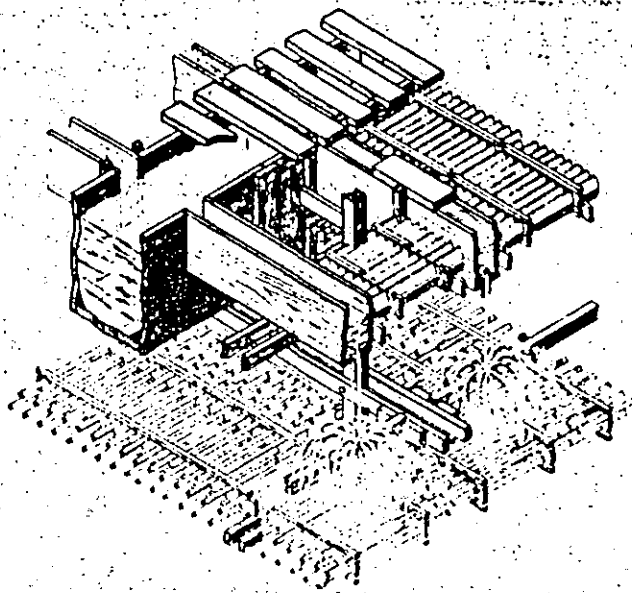
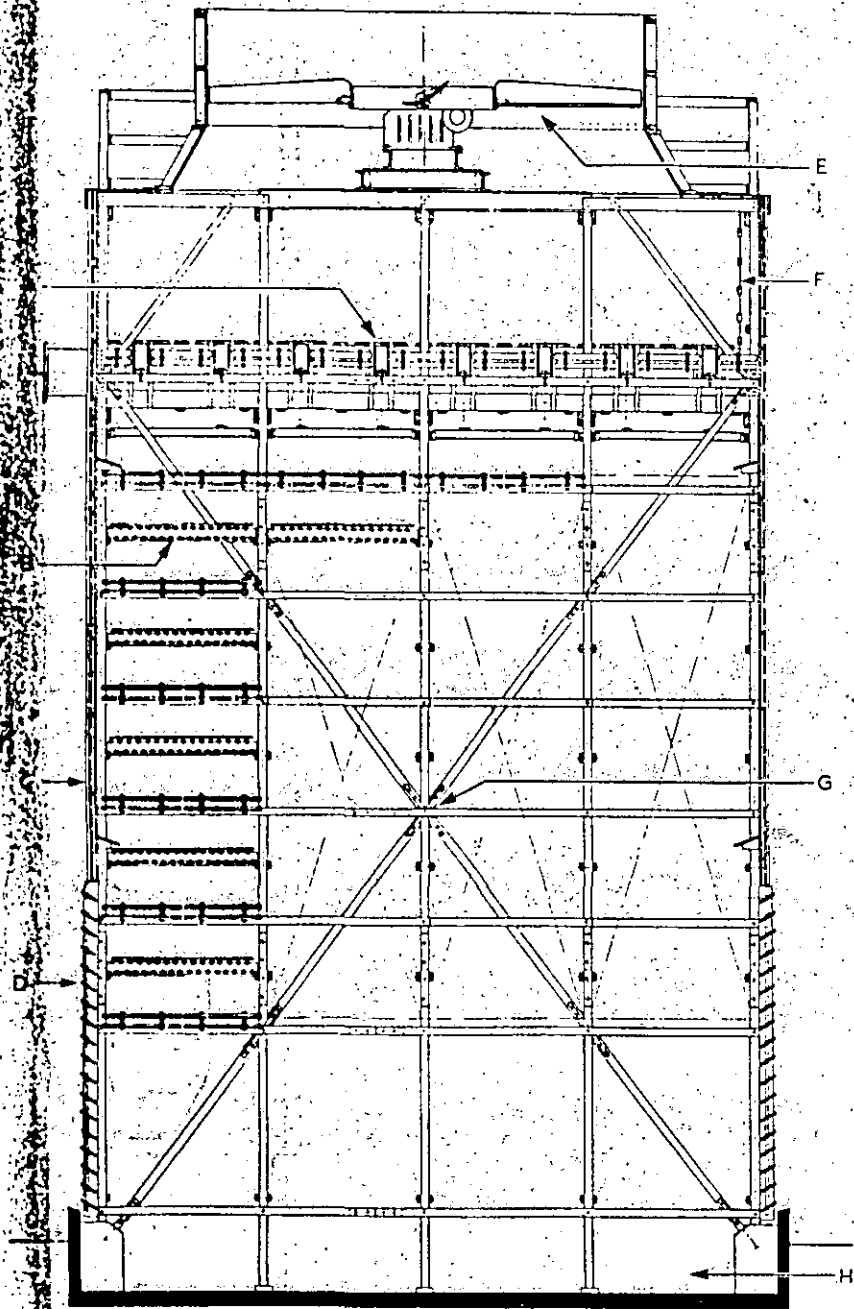
Los principales instrumentos y conexiones para realizar pruebas de comportamiento son las siguientes:

- conexiones para medición de flujo de agua de circulación, con tubo Pitot
 - anemómetros para la determinación de flujo de aire de los ventiladores
 - equipo para la medición del nivel de ruido
 - equipo para medir la potencia de los motores eléctricos
 - higrómetros
 - termómetros
 - manómetros
- CASETA DE CONTROL

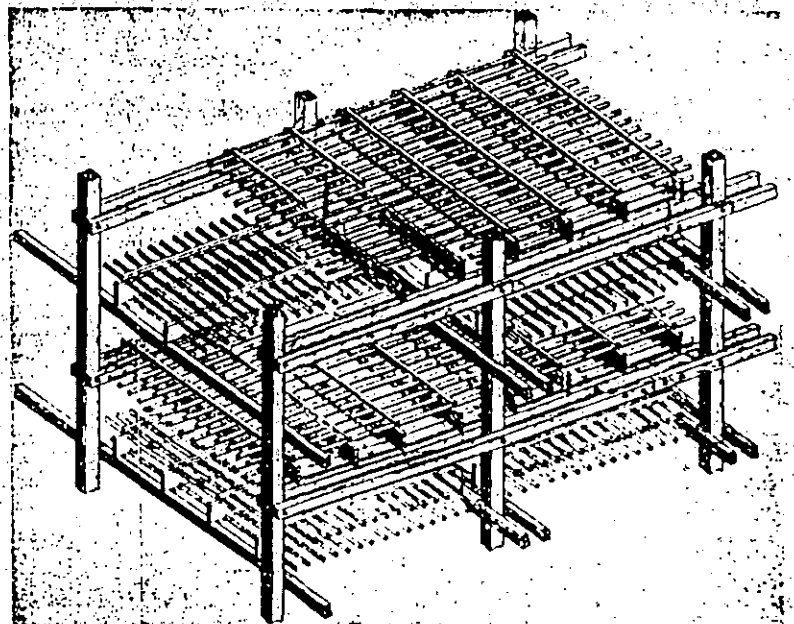
Normalmente los tableros de control y transformadores necesarios se instalan en una caseta localizada lo más cerca posible de la torre de enfriamiento o centro de carga. En esta caseta se instalan también los controles de las válvulas motorizadas que requieren las tuberías de agua de circulación.

6.08 E S T R U C T U R A

El diseño de la estructura de las torres de enfriamiento, se encuentra afectado por las diferentes formas, arreglos o configuraciones que existen de estos equipos, así como por los diferentes tamaños y por los materiales de construcción o fabricación. En la Fig. 6.28 se muestran los detalles estructurales de una torre de enfriamiento de estructura de madera, tiro mecánico, contra-flujo y salpicado; en la Fig. 6.29 se

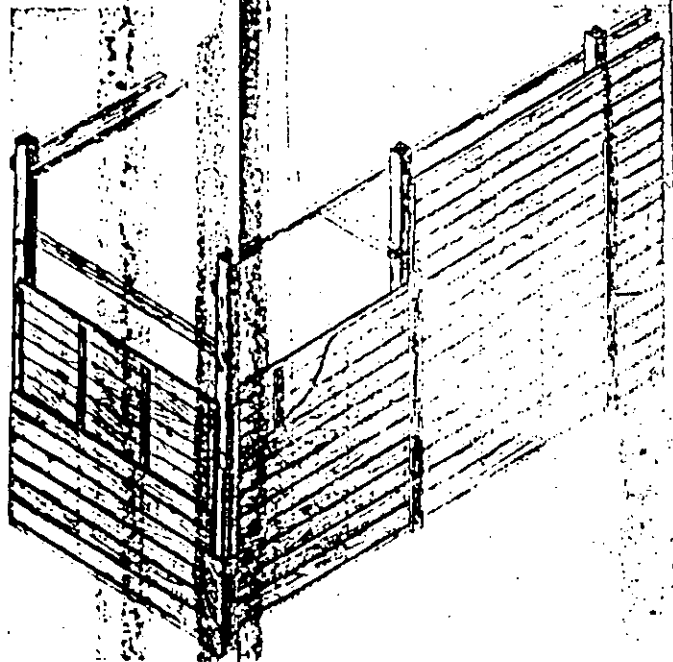


A

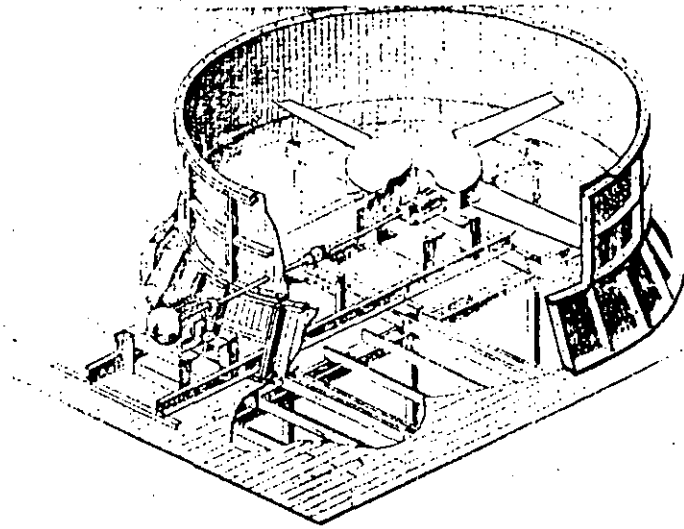


B

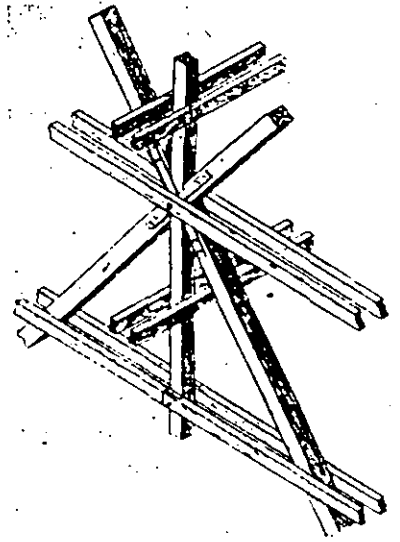
FIG. 6.28.- SECCION TRANSVERSAL Y DETALLES ESTRUCTURALES DE UNA CELDA DE TORRE DE ENFRIAMIENTO (CONTRAFLUJO, SALPICADO)



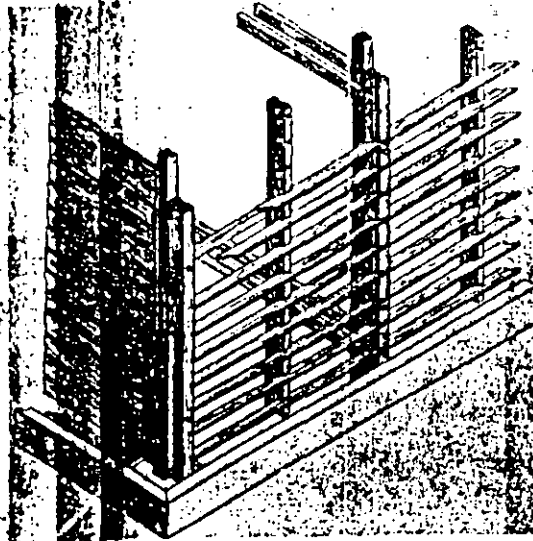
C



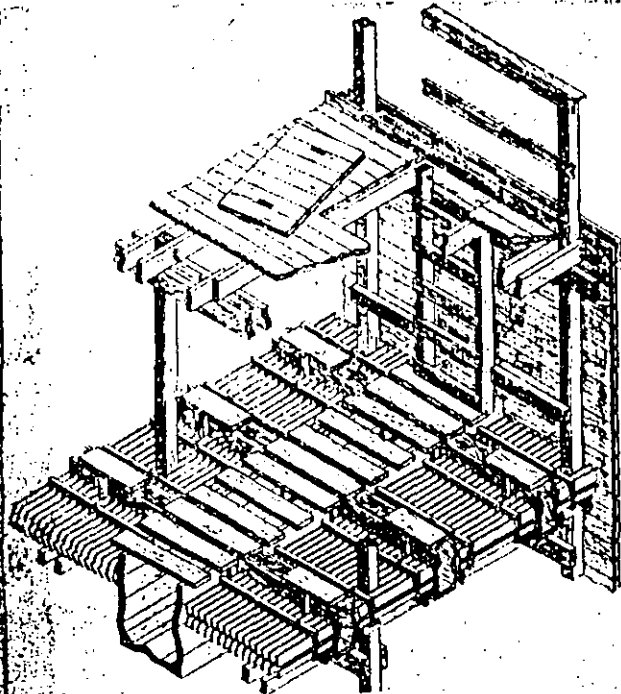
E



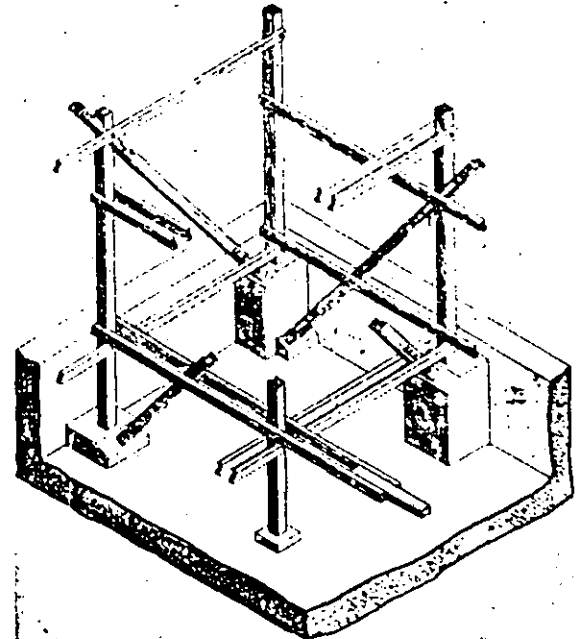
G



D



F



H

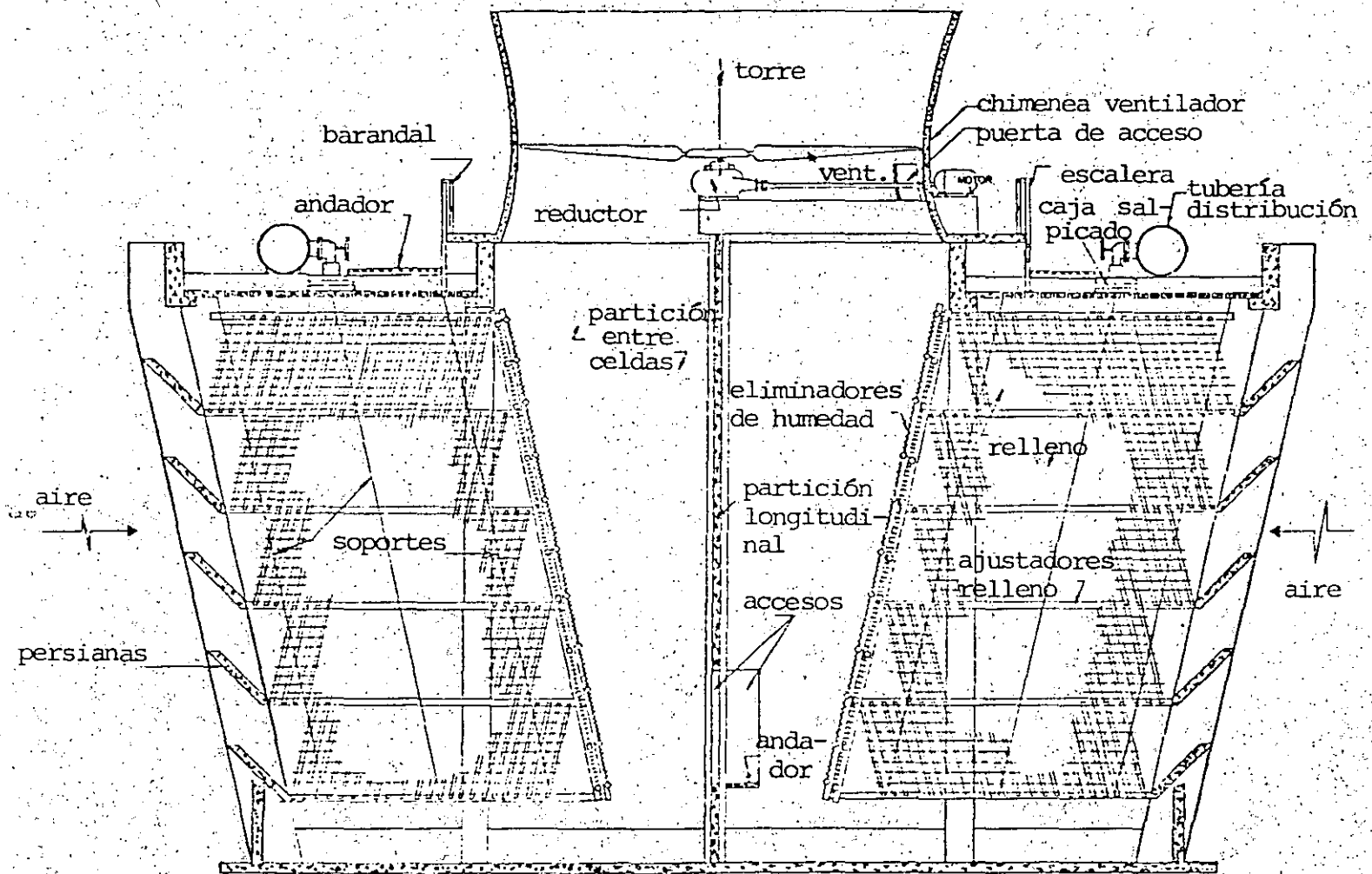
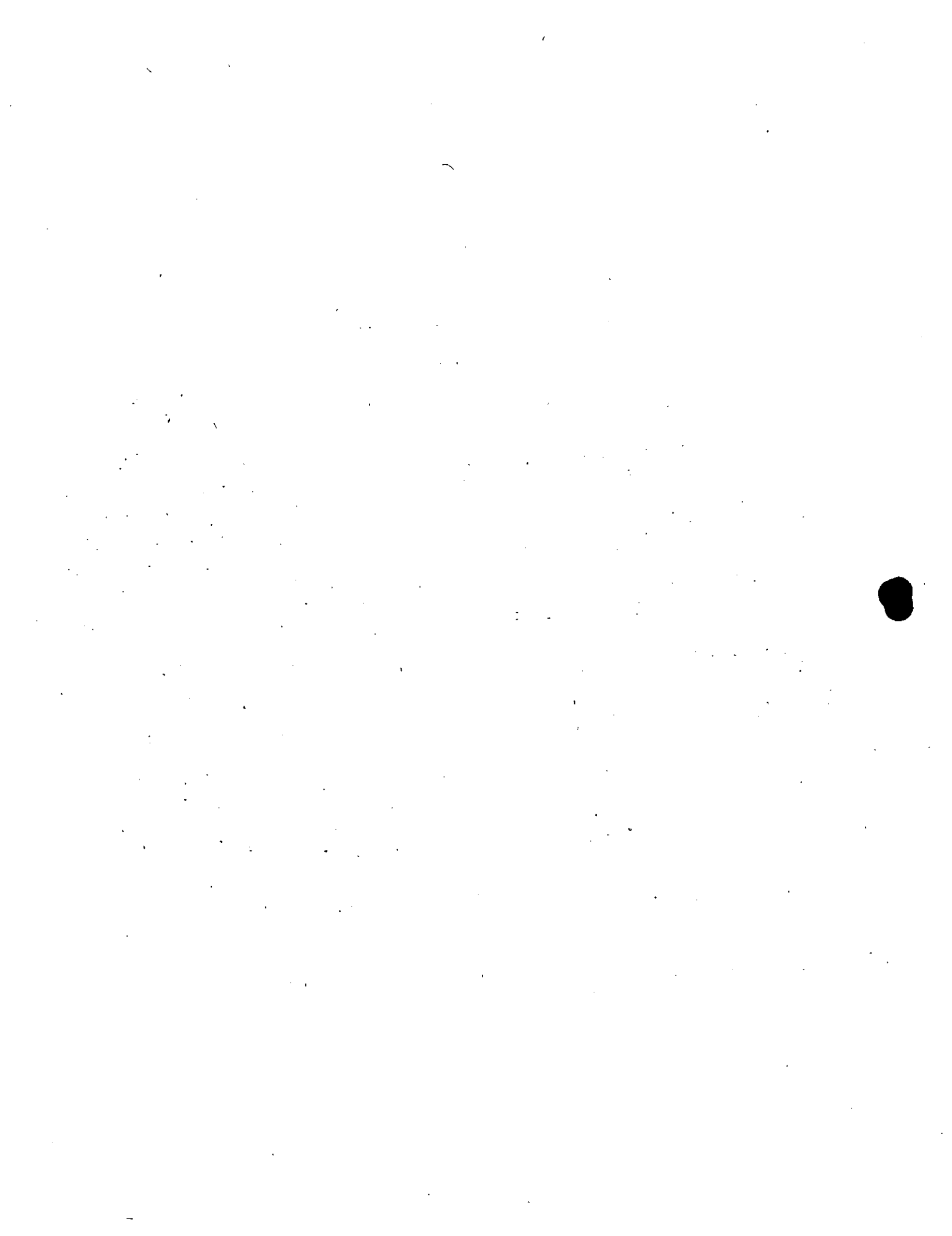


FIG. 6.29. SECCION TRANSVERSAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE CONCRETO



muestra la sección transversal de una torre de enfriamiento de concreto, tiro mecánico, flujo cruzado y salpicado.

La forma que adopta la estructura de una torre de enfriamiento depende del tipo de ésta, distinguiéndose, principalmente, las siguientes :

- tiro mecánico
- atmosféricas
- tiro natural con formas cilíndricas, cónicas o hiperbólicas con planta circular.

Para las formas anteriores se tienen también diferentes condiciones de diseño de las piletas de agua fría.

Para el diseño de la forma de la torre de enfriamiento se toma en cuenta principalmente que se debe proporcionar el máximo flujo posible de aire, que está en función de la base y la altura de entrada de aire, normalmente definidas por los fabricantes; en general, la relación entre el perímetro y la superficie es de 4 para celdas cuadradas y de 3.55 para celdas circulares o poligonales.

Los materiales de construcción que se utilizan en las torres de enfriamiento, son los siguientes :

- madera, que tiene normalmente una vida útil de 12 a 15 años, siendo el material más común utilizado en donde se dispone de él a costos bajos.
- concreto, que tiene algunas desventajas como alto costo inicial, tiempos de construcción largos, necesidades de mano de obra especializada, construcciones masivas con grandes pesos muertos y además es susceptible a ataques de algunos tipos de bacterias y materiales.
- acero, que se ha utilizado en muy pocas ocasiones debido a su alto costo y a que la vida útil en este ambiente es de 6 a 8 años.
- otros materiales como plásticos y asbestos.

El arreglo estructural de la torre de enfriamiento puede ser en algunas de las siguientes formas :

- relleno independiente de las paredes, que es recomendable cuando se tienen paredes de concreto debido a que no se requieren previsiones para soportarlo, simplificando el trabajo.
- relleno cargado exclusivamente por las paredes, que tiene la desventaja que, por claros largos pueden flexionarse los rellenos, el equipo mecánico no puede soportarse rígidamente y como la carga se concentra en la periferia, las cargas en la cimentación no están equilibradas.

- relleno con carga distribuida parte en las paredes y parte en la base de la pileta, siendo esta la forma más recomendable para las torres de celdas con ventiladores, obteniéndose una estructura completamente en marco con interconexiones entre vigas y columnas, dando a la torre rigidez y al relleno estabilidad; en las torres de madera, las cargas de viento son tomadas por los brazos diagonales que la transmiten a las columnas.

La teoría del diseño estructural puede clasificarse por las siguientes partes o tipos de torres de enfriamiento :

- para todos los tipos de torres de madera.
- para las torres de concreto de tiro mecánico.
- para las torres de concreto de tiro natural.
- para piletas
- para cimentaciones.

El diseño de marcos y tableros simples de madera, tal como se utilizan en las torres de enfriamiento es bastante elemental, debido a que las cargas son ligeras, con excepción de los soportes de los ventiladores y - en la mayoría de los casos pueden considerarse con flexión simple o bajo esfuerzo directo.

En el caso de torres de enfriamiento grandes de concreto de tiro natural, se requieren conocimientos de diseño de cascarones cuya teoría es más compleja y que in-

cluye la teoría de membranas para resolverlas, existiendo diferentes códigos para su solución y en donde los principales parámetros considerados son la presión del viento, el gradiente térmico, el factor de carga del propio peso y los momentos en la cubierta. Adicionalmente, se deberán considerar las vibraciones inducidas por viento, las fuerzas sísmicas y los esfuerzos por asentamientos diferenciales.

El caso de las torres de enfriamiento de tiro natural hiperbólicas con alturas de aproximadamente 200 m, ha tenido un gran esfuerzo de investigación por parte de matemáticos y de ingenieros, con objeto de asegurar la estabilidad en su diseño. Los códigos de diferentes naciones, establecen ecuaciones diferentes para el cálculo de la presión del viento y además los criterios para determinar la velocidad del viento de diseño, también es diferente en estos códigos.

El comportamiento de estas estructuras es diferente a un cantiliber vertical como en las chimeneas; bajo la acción del viento, la tensión máxima meridional está siempre en el azimut 0° de la dirección del viento y la máxima compresión está en el azimut de 65 a 75° . Las fuerzas de compresión debidas al peso propio se balancean por las fuerzas de tensión del viento normal; las fuerzas de tensión bajo viento extremo ocurren en la parte baja de la estructura, mientras que en la parte alta de la torre las fuerzas meridionales son siem-

pre de compresión. Circunferencialmente el peso propio produce flexión arriba de la garganta y compresión en la parte de abajo. El gradiente térmico tiene poco efecto en la determinación del espesor de la cubierta, pero es muy importante cuando se verifica contra la ruptura; para la determinación del espesor de la cubierta generalmente se hace bajo consideraciones de bucle.

En México, las estructuras deberán diseñarse para una carga de viento correspondiente a una velocidad horizontal de acuerdo con el código ASA-A 58.1-1955, en cualquier dirección de la superficie expuesta.

La estructura de la torre de enfriamiento deberá contar con pasillos, barandales y escaleras firmemente aseguradas, así como puertas de acceso, paredes laterales, exteriores y divisiones.

En las torres de enfriamiento de madera, la estructura soporte de los ventiladores, reductores de velocidad, flecha de transmisión y motores debe ser rígida para controlar la vibración, por lo que normalmente se fabrican de marcos unitarios rígidos de acero estructural atornillados a soportes que a su vez transmiten las cargas a la estructura de la torre de enfriamiento; este arreglo asegura el alineamiento continuo de las partes rotatorias y el marco debe ser de materiales resistentes a la corrosión. El máximo claro de la estructura



DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

CURSOS ABIERTOS

TORRES DE ENFRIAMIENTO

COMPORTAMIENTO

ING. ALBERTO PLAUCHU LIMA

MAYO 1992.

COMPORTAMIENTO

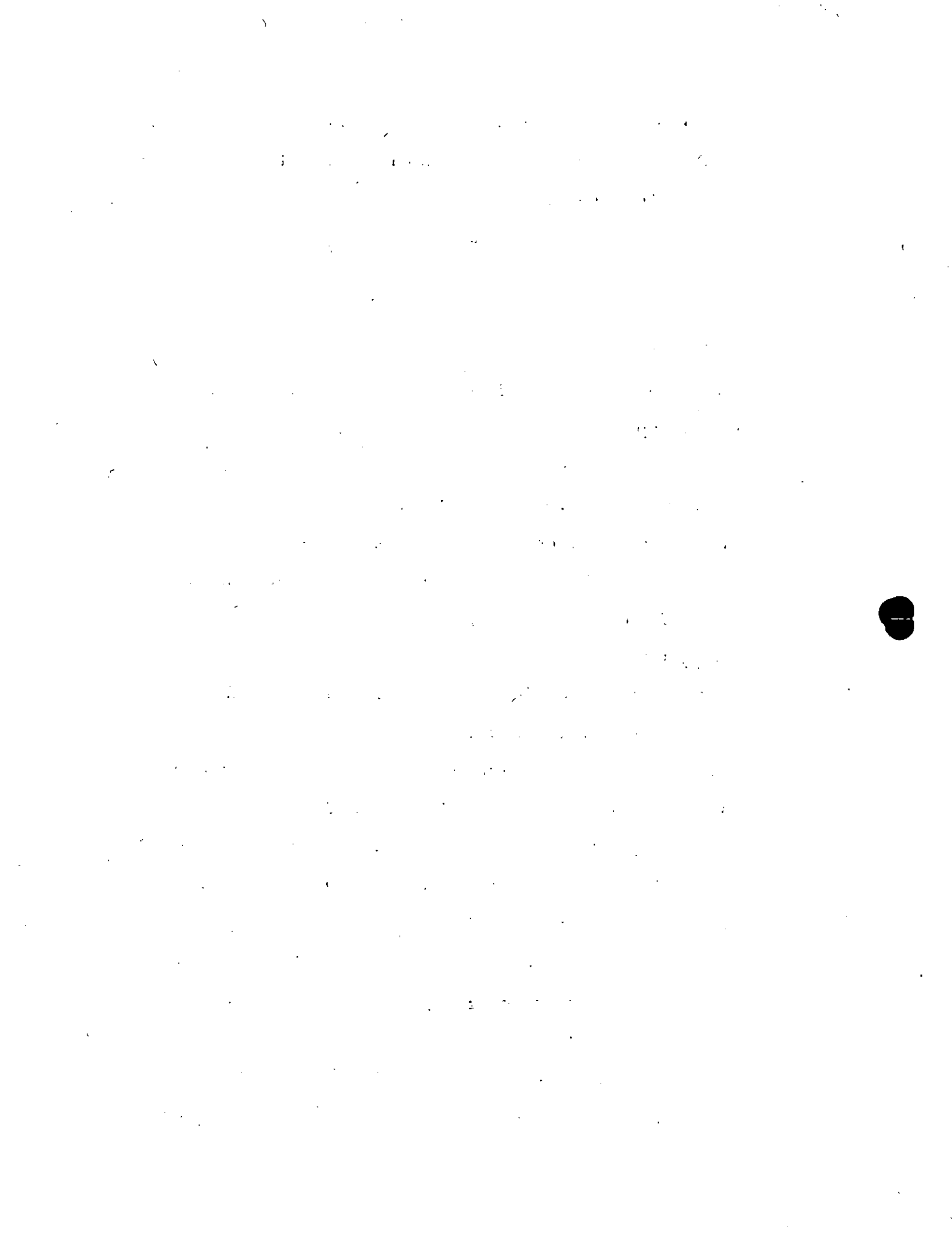
Con objeto de evaluar el comportamiento de una torre de enfriamiento se han desarrollado diferentes procedimientos, siendo los principales la elaboración de curvas o gráficas por parte de los fabricantes, en donde se suministra información sobre sus características a efecto de que pueda el propietario de la torre valorar su comportamiento.

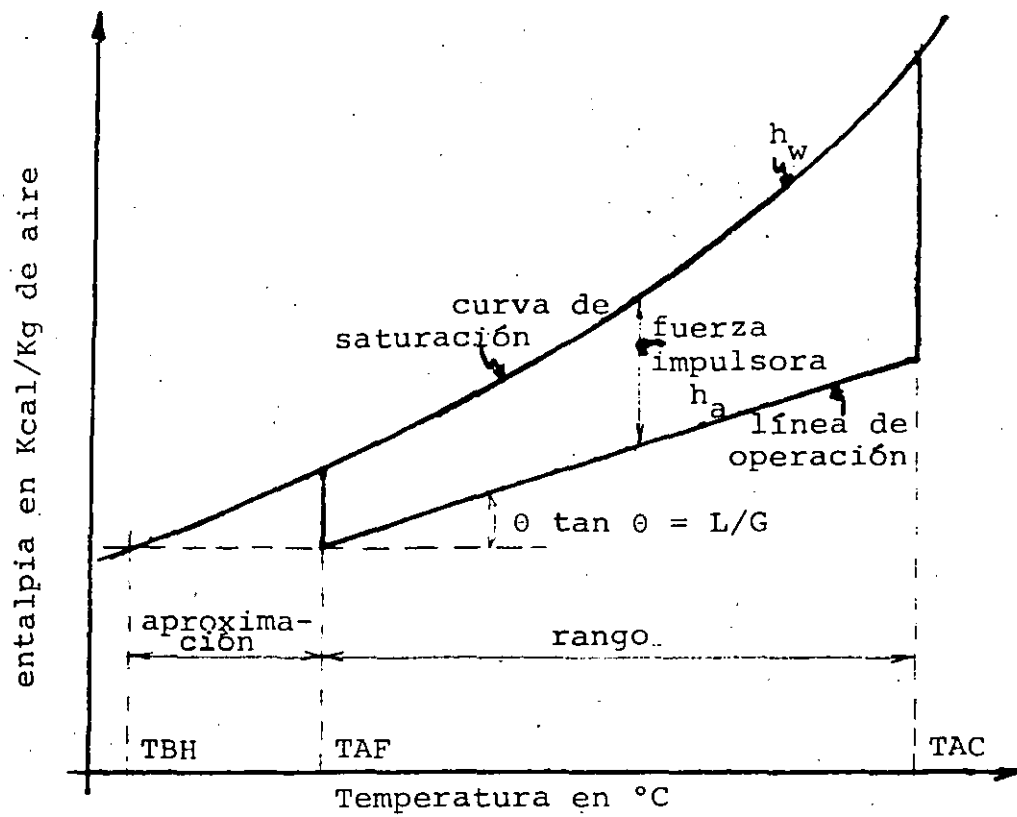
El comportamiento de una torre depende de diversas variables, algunas de las cuales pueden mantenerse constantes, como por ejemplo el relleno de una determinada torre y otras dependen de las condiciones atmosféricas que están cambiando constantemente como por ejemplo las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo; debido a que las torres de enfriamiento normalmente se especifican para un determinado flujo de agua, así como temperatura de entrada y temperatura de salida del agua para determinadas condiciones atmosféricas, es razonable que todos estos factores se vean afectados por un coeficiente de comportamiento para una torre determinada.

El tipo de transferencia de calor que tiene lugar en una torre de enfriamiento está representado por la siguiente ecuación:

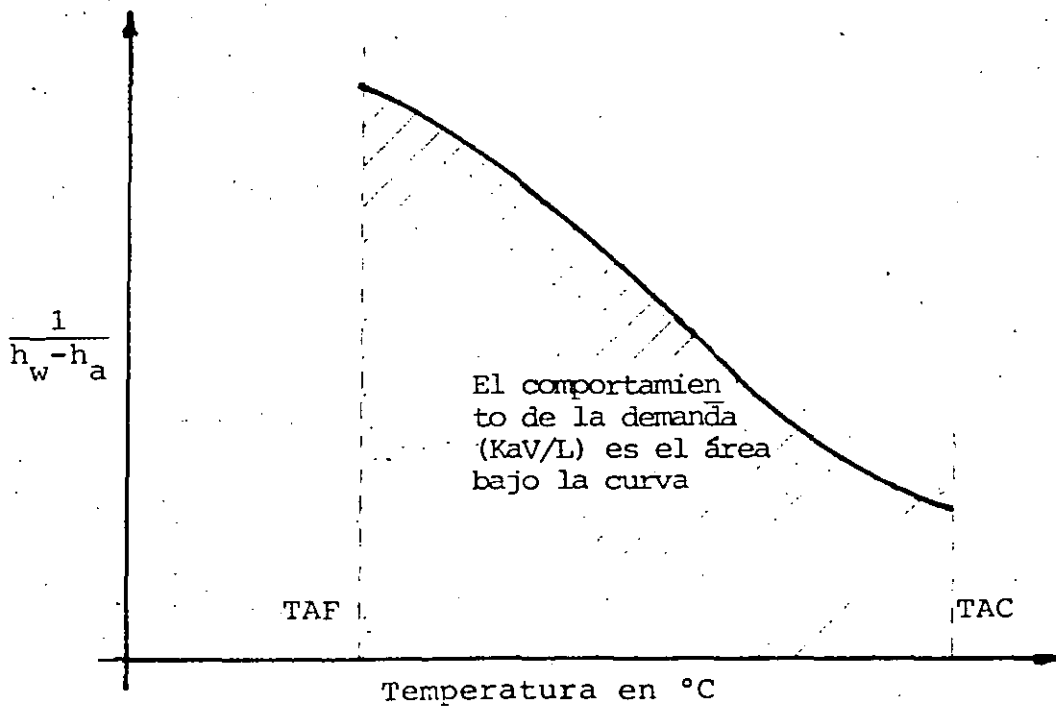
$$\frac{KaV}{L} \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h_w - h_a}$$

Esta ecuación conocida como la ecuación de Merkel puede representarse gráficamente por los diagramas de la Fig. 7.01; el significado de los términos se da en la Sección 7.02 PRUEBAS. El procedimiento de integración de esta ecuación se da en el Apéndice IV, que como se observa, la solución puede presentar alguna incomodidad, si no se cuenta con programas de computadora y facilidades para usarlo, que con frecuencia es difícil de tener en el campo. Debido a lo anterior el Instituto de Torres de Enfriamiento (Cooling Towers Institute - CTI), ha publicado unas curvas de comportamiento de torres de enfriamiento que incluye 821 páginas de curvas en papel logarítmico con la relación $\frac{L}{G}$ (agua o líquido a aire) como abscisa y $\frac{KaV}{L}$ (característica de la torre), como ordenada y las "aproximaciones" como parámetros; cada página representa una combinación fija de temperatura de bulbo húmedo y rango de enfriamiento. En la zona de baja temperatura del bulbo húmedo de 0, 20, 30, 40 y 45°F (-17.8, -6.3, -1.1, 4.4 y 7.2°C), se





a) Línea de operación y curva de saturación.



b) Evaluación de $\frac{1}{h_w - h_a}$

Fig. 7.01.- REPRESENTACION GRAFICA DE LA ECUACION DE MERKEL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

incluyen para rangos de enfriamiento de 10, 12, 14, 15, 16, 20, 24, 30, 40, 50, 60, 70 y 80°F (5.6, 6.7, 7.8, 8.3, 8.9, 11.1, 13.3, 16.7, 22.2, 27.6, 33.3, 38.9 y 44.4°C); en la zona de alta temperatura de bulbo húmedo los juegos de curvas se proporcionan para temperaturas de bulbo húmedo de 50, 52, 54, 56, 58 y de 60 a 90°F (10, 11.1, 12.2, 13.3, 14.4 y de 15.6 a 32.2°C) con incrementos de 1°F (0.56°C) para rangos de enfriamiento de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 35, 40, 50, 60, 80 y 100°F (2.2, 3.3, 4.4, 5.6, 6.7, 7.8, 8.3, 8.9, 10, 11.1, 12.2, 13.3, 14.4, 15.6, 16.7, 19.4, 22.2, 27, 33.3, 44.4 y 55.6°C). Las curvas de "aproximación" para todos los juegos de curvas son para 2 a 12°F (1.1 a 6.7°C) con incrementos de 1°F (0.56°C) para 14 a 30°F (7.8 a 16.7°C) con incrementos de 2°F (1.1°C) y para 30 a 100°F (16.7 a 55.6°C) con incrementos de 5°F (2.8°C); para temperaturas de agua caliente mayores de 200°F (93°C) o temperaturas de agua fría menores de 34°F (1.1°C) no se proporcionan curvas. Las curvas mencionadas se construyeron considerando que el efecto de la vaporización del líquido en los resultados es despreciable y que el flujo de la torre es de contracorriente, sin embargo, las curvas son aplicables a las torres de flujo cruzado con precisión aceptable.

La precisión de los cálculos o pruebas disminuye conforme las condiciones de pruebas se apartan de las de diseño, pero para los límites que se indican en el procedimiento de pruebas ATP-105 (Boletín del CTI) - las desviaciones son menores que las mencionadas de las mediciones de prueba. Se requiere medir o hacer correcciones del flujo de aire y de agua, cuando estos se apartan considerablemente de los del diseño, debido a que la carga de agua afecta la resistencia al flujo de aire. Un simple punto conocido de $\frac{L}{G}$ - contra $\frac{KaV}{L}$ es suficiente para predecir el comportamiento a varias temperaturas de bulbo húmedo y rangos de enfriamiento manteniendo $\frac{L}{G}$ constante, pero si esta relación varía, la curva característica de la torre se usa para predicciones.

Si no se dispone de la curva característica de la torre, se puede construir ésta trazando una línea recta entre dos o más puntos de $\frac{L}{G}$ contra $\frac{KaV}{L}$ en papel logarítmico, pero si únicamente se conoce un punto, se puede trazar la recta con la pendiente -0.6 dentro de límites razonables como se describe en el Boletín del CTI, ATP-105, traducido en el Apéndice V.

A continuación se incluye traducción con cinco ejemplos de los tipos de problemas de comportamiento que pueden resolverse, así como las gráficas de las figuras.

2, 3, 4, 5, 6 y 7 utilizadas, además de un ejemplo de cálculo de capacidad de una torre de enfriamiento con las Figs. 8 y 9 empleadas.

" Ejemplo No. 1. - DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE LA TORRE:

Una torre de enfriamiento de agua fue comprada para enfriar 10 000 gpm de 110°F a 90°F con 80°F temperatura de bulbo húmedo usando un total de 136 HP de potencia en la salida de la transmisión de los ventiladores. Los siguientes datos fueron obtenidos de una prueba de campo.

Régimen de agua de circulación,	8,950 gpm
Temperatura de agua caliente,	110 °F
Temperatura de agua fría,	84 °F
Rango de enfriamiento,	26 °F
Temperatura de bulbo húmedo,	69 °F
Aproximación,	15 °F
Total de caballos de potencia en la salida de la transmisión de los ventiladores	115 HP

El fabricante ha suministrado la Fig. 2 de acuerdo con el párrafo 6 del Boletín ATP - 105 del CTI.

Paso 1.- La L/G de diseño de la Fig. 2, es 1.37. Compute la $\frac{L}{G}$ de prueba, usando la ecuación (2) del ATP-105:

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{prueba}} = \frac{8,950}{10,000} \times \left(\frac{135}{115}\right)^{1/3} \times 1.37 = 1.30$$

Seleccione la curva de 69°F de TBH (WBT) y 26°F de rango de enfriamiento (valores de prueba mostrados en la Fig. 3). La intersección de la curva de 15°F de aproximación y la línea $\frac{L}{G} = 1.30$, ocurre en la ordenada 1.51, que es el $\frac{K_a V}{L}$ de prueba.

Paso 2.- El punto determinado en el primer paso se marca en la Fig. 4. Se traza una curva a través de este punto, paralela a la curva característica suministrada por el fabricante, intersectando a la curva de 10°F de aproximación a una $\frac{L}{G}$ de 1.45.

Paso 3.- La capacidad de la torre obtenida del párrafo 9 del ATP-105 es: $Q = \frac{1.45}{1.37} \times 100 = 105.8\%$.

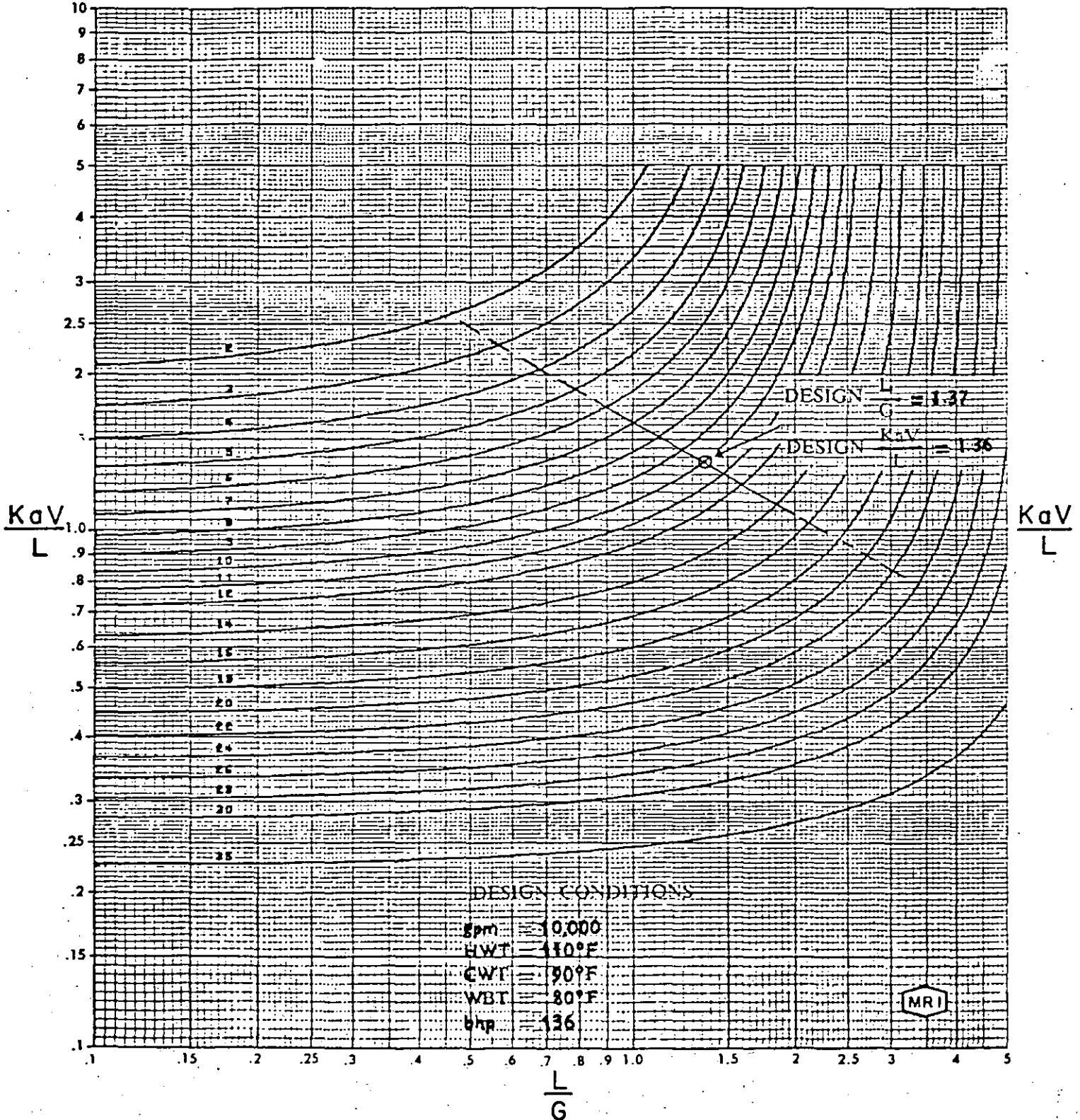
Ejemplo No. 2.- EFECTO DE LA TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.

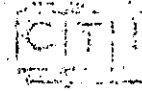
Usando el $\frac{K_a V}{L}$ de prueba contra el punto $\frac{L}{G}$ del ejemplo No. 1 de torre, ahora podemos predecir las temperaturas de agua fría de varias temperaturas de bulbo húmedo de operación. Si el rango de enfriamiento



80 WET BULB (°F)
20 RANGE (°F)

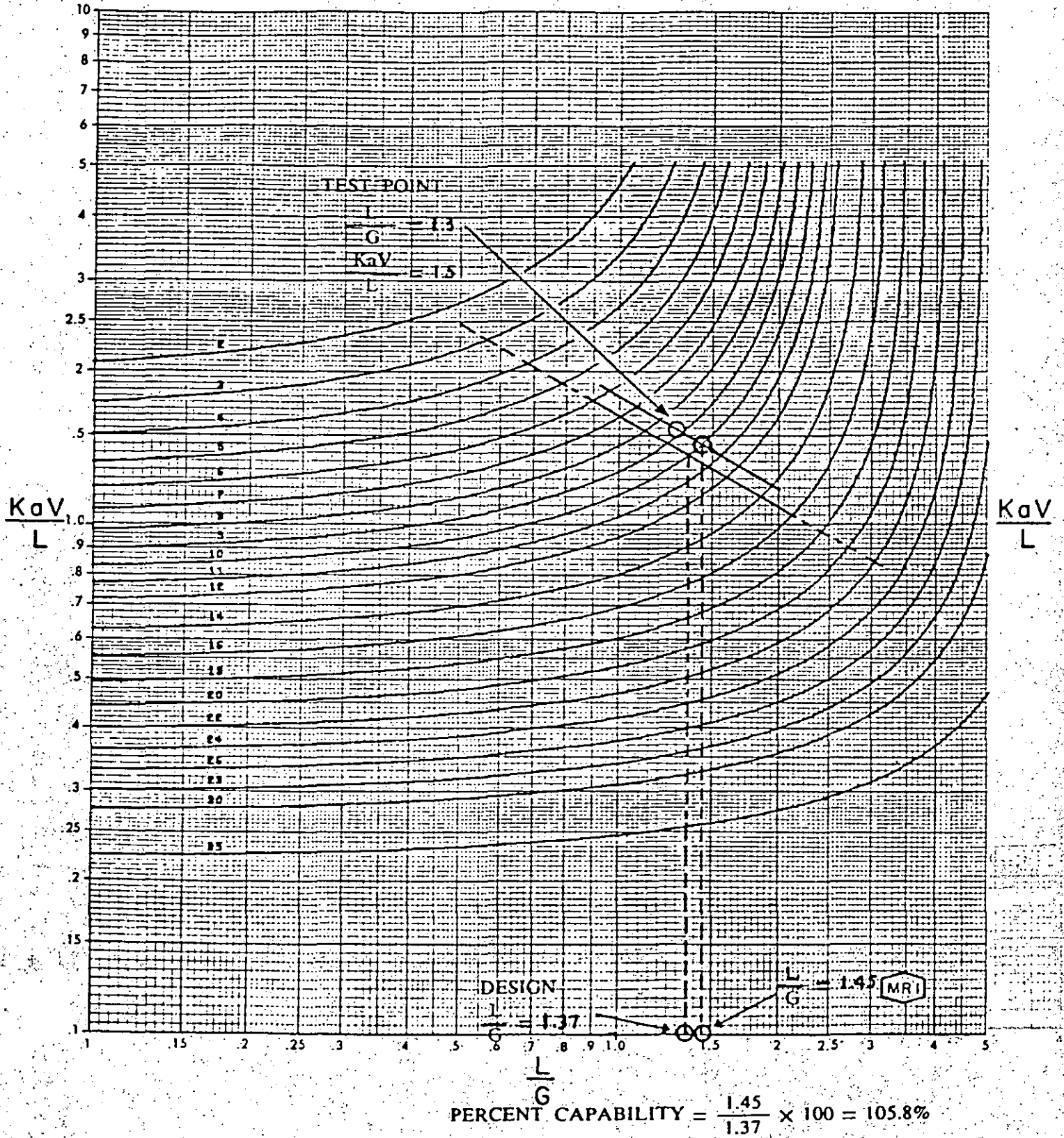
Figure 2





80 WET BULB (°F)
20 RANGE (°F)

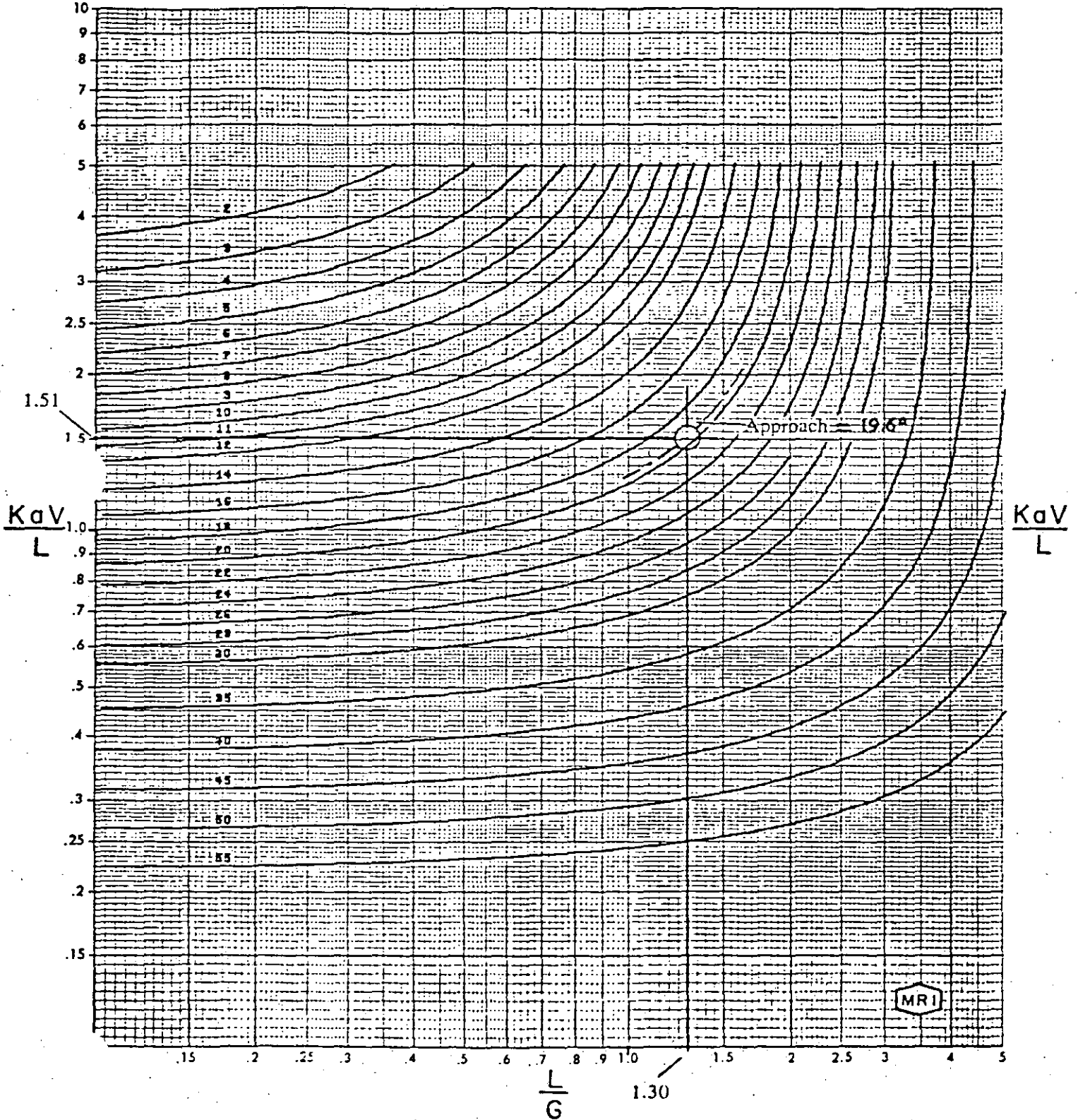
Figure 3

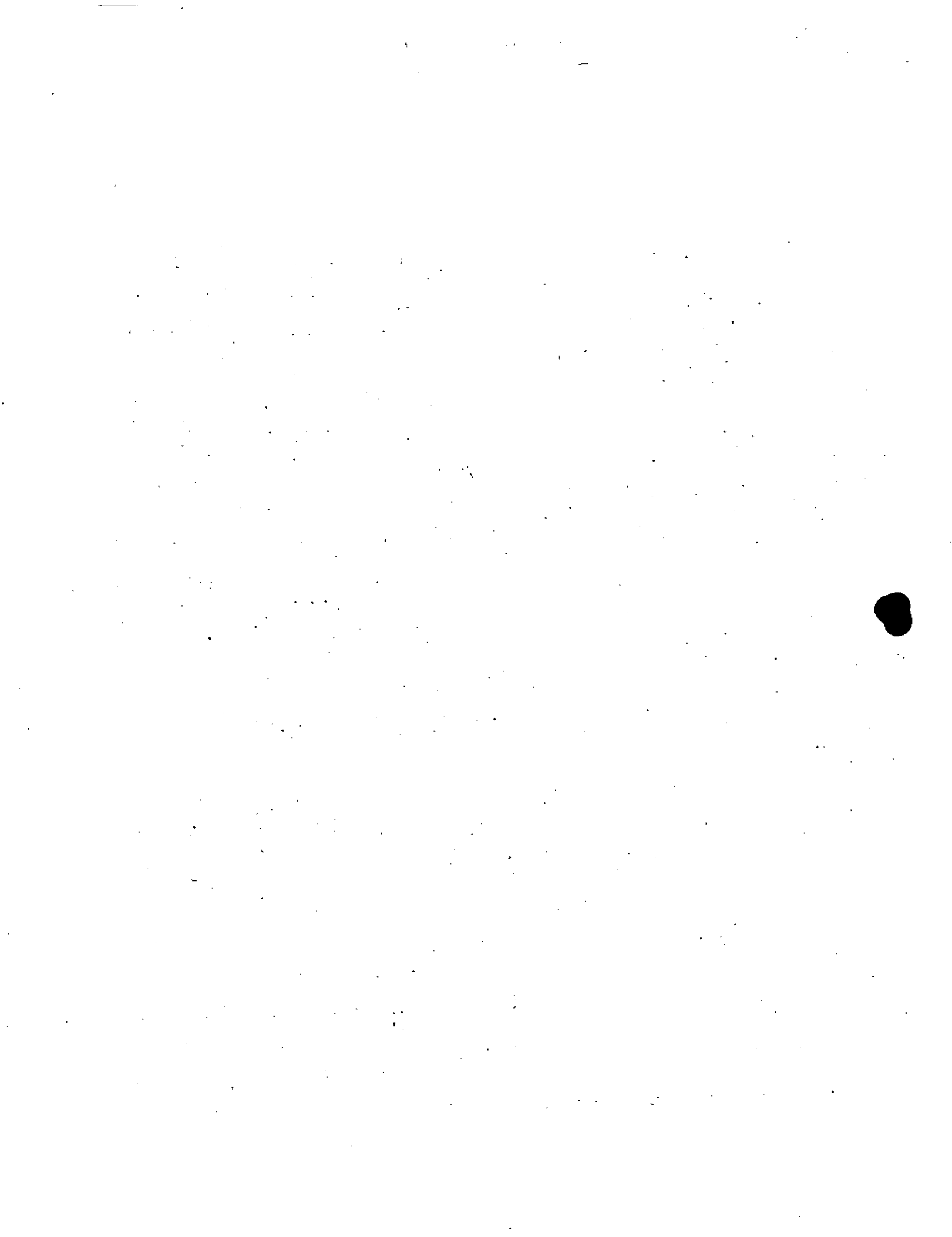




60 WET BULB (°F)
26 RANGE (°F)

Figure 4





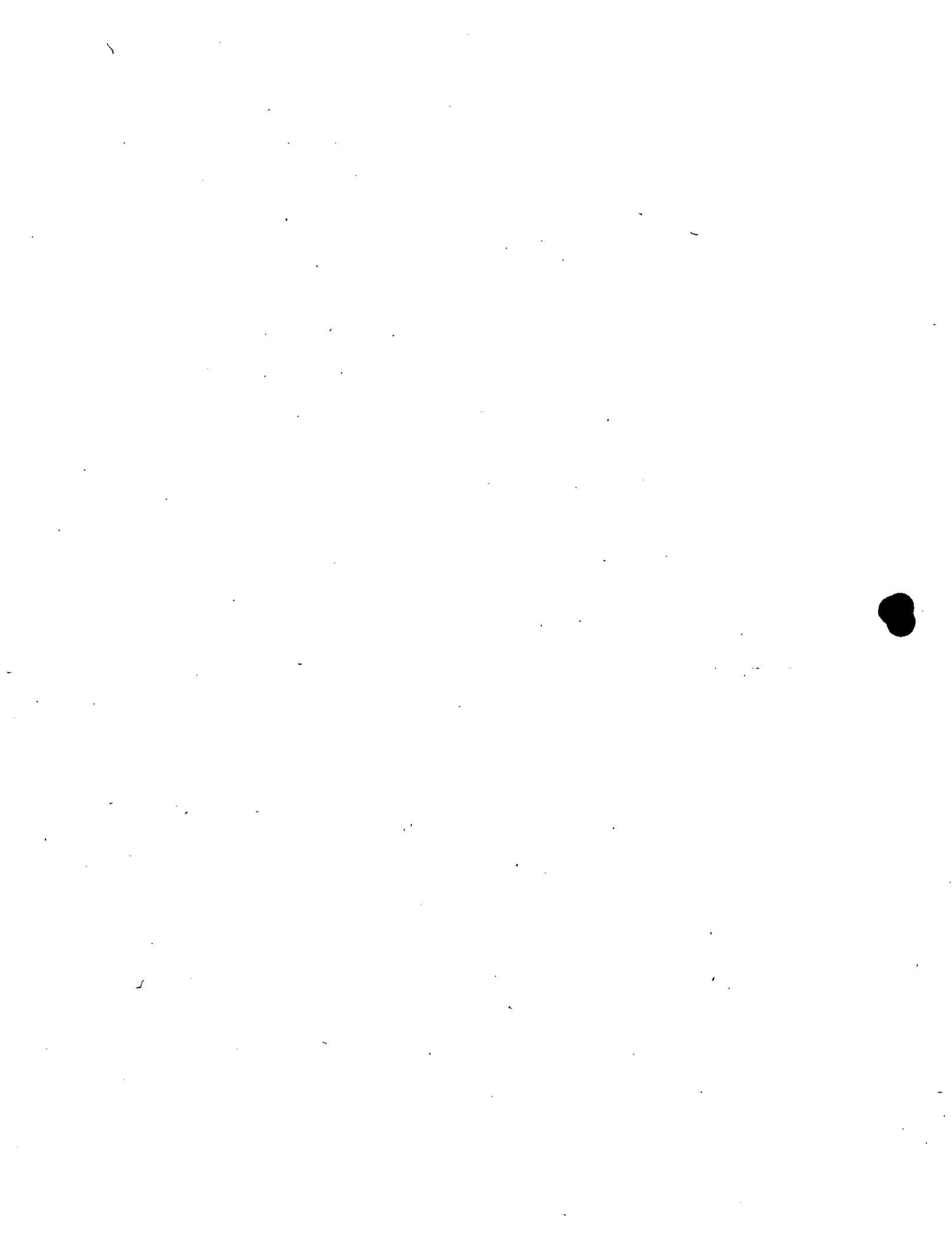
to, el flujo de agua y el flujo de aire permanecen -
constantes a los valores de prueba, pero la TBH -
(WBT) baja a 60°F, la Temperatura de Agua Fría TAF y
la Temperatura de Agua Caliente TAC (CWT y HWT) se -
predicen como sigue:

Seleccione la curva de 60°F de TBH (WBT) y 26°F de -
rango de enfriamiento. Dibuje el punto de prueba -
 $\frac{KaV}{L} = 1.51, \frac{L}{G} = 1.30$ (ver Fig. 5). Lea la aproxima
ción: 19.6°F. La TAF (CWT) es $60^\circ + 19.6^\circ = 79.6^\circ \text{ F}$,
y la TAC (HWT) es $79.6^\circ + 26^\circ = 105.6^\circ \text{ F}$.

Ejemplo No. 3.- EFECTO DEL RANGO DE ENFRIAMIENTO.

Usando el $\frac{KaV}{L}$ de prueba contra el punto $\frac{L}{G}$ del -
ejemplo No. 1 de torre, también podemos predecir tem
peraturas de agua fría (TAF) de varios rangos de en
friamiento TAC - TAF (HWT - CWT). Si la TBH (WBT),
el flujo de agua y el flujo de aire, permanecen cons
tantes, pero el rango de enfriamiento aumenta a 35°,
las TAF y TAC (CWT y HWT) se predicen como sigue:

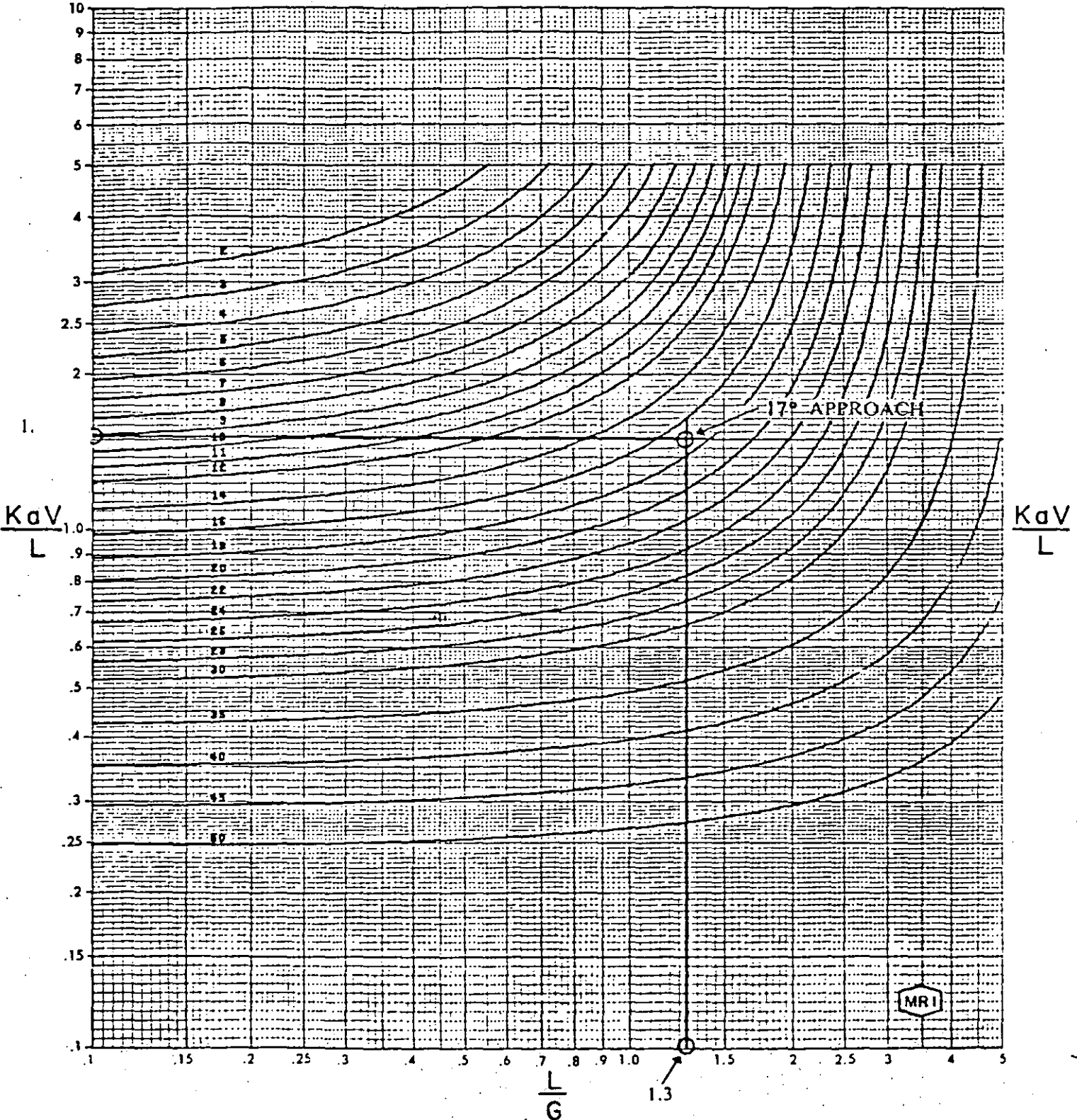
Seleccione la curva de 69°F de TBH (WBT) y 35°F de -
rango de enfriamiento (Fig. 6).- Marque el punto de
prueba $\frac{KaV}{L} = 1.51, \frac{L}{G} = 1.30$ (ver fig. 6). Lea la
aproximación: 17°F. La TAF (CWT) es $69^\circ \text{ F} + 17^\circ =$
 86° F y la TAC (HWT) es $86^\circ + 35^\circ = 121^\circ \text{ F}$.

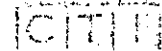




69 WET BULB (°F)
35 RANGE (°F)

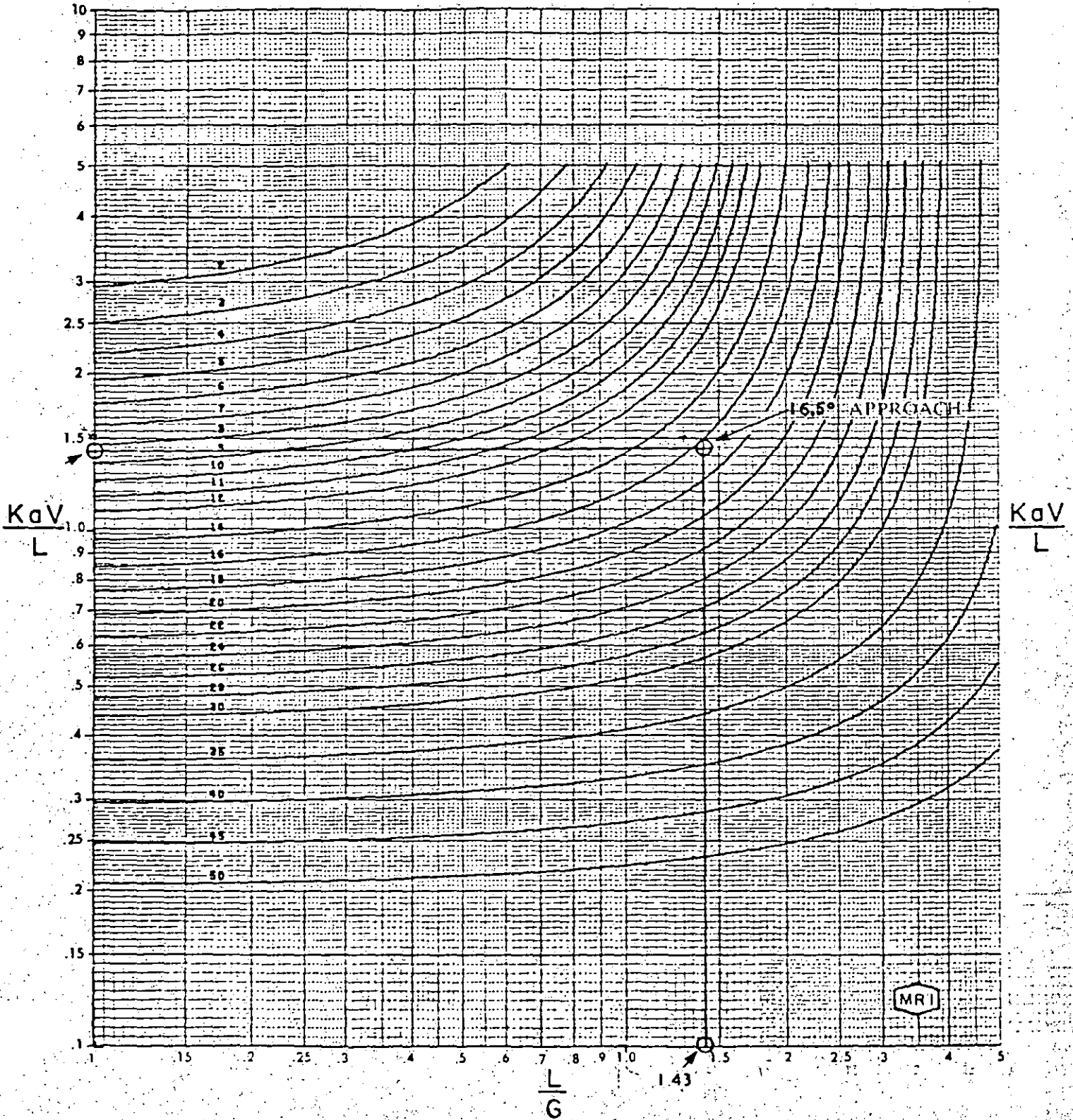
Figure 5

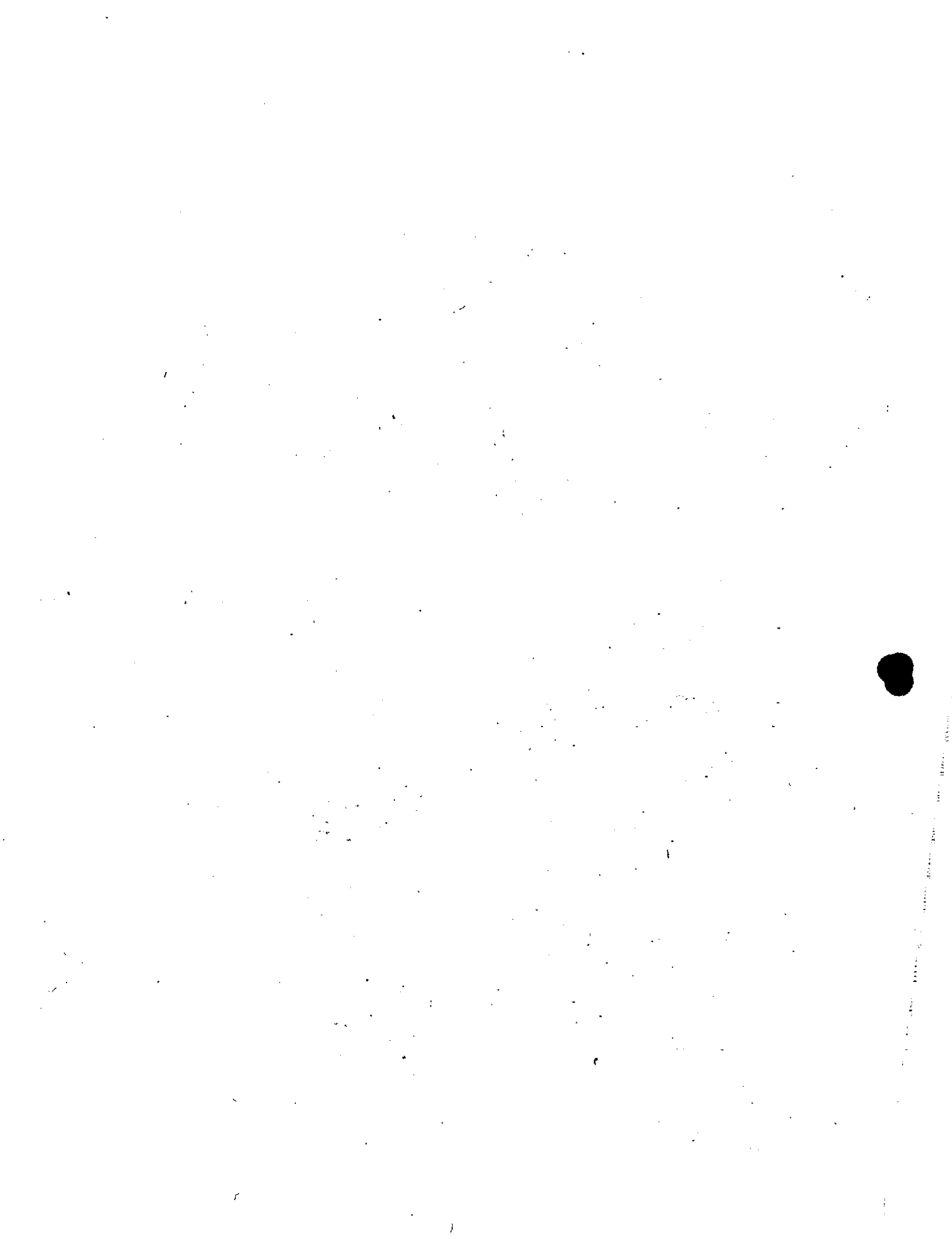




69 WET BULB (°F)
26 RANGE (°F)

Figure 6





Ejemplo No. 4.- EFECTO DEL REGIMEN DE AGUA DE CIRCULACION.

Suponga ahora que el régimen de agua de circulación, del ejemplo No. 1 de torre se incrementa 10%, conservando el flujo de aire, rango de enfriamiento y TBH (WBT) constantes.- Utilizando la curva característica de prueba (descrita en el paso dos del ejemplo 1 y mostrada como la línea más alta en la figura 4), - las TAF y TAC (CWT y HWT) se predicen como sigue:

Nuevo régimen de circulación = $8,950 \times 1.1 = 9,845$ gpm.

$$\text{Nueva } \frac{L}{G} = 1.30 \times 1.1 = 1.34.$$

La nueva $\frac{KaV}{L}$ se lee de la figura 4 en la intersección de la curva característica de prueba y la $\frac{L}{G} = 1.43$: $\frac{KaV}{L} = 1.43$.

Seleccione la curva para 59°F de TBH y 16°F de rango de enfriamiento (condiciones de prueba). La intersección de $\frac{KaV}{L} = 1.43$ y la línea $\frac{L}{G} = 1.43$ ocurre a una aproximación de 16.5°F (ver Fig. 6). La TAF correspondiente es $69^{\circ} + 16.5^{\circ} = 85.5^{\circ}\text{F}$ y la TAC (HWT) es $85.5^{\circ} + 26^{\circ}\text{F} = 111.5^{\circ}\text{F}$.

Ejemplo No. 5.- EFECTO DEL SUMINISTRO DE AIRE.

Suponga que el suministro de aire del ejemplo 1 de torre se incrementa 10%, sin cambio en el régimen de agua de circulación, rango de enfriamiento y TBH (WBT). La TAF y la TAC (WCT y HWT) pueden predecirse como sigue:

$$\text{Nueva } \frac{L}{G} = \frac{1.30}{1.10} = 1.18$$

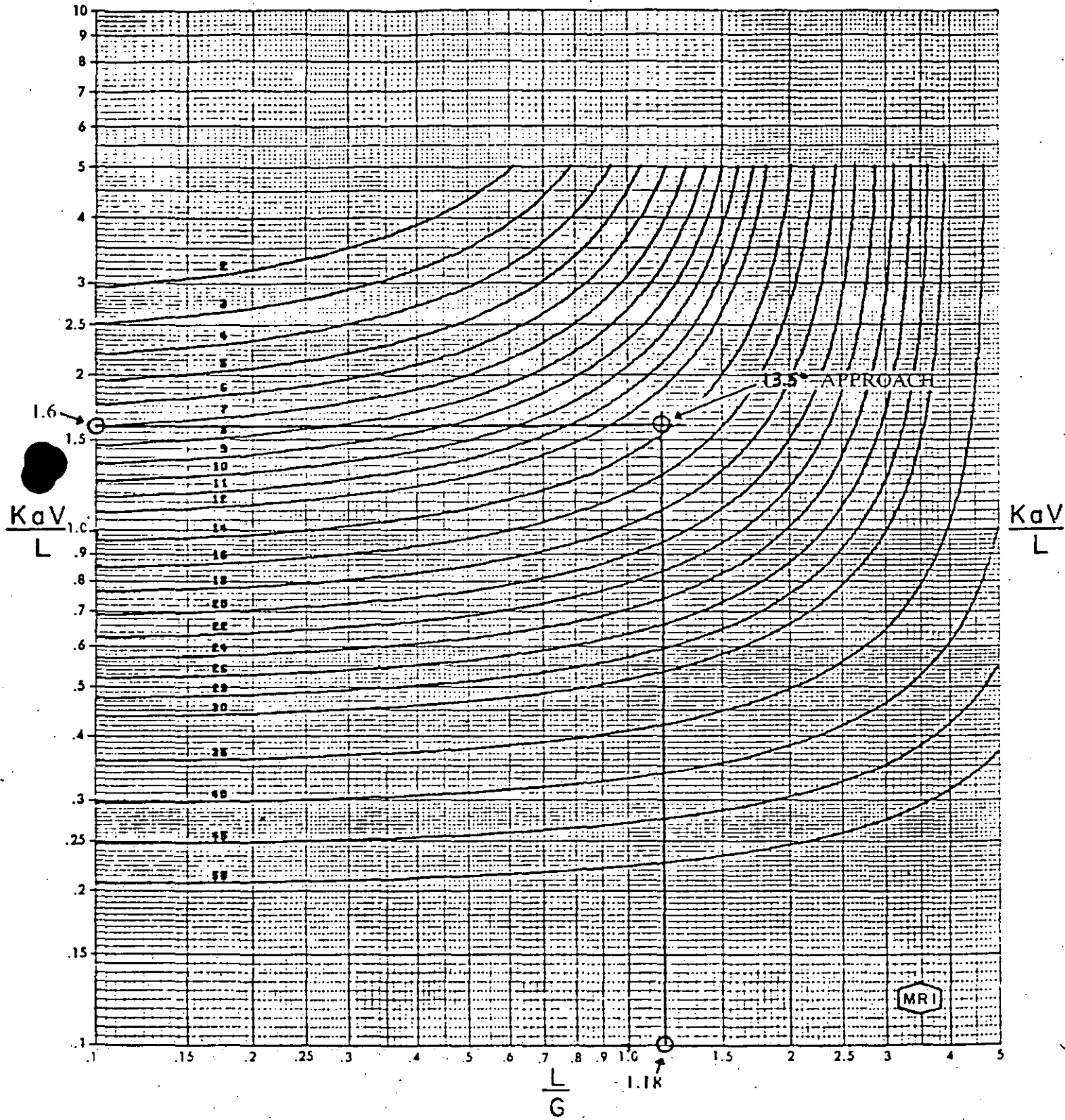
La nueva $\frac{KaV}{L}$ se lee de la figura 4 en la intersección de la curva característica de prueba y la línea $\frac{L}{G} = 1.18$: $\frac{KaV}{L} = 1.60$.

Seleccione la curva de 69°F de TBH (WBT) y 26°F de rango de enfriamiento (condiciones de prueba). La intersección de $\frac{KaV}{L} = 1.60$ y $\frac{L}{G} = 1.18$ ocurrirá a una aproximación de 13.5°F (ver Fig. 7).- La TAF (CWT) correspondiente es 69°+ 13.5°= 82.5°F y la TAC (HWT) es 82.5°+ 26°= 108.5°F.



69 WET BULB (°F)
26 RANGE (°F)

Figure 7



EJEMPLO DE CALCULO DE CAPACIDAD DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CON EL ATP - 105

Las curvas de comportamiento mencionadas proporcionan un método conveniente para ahorrar tiempo en la evaluación de los efectos de las variables en las torres de enfriamiento. Todos los problemas de comportamiento de los ejemplos 1 a 5 anteriores, resueltos con el uso de curvas, pueden resolverse también, con cálculo directo pero empleando mayor tiempo y esfuerzo. Para ilustrar lo anterior, a continuación se resolverá un problema sin el uso de estas curvas.

Ejemplo de determinación de capacidad de una torre.-

Una torre de enfriamiento de agua se compró para enfriar 10 000 GPM (38 750 lpm), desde 110°F (43.3°C), a 90°F (32.2°C) con una temperatura de bulbo húmedo de 80°F (26.7°C), empleando un total de 136 HP en la transmisión a los ventiladores. Durante una prueba de campo se obtuvieron los siguientes datos :

Flujo de agua de circulación,	8950 GPM (33,875 lpm)
Temperatura de agua caliente,	110°F (43.3°C)
Temperatura de agua fría,	84°F (28.9°C)
Rango de enfriamiento,	26°F (14.4°C)
Temperatura de bulbo húmedo,	69°F (20.6°C)
Aproximación,	15°F (8.3°C)
Potencia en la transmisión a los ventiladores,	115 HP

El fabricante suministró los datos mostrados en la Fig. 8 de acuerdo con el párrafo 6 del Boletín ATP-105 del CTI.

Paso 1.- La relación L/G de diseño, de acuerdo con la Fig. 8 es 1.37; para calcular la relación L/G de prueba, se emplea la ecuación 2 del ATP-105

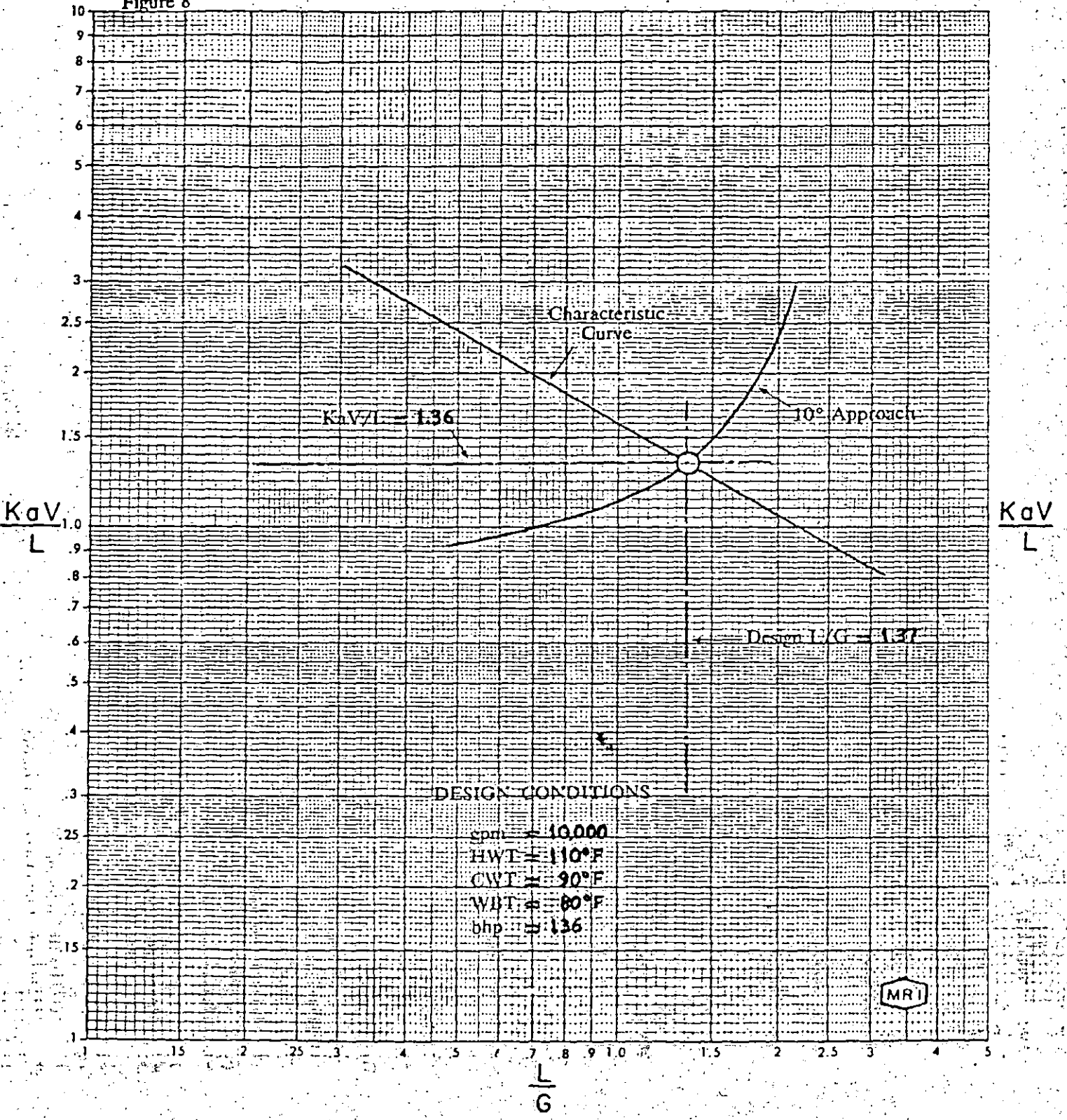
$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{prueba}} = \frac{8950}{10000} \times \left(\frac{136}{115}\right)^{1/3} \times 1.37 = 1.30$$

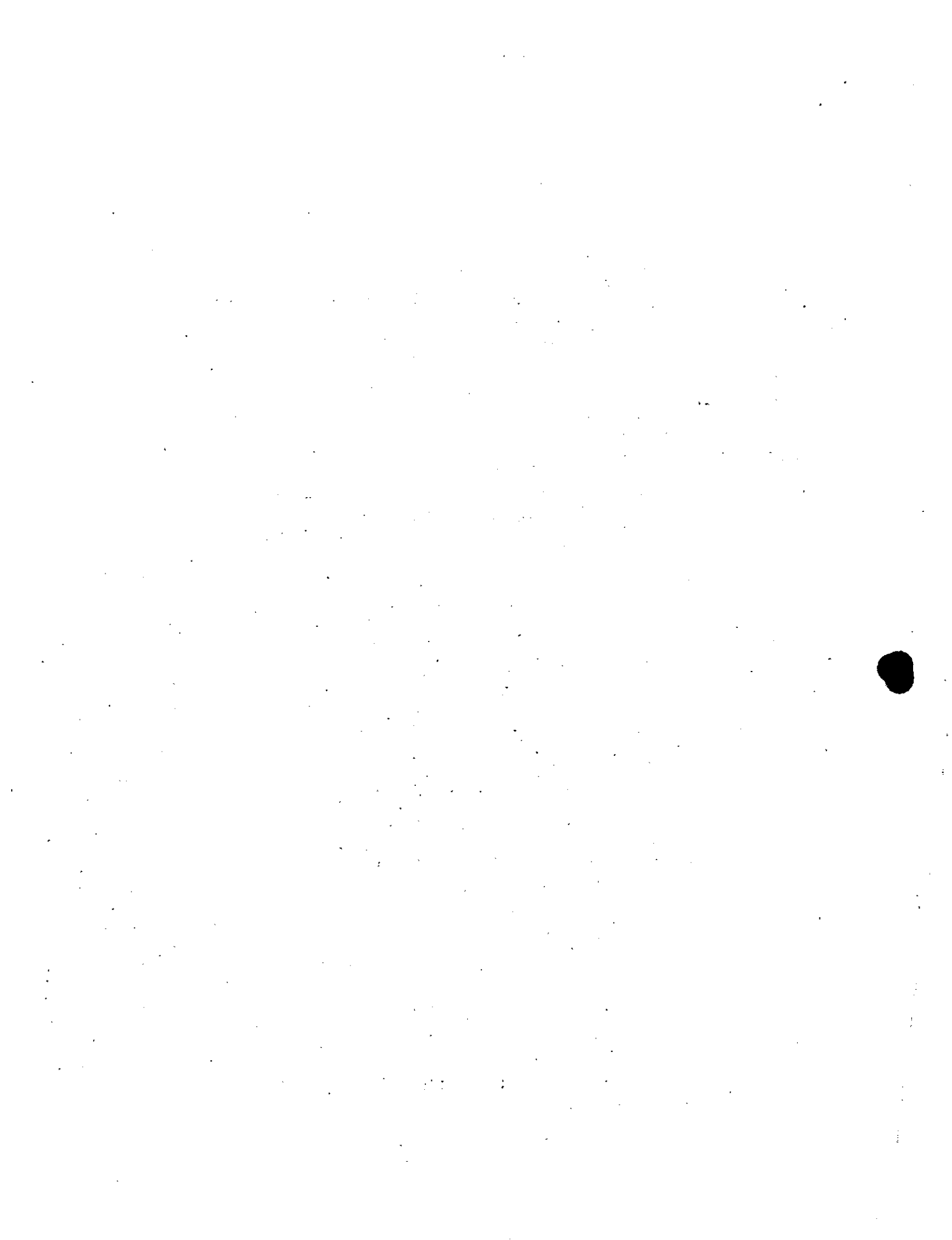
Paso 2.- El valor de la característica de la torre KaV/L se calcula empleando los valores de prueba de temperatura de agua caliente, temperatura de agua fría, temperatura de bulbo húmedo y la relación L/G por el procedimiento descrito en el párrafo 8 del ATP-105 (Apéndice IV).



WET BULB (°F)
RANGE (°F)

Figure 8





$$KaV/L = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h_w - h_a} \approx \frac{T_1 - T_2}{4} \left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right]$$

$$KaV/L = \frac{110-84}{4} (0.0676 + 0.0640 + 0.0571 + 0.0441) = 1.51$$

Paso 3.- El punto del valor de prueba KaV/L contra L/G de los pasos 1 y 2 se grafica en la Fig. 9. La curva característica de prueba para la torre se construye dibujando una línea a través de este punto paralelo a la curva característica suministrada por el fabricante (Ver Fig. 8). La nueva curva intersecta la curva de aproximación de $10^\circ F$ ($5.6^\circ C$), en la relación L/G de 1.45.

Paso 4.- La capacidad de la torre de acuerdo con el párrafo 9 del ATP - 105 es :

$$Q = \frac{1.45}{1.37} \times 100 = 105.8\%$$

Existen otros tipos de gráficas para casos específicos pero los mencionados son los más apropiados por la amplitud, precisión y aceptación general.

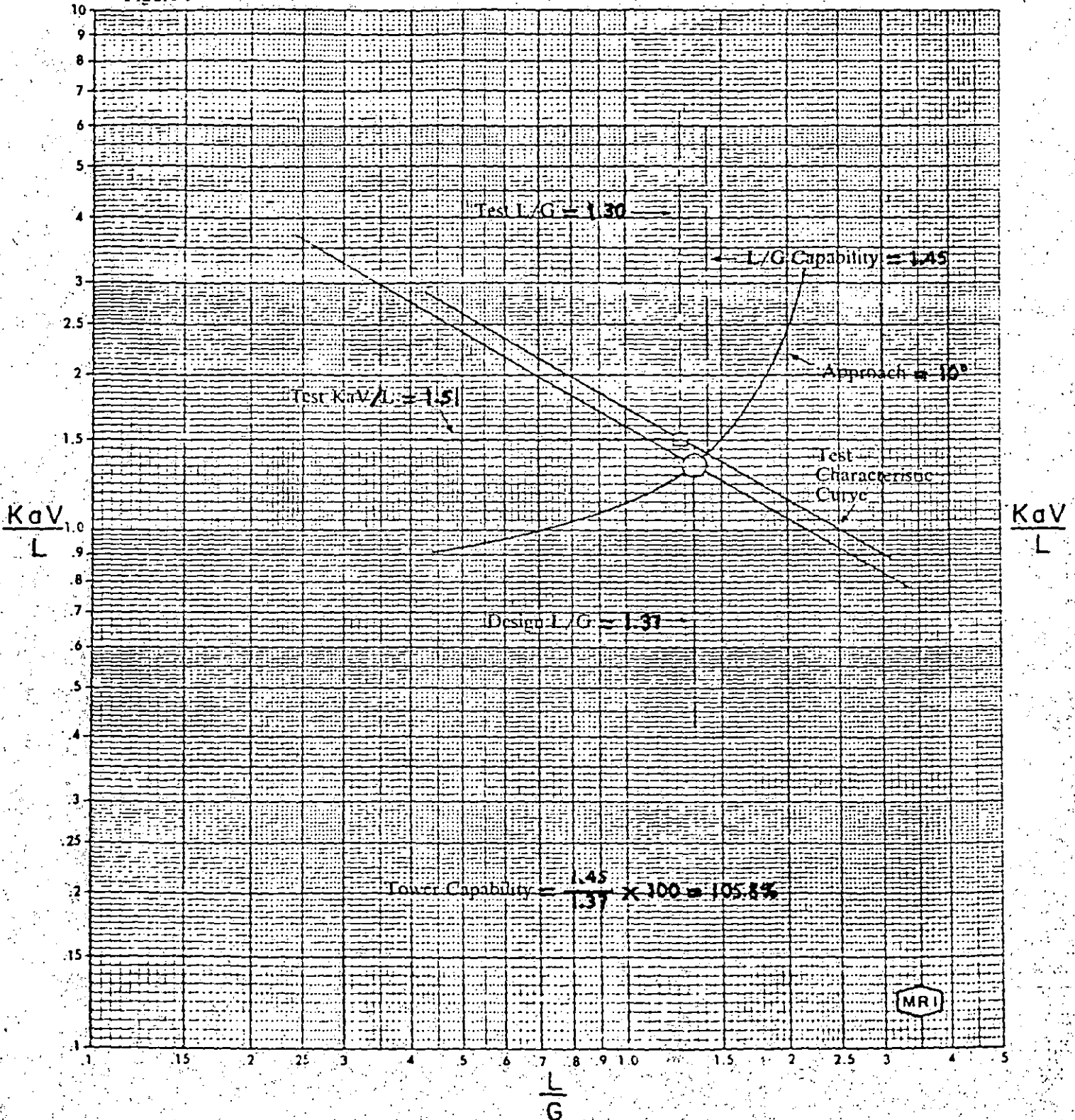
El efectuar un balance térmico de una torre de enfriamiento es de dudosa utilidad debido a la precisión de las mediciones que se requieren; en su lugar se utiliza las curvas características mencionadas anteriormente y que deben ser proporcionadas por el fabricante.

Los principales factores que afectan el comportamiento de las torres de enfriamiento son los siguientes :



WET BULB (°F)
RANGE (°F)

Figure 9



- mala distribución del agua por orificios o válvulas tapados que impidan una distribución uniforme del agua.
- condiciones de trabajo del equipo mecánico, debiendo estar las aspas de los ventiladores ajustadas a su ángulo correcto y los motores trabajando a las cargas especificadas.
- los eliminadores de humedad deben estar limpios y libres de algas y depósitos que impidan el flujo normal de aire.
- los rellenos deben estar libres de materias extrañas como aceite, grasa, incrustación o algas.
- el nivel de agua en la pileta de agua fría debe mantenerse al nivel normal de operación.

Para un diseño dado de torre de enfriamiento y bajo condiciones buenas de mantenimiento, de acuerdo con los puntos anteriores, la capacidad de enfriamiento de una torre es afectada por los siguientes factores:

- flujo de agua
- flujo de aire
- temperatura de bulbo húmedo
- temperatura de agua caliente

7.02 P R U E B A S

Las torres de enfriamiento, al igual que los demás equipos de las plantas termoeléctricas se deben someter a diferentes tipos de pruebas, entre las que se encuentran las siguientes :

- Pruebas de aceptación.
- Pruebas de comportamiento absoluto.
- Pruebas de comportamiento rutinario.

Las pruebas de aceptación son las que se realizan en el equipo nuevo para verificar el cumplimiento de las garantías ofrecidas por el fabricante.

Las pruebas de comportamiento absoluto son las que realiza el propietario del equipo periódicamente antes o después de mantenimientos para verificar su comportamiento o la efectividad de los trabajos realizados; el procedimiento básicamente es el mismo que el de las pruebas de aceptación.

Las pruebas de comportamiento rutinario son las que se utilizan con mayor frecuencia en el equipo, utilizando la instrumentación normal de la planta para detectar en primera estancia posibles desviaciones del comportamiento.

Existen dos códigos de prueba formales para las to-

rres de enfriamiento, el PTC-23 de la ASME y el ATP 105 del CTI.

PROPOSITO DE LAS PRUEBAS.

El propósito de las pruebas es el de determinar la capacidad de enfriamiento de agua de una torre.

Adicionalmente podrán tomarse datos para determinar la causa de la baja capacidad, en caso necesario.

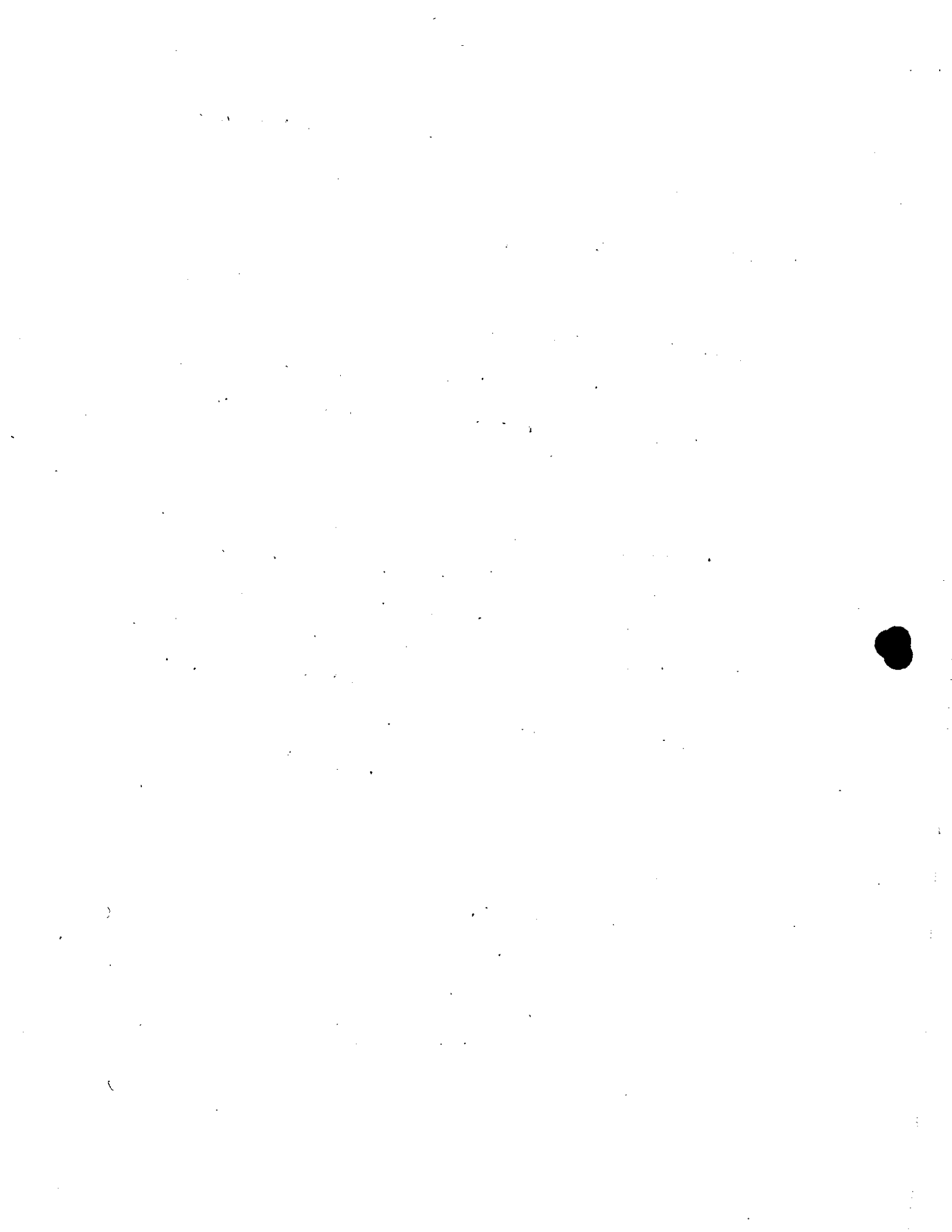
CONDICIONES DE PRUEBA

La prueba deberá efectuarse con buenas condiciones de limpieza y mantenimiento de la torre de enfriamiento; para asegurar lo anterior se seguirán los procedimientos aplicables, descritos en los manuales de mantenimiento de los fabricantes y en las recomendaciones dadas en este trabajo.

La prueba deberá efectuarse a plena carga y cuando menos durante una hora, permitiéndose antes un tiempo para estabilizar la carga.

Toda la instrumentación requerida para la prueba, deberá verificarse y calibrarse antes de ésta.

Deberá procurarse efectuar la prueba lo más cerca posible de las condiciones de diseño, dentro de los siguientes límites :



flujo de agua de circulación, en lpm	cada 20 min.
columna de bombeo, en m	cada 20 min.
potencia de los ventiladores, en HP	cada hora
velocidad del viento, en km/h	cada 10 min.
temperatura agua de repuesto, en °C	cada 30 min.
flujo de agua de repuesto en lpm	cada 30 min.
temperatura de agua de purga, en °C	cada 30 min.
flujo de purgas, en lpm	cada 30 min.

dentro de lo posible, se eliminarán las purgas y el repuesto, durante la prueba.

INSTRUMENTACION Y DATOS REQUERIDOS

Los datos requeridos son los siguientes :

- temperatura de entrada de agua caliente, determinada con termopares calibrados.
- temperatura de salida de agua fría, determinada con termopares calibrados.

- flujo de agua de circulación, determinado por medio de tubos de Pitot, o bien, por presión diferencial en las cajas de agua del condensador.
- temperatura de bulbo húmedo, determinada con psicrómetro de aspiración mecánico o manual.

La precisión de las lecturas requeridas deberán ser las siguientes :

- temperatura $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
- presión diferencial ± 0.25 mm de Hg

A continuación se describe el procedimiento del CTI (ATP-105) para determinar la capacidad de una torre de enfriamiento cuando se conocen sus características en la forma de $\frac{KaV}{L}$ contra $\frac{L}{G}$, un ejemplo de cálculo y la nomenclatura utilizada.

"DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CUANDO SE CONOCEN LAS CARACTERISTICAS DE LA TORRE EN LA FORMA DE KaV/L CONTRA L/G DEL FABRICANTE

El fabricante debe proporcionar la curva característica de la torre en la forma de curva KaV/L , contra la relación flujo de agua a flujo de aire, L/G de la torre, indicando el valor de L/G de diseño para usarse en las pruebas de evaluación; estas curvas deberán cubrir un 10% arriba y un 10% abajo del punto de diseño y deberán ajustarse a la ecuación de la siguiente forma :

$$KaV/L = C(L/G)^{-0.6} \quad (1)$$

Sobre la misma gráfica, deberá mostrarse una curva representando la "aproximación" de diseño, el rango de diseño y la temperatura de bulbo húmedo de diseño, pasando por la curva característica de la torre en el punto de diseño L/G .

DETERMINACION DEL VALOR DE LA RELACION L/G DE PRUEBA

A partir de los valores del flujo de agua y de la potencia de los ventiladores obtenidos durante la prueba, se calculará el valor de la relación L/G en la siguiente forma :

$$(L/G) \text{ prueba} = \frac{\text{lpm (prueba)}}{\text{lpm (diseño)}} \times \left(\frac{\text{HP diseño}}{\text{HP prueba}} \right)^{1/3} \times (L/G) \text{ diseño} \quad (2)$$

El valor $(L/G)_{\text{diseño}}$ se tomará de la curva característica de la torre del fabricante y a partir de este punto se traza una curva paralela a la curva característica de la torre y en la intersección con la línea de aproximación de diseño se obtiene el valor (L/G) de prueba al cual la torre producirá la temperatura de agua fría de diseño y el rango de diseño a la temperatura de bulbo húmedo.

La capacidad de la torre en % del flujo de agua de diseño, es la relación de L/G determinado en la forma anterior a la L/G de diseño multiplicada por 100.

L I M I T A C I O N E S .

La precisión de la prueba se afecta si las condiciones se alejan mucho de los límites dados en la parte "Condiciones de Prueba"

EJEMPLO DE CÁLCULO.

Las condiciones de diseño de una torre de enfriamiento son las siguientes :

flujo de agua	37 850 lpm
temperatura de agua caliente	46.1 °C
temperatura de agua fría	29.4 °C
temperatura de bulbo húmedo	29.4 °C
HP totales de los ventiladores	240

Los resultados de las pruebas fueron los siguientes:

flujo de agua	34 630 lpm
temperatura de agua caliente	40.4 °C
temperatura de agua fría	26.3 °C
temperatura de bulbo húmedo	22.8 °C
HP totales de los ventiladores	216

La curva suministrada por el fabricante se muestra en la gráfica de la Fig. 7.02 e indica que el valor de diseño de la relación L/G es de 0.86, el cual se usará para evaluar la capacidad de la torre.

El valor de la característica de la torre KaV/L se calcula usando los valores de prueba de temperatura de agua caliente (TAC), agua fría (TAF) y bulbo húmedo (TBH), empleando el valor de prueba de la relación L/G calculado de la ecuación (2):

$$(L/G)_{\text{prueba}} = \frac{34\ 633}{37\ 850} \times \left(\frac{240}{216}\right)^{1/3} \times 0.86 = 0.815$$

El procedimiento de cálculo de KaV/L se indica en el Apéndice IV obteniéndose el siguiente valor :

$$KaV/L = 2.355$$

El punto determinado con los valores anteriores de la relación $(L/G)_{\text{prueba}}$ y de KaV/L se marca en la curva característica del fabricante y a partir de dicho punto, se traza una curva paralela a la curva característica del fabricante; la curva así trazada

característica de la torre, KaV/L

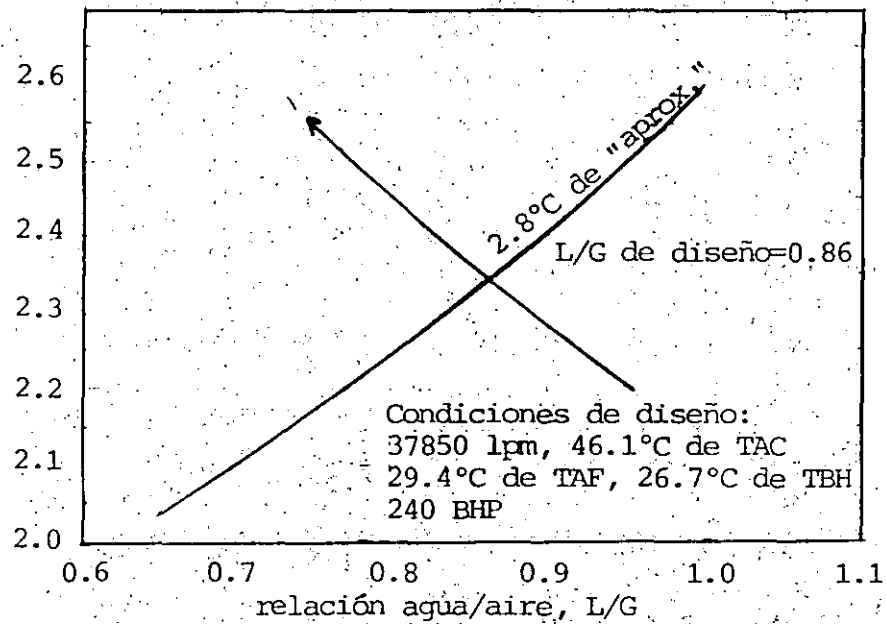
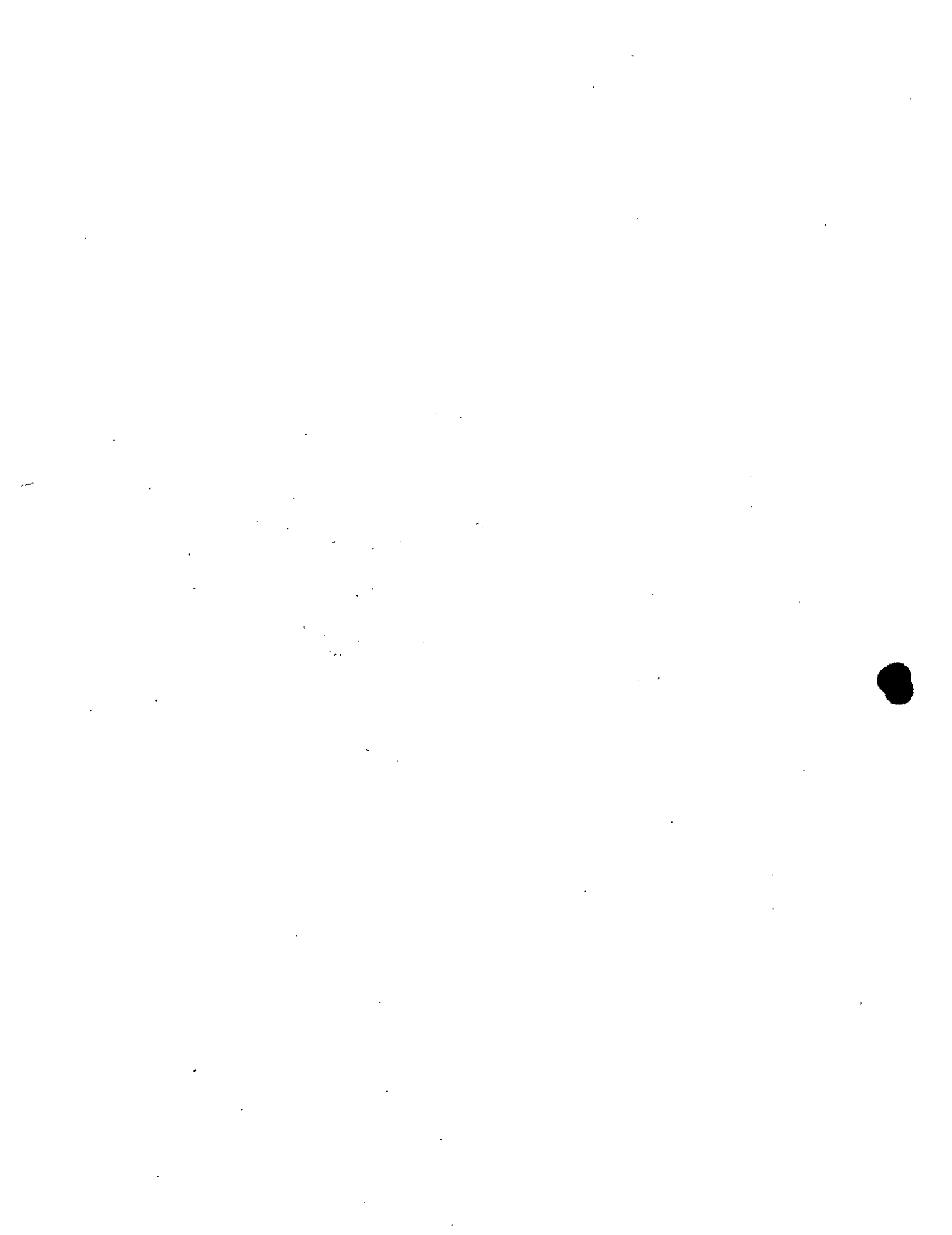


FIG. 7.02.- CURVA CARACTERISTICA DE LA TORRE PROPORCIONADA POR EL FABRICANTE



intersecta a la curva de 2.8°C de "aproximación". en la relación L/G de 0.840. (Fig. 7.03)

La capacidad de la torre se obtiene en la siguiente forma :

$$CAP = \frac{0.840}{0.860} \times 100 = 97.7\%$$

Basados en el comportamiento de la prueba, la torre tiene una capacidad de 36 979 lpm (0.977 x 37 850) cuando enfría agua de 46.1 °C a 29.4°C con una temperatura de bulbo húmedo de 26.7°C

N O M E N C L A T U R A

a = área de transferencia superficial por unidad de volumen de torre, en m^2/m^3

HP = caballos de potencia

C = constante

G = masa del flujo de aire seco, en $kg/h m^2$ de área plana

h = entalpia de la mezcla aire-vapor de agua, en kcal/kg aire seco.

ha = entalpia de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo, en kcal/kg aire seco.

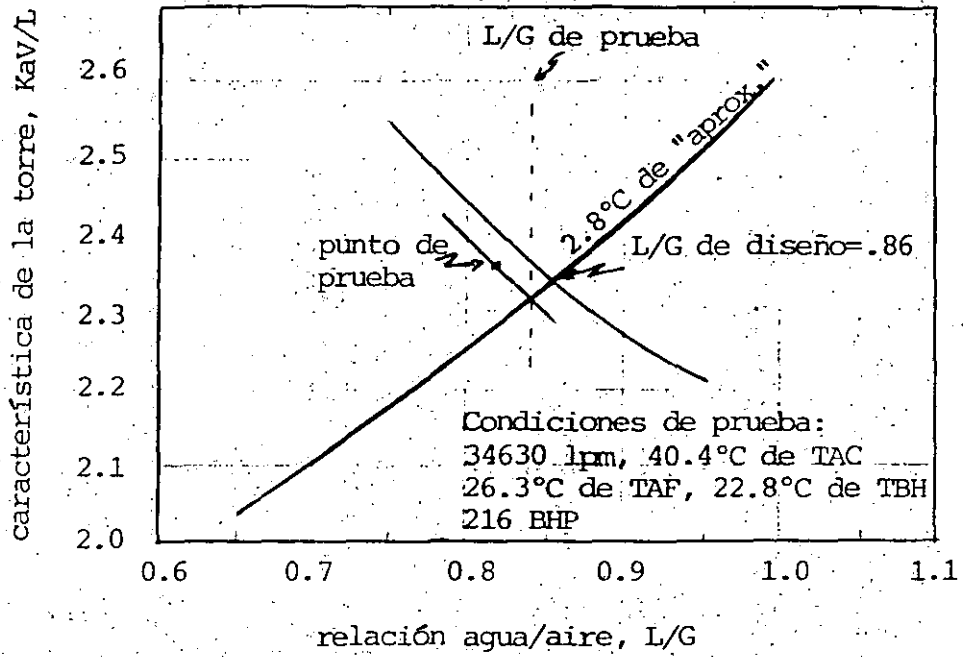


FIG. 7.03.- DETERMINACION DE L/G DE PRUEBA PARA CALCULO DE CAPACIDAD DE UNA TORRE

- h_w = entalpia de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura del volumen de agua, en kcal/kg aire seco.
- h_1 = entalpia de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo de entrada, en kcal/kg aire seco
- h_2 = entalpia de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo de salida, en kcal/kg de aire seco.
- K = coeficiente total de transferencia de entalpia, en kcal/h-m² por kg agua y por kg de aire.
- L = masa del flujo de agua, en kg/h-m² de área plana
- CAP = capacidad de la torre, en % del flujo de agua de diseño
- T = temperatura del volúmen de agua, en °C
- T_1 = temperatura de agua caliente, en °C
- T_2 = temperatura de agua fría, en °C
- V = volumen efectivo de la torre, en m³/m² de área plana.
- T_{BH} = temperatura de bulbo húmedo, en °C

7.03 O P E R A C I O N

En la operación de torres de enfriamiento de las PTE, el agua del condensador se pasa a lo alto de la torre de enfriamiento a las válvulas de control de flujo desde donde pasa a los distribuidores de agua (o bien, directamente a éstos); de los distribuidores de agua, el agua pasa (normalmente por gravedad) y desciende uniformemente al relleno, en donde entra en contacto íntimo con el aire ascendente hasta llegar al fondo de la torre en donde se encuentra la pileta o depósito de almacenamiento de agua. De la pileta, el agua es regresada al condensador repitiéndose el ciclo.

El aire que entra a los lados por las persianas, cruza y pasa hacia arriba por el interior del relleno enfriando el agua y antes de salir de la torre, pasa a través de eliminadores de llovizna en donde la neblina que arrastra se reduce al mínimo; el aire y el agua pasará a contra-flujo en tal forma que el aire antes de salir de la torre se encuentra en contacto con el agua más caliente.

Para el arranque de la torre de enfriamiento deberá llenarse la pileta de agua fría, por medio de la válvula de agua de repuesto, y el sistema de agua de circulación hasta que se alcance el nivel correc

to de operación. En seguida deben abrirse completamente las válvulas de control de flujo de agua caliente (en la parte superior de la torre), válvulas de entrada y salida del condensador y después arrancar las bombas de agua de circulación, con las válvulas de descarga cerradas que se abren después lentamente para evitar vibraciones y choques al ponerlas en línea. repentinamente, ajustando las válvulas de control de flujo para igualar al flujo de agua caliente en cada parte de la torre; después de lo anterior se arrancan los ventiladores de aire. Durante las primeras semanas de operación de una torre de enfriamiento nueva, o después de un mantenimiento mayor, deberán limpiarse varias veces las rejillas del cárcamo de bombeo de agua fría y posteriormente, deberá limpiarse semanalmente con mayor frecuencia en caso necesario.

Antes de arrancar un ventilador, deberá verse que las aspas estén ajustadas al ángulo correcto de ataque, operándose durante más o menos una hora para calentar el lubricante del reductor de velocidad y verificar el voltaje y corriente del motor con objeto de compararlas con los valores de placa. Si la torre no tiene todo el flujo de agua y la carga de calor, es probable que el amperaje sea mayor que el nominal, pero si se excede del 10%, deberá investigarse y corregirse la causa. La torre deberá mantenerse limpia y el sistema de distribución de agua

uniforme, con objeto de obtener en forma continua la máxima capacidad de enfriamiento, no permitiendo que se formen excesivos depósitos o algas en los eliminadores de humedad y relleno; las toberas deben conservarse libres de basuras para asegurar una distribución y enfriamiento correcto de agua.

La capacidad de una torre para enfriar agua a una determinada temperatura varía, como se ha visto en Capítulos anteriores, con la temperatura de bulbo húmedo y con la carga de calor en la torre; cuando la temperatura de bulbo húmedo baja, la temperatura de agua fría también baja, pero esta no tanto como lo hace la temperatura de bulbo húmedo. Una torre de enfriamiento no controla la carga de calor, sino que la cantidad de agua de circulación determina el rango de enfriamiento para una determinada carga de calor; las temperaturas de agua fría y agua caliente aumentan con las cargas altas de calor.

La profundidad normal del agua desde la parte superior del muro de la pileta, al nivel del agua, en una pileta de madera, es de 12 a 20 cms. y en una pileta de concreto es de 20 a 40 cms, debiéndose ajustar el suministro de agua de repuesto para mantener este nivel de agua, ya que profundidades más bajas de operación de agua requieren mamparas de aire, bajo el relleno, para evitar derivaciones de aire, pero al mismo tiempo se deberá mantener suficien

te altura de agua para evitar cavitación en las bombas de agua de circulación.

Si se utilizan motores de dos velocidades, se debe permitir un retraso de tiempo de más o menos 20 s después de desenergizar el embobinado de alta velocidad y antes de energizar el embobinado de baja velocidad, debido a que tienen lugar grandes esfuerzos en la maquinaria de transmisión y el motor, a menos que se permita que el motor baje su velocidad lentamente antes de energizar el embobinado de baja velocidad. Cuando se cambie de dirección de rotación al ventilador, se deberá permitir un mínimo de dos minutos de retraso de tiempo antes de energizar nuevamente el motor del ventilador.

Durante períodos de operación a baja temperatura (0°C o menores) se forma hielo en las partes relativamente secas de la torre que están en contacto con el aire de entrada, como por ejemplo las persianas y los marcos estructurales adyacentes. Las características de la formación de hielo en una determinada torre varían con la velocidad y dirección del viento, flujo de agua de circulación y carga de calor. La formación de hielo puede controlarse recurriendo al control de los flujos de aire y agua en la torre, parando periódicamente el ventilador, usando la velocidad baja de los motores (cuando se tienen) o bajo condiciones extremas de frío girando el

ventilador en rotación inversa que no deberá exceder de 15 a 20 minutos.

En la operación de torres de enfriamiento el papel del tratamiento del agua es un factor económico muy importante, ya que el mantenimiento del equipo, su eficiente operación y el ahorro de agua dependen, en gran medida, de dicho tratamiento.

Las torres de enfriamiento se diseñan para enfriar agua que se circula a través de ella; el enfriamiento se logra evaporando una parte del agua circulada, lo cual baja la temperatura del agua que permanece en el circuito pero las sales minerales disueltas, que se encuentran presentes en todas las fuentes de agua, permanecen disueltas en el agua de circulación y aumentan su concentración. También durante el paso a través de la torre de enfriamiento el agua pierde en la atmósfera CO_2 (ácido carbónico), lo cual causa que el agua de circulación se vuelva más alcalina y que en presencia de dureza de calcio puede causar incrustación.

Los fenómenos anteriores que producen corrosión o incrustación en el sistema de agua de circulación, se controlan por medio de las siguientes técnicas :

- tratamiento externo del agua de repuesto
- tratamiento químico interno del agua de circulación.

Existen varias formas de tratamiento externo del agua de repuesto para las torres de enfriamiento, de los cuales se incluyen ejemplos de suavización con zeolita y suavización en frío con cal; el costo de estos tratamientos puede calcularse a partir del consumo de sustancias químicas.

Suavización con zeolitas.- Este tratamiento se basa en la eliminación de 285 g de dureza por cada kg de sal de regeneración; de acuerdo con lo anterior, la cantidad de sal necesaria para cada 1000 litros de agua de repuesto será :

$$W_{\text{sal}} = \frac{D}{285} = 0.0035D, \text{ kg de sal/1000 litros de agua de repuesto}$$

en donde :

D = dureza del agua en ppm

Suavización con cal.- La cantidad de cal hidratada necesaria para este tratamiento que reduce la dureza a 80 ó 100 ppm, puede calcularse de acuerdo con la siguiente expresión, por cada 10000 litros de agua de repuesto :

$$W_{\text{cal}} = 0.0084 (A+50) + 0.018 (\text{CO}_2), \text{ en kg/10000 litros de agua de repuesto.}$$

en donde A es la alcalinidad del agua en ppm y CO_2 está dada en ppm. Las aguas con dureza excesiva de no carbonatos ($D > A$), requieren un tratamiento suple

mentario.

El tratamiento químico interno del agua de circulación se efectúa controlando el pH y dosificando sustancias inhibidoras de corrosión y de incrustación; el pH normalmente se controla dosificando ácido sulfúrico a 66°Baumé (por su bajo precio) en la siguiente cantidad.

1.2 kg/10000 litros de agua de repuesto para neutralizar cada 120 ppm de alcalinidad.

El control de la incrustación se logra conservando los aditivos químicos a un nivel determinado más bajo del requerido por los compuestos complejos de calcio; por ejemplo, para mantener un nivel de 1 ppm de polifosfato de sodio y 3 ppm de lignosulfonato de sodio, se requieren las siguientes dosificaciones por cada 10000 litros de agua de circulación :

0.01 kg de tripolifosfato de sodio.

0.03 kg de lignosulfonato de sodio.

El control de la corrosión se efectúa agregando inhibidor de corrosión el cual normalmente es a base de cromatos en una concentración de 20 a 30 ppm como CrO_4 , dosificando dicromato de sodio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

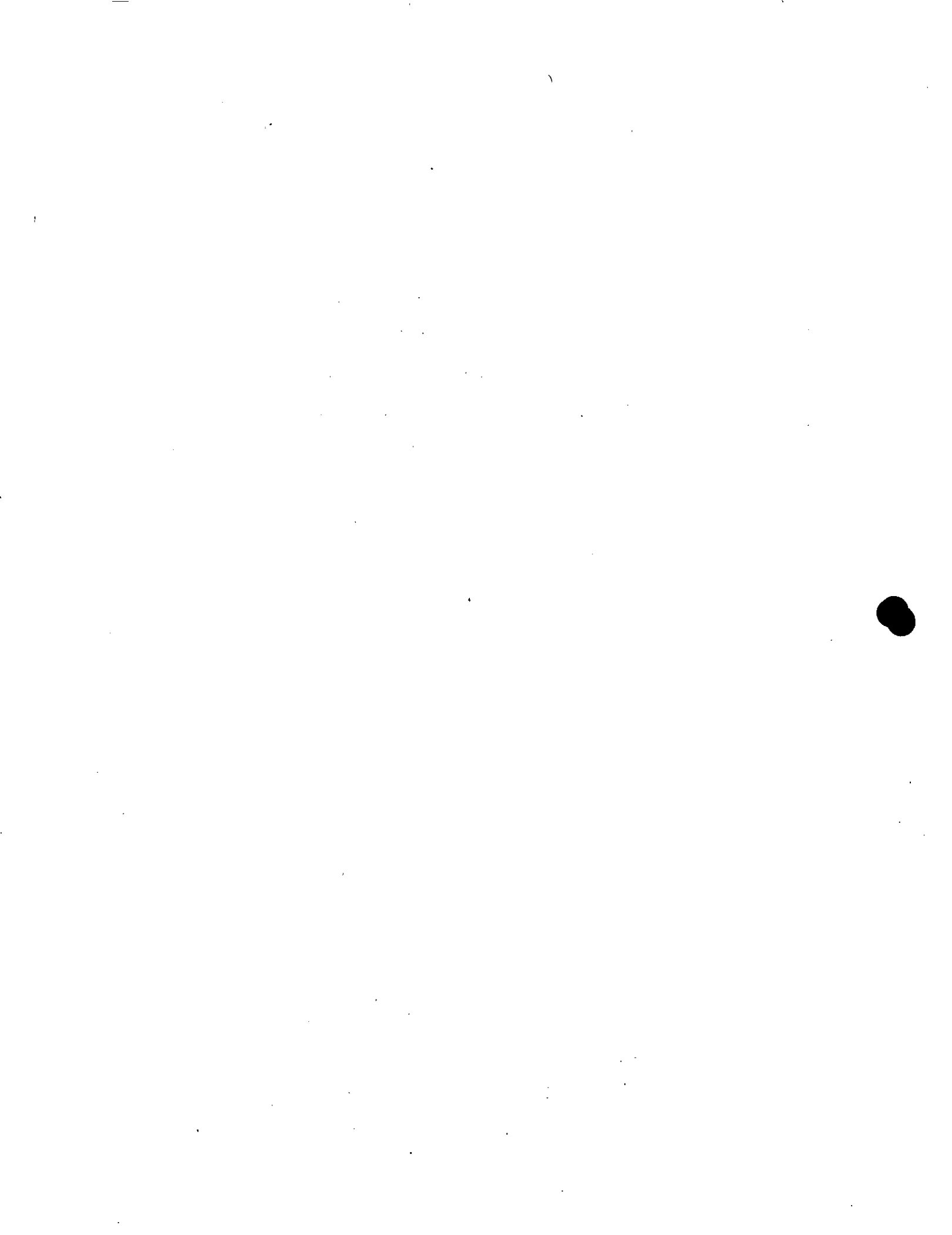
La efectividad del control de corrosión y del pH, depende críticamente del control de la purga; el con-

trol de la incrustación normalmente se logra con el control del pH o con las llamadas técnicas de "umbral".

El mecanismo por el cual se cree que esta técnica retrasa la formación de incrustaciones de calcio-carbonato es la adsorción con el cristal durante el principio de su formación y el reemplazo del medio dentro de la estructura cristalina, formándose un material amorfo cuya estructura y propiedades adhesivas dependen de la concentración de los elementos en el agua de circulación que forman incrustación. El ion de calcio residual se mantiene al punto de saturación en equilibrio con el carbonato de calcio permitiendo al sistema operar a altas concentraciones relativas.

De acuerdo con lo anterior, en que las concentraciones de los inhibidores de incrustación y corrosión deben mantenerse a un determinado nivel, es claro que el consumo de estos aditivos dependen directamente del régimen de purga.

Cada sistema de agua de circulación deberá ser cuidadosamente analizado para determinar los límites seguros de operación que sean más económicos, compatibles con la razonable seguridad de evitar la incrustación y la corrosión en el sistema, sin embargo, en la Tabla 6.04 se dieron guías generales de



operación que dan una idea genérica de estos límites.

Las formas principales de conocer las características corrosivas o incrustantes del agua de circulación son las siguientes :

- por medio de testigos.
- por el comportamiento del equipo cambiador de calor.
- por el pH de saturación.
- por el índice de Langelier o índice de saturación
- por el índice de estabilidad Ryznar.
- Por el análisis químico y microbiológico del agua.

Los testigos para conocer las características del agua, se encuentran desde la colocación de especímenes metálicos dentro del circuito de agua de circulación y los métodos estandarizados para evaluar el grado corrosivo o incrustante, hasta la colocación de pequeños cambiadores de calor que trabajan bajo las mismas condiciones del equipo normal, pero que pueden sacarse de servicio para evaluar las características del agua.

Las desviaciones del comportamiento de los cambiadores de calor normalmente están indicadas por disminuciones del coeficiente de transferencia de calor y aumento de la caída de presión a través del

cambiador de calor; esta información conjuntamente con las mediciones de temperaturas no indican si la incrustación se encuentra del lado del agua de enfriamiento o del lado de vapor o proceso, pero de cualquier manera es útil como ayuda para otras verificaciones.

El pH de saturación del carbonato de calcio, óxido de magnesio y otras sales de calcio y magnesio, pueden emplearse para predecir las condiciones incrustantes del agua a un pH determinado.

El índice de Langelier o índice de saturación, se basa en el pH de saturación del carbonato de calcio y se obtiene restando el valor del pH de saturación (pHs) del valor real del pH del agua, es decir:

$$\text{pH} - \text{pHs} = \text{índice de saturación o de Langelier.}$$

Un valor positivo indica que el agua está sobresaturada y se formará incrustación, mientras que un valor negativo indica no-saturación del agua con el carbonato de calcio y que habrá corrosión. A pesar de la utilidad de este método, tiene la desventaja de no indicar el grado de corrosión o incrustación que puede tenerse; en la Fig. 7.04 se muestra una gráfica para calcular este índice de saturación o de Langelier.

El índice de estabilidad Ryznar, también se basa en

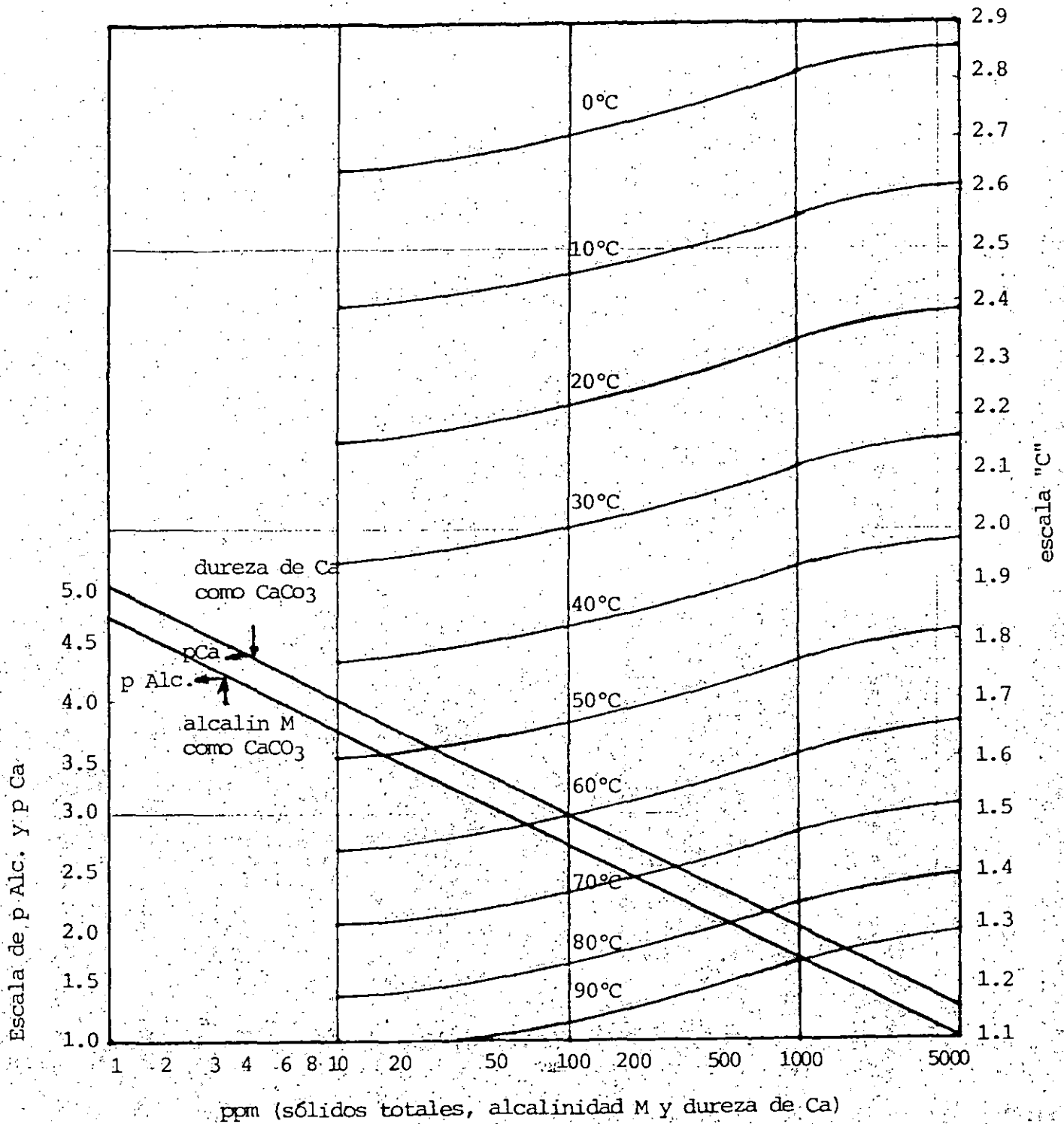
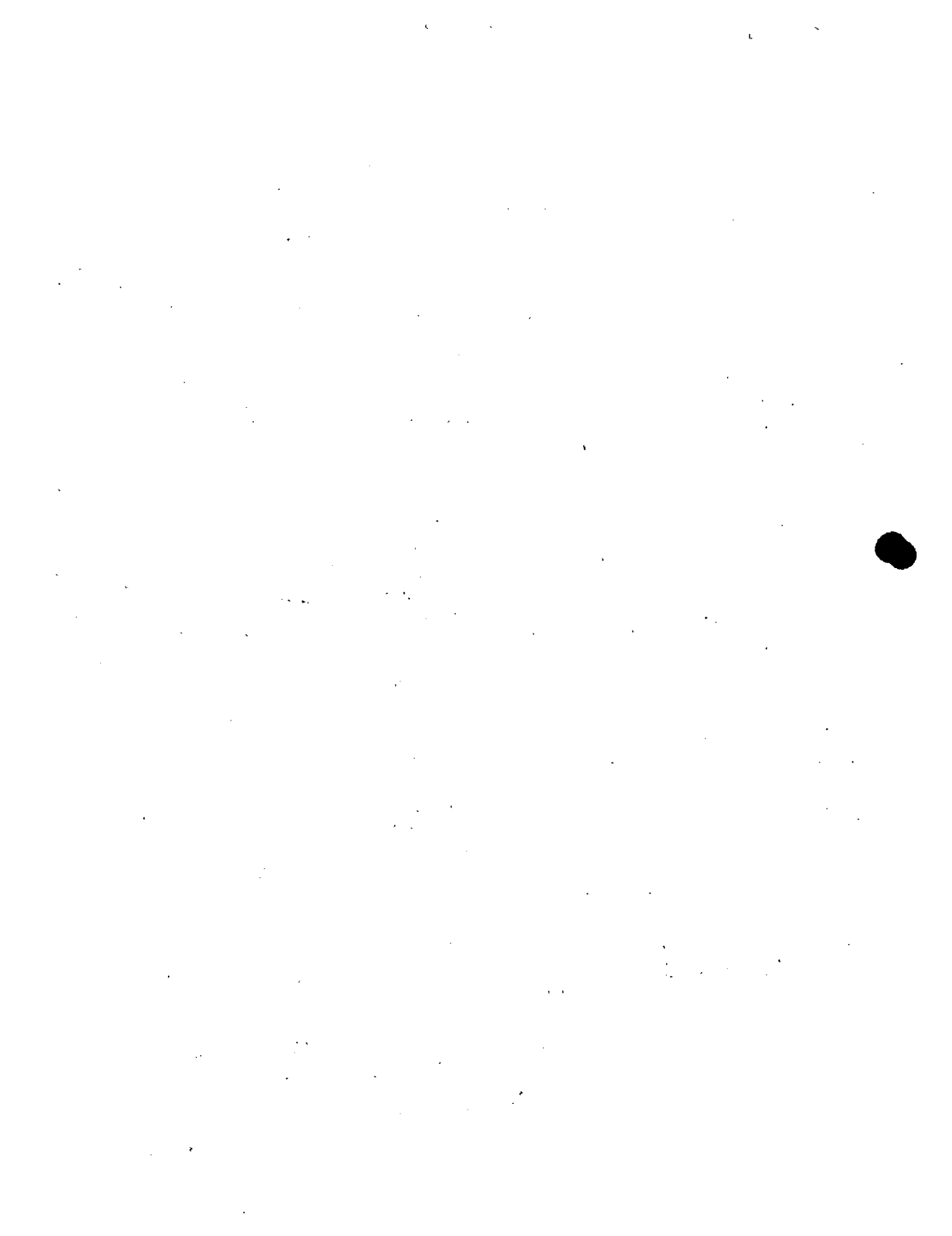


FIG. 7.04.- GRAFICA PARA CALCULO DEL INDICE DE LANGELIER O INDICE DE SATURACION



el pH de saturación del carbonato de calcio (pHs), e indica el grado de corrosión o incrustación esperada en una determinada agua a un cierto valor del pH y se obtiene restando el valor real del pH del doble del pHs de saturación de carbonato de calcio calculado del agua, es decir :

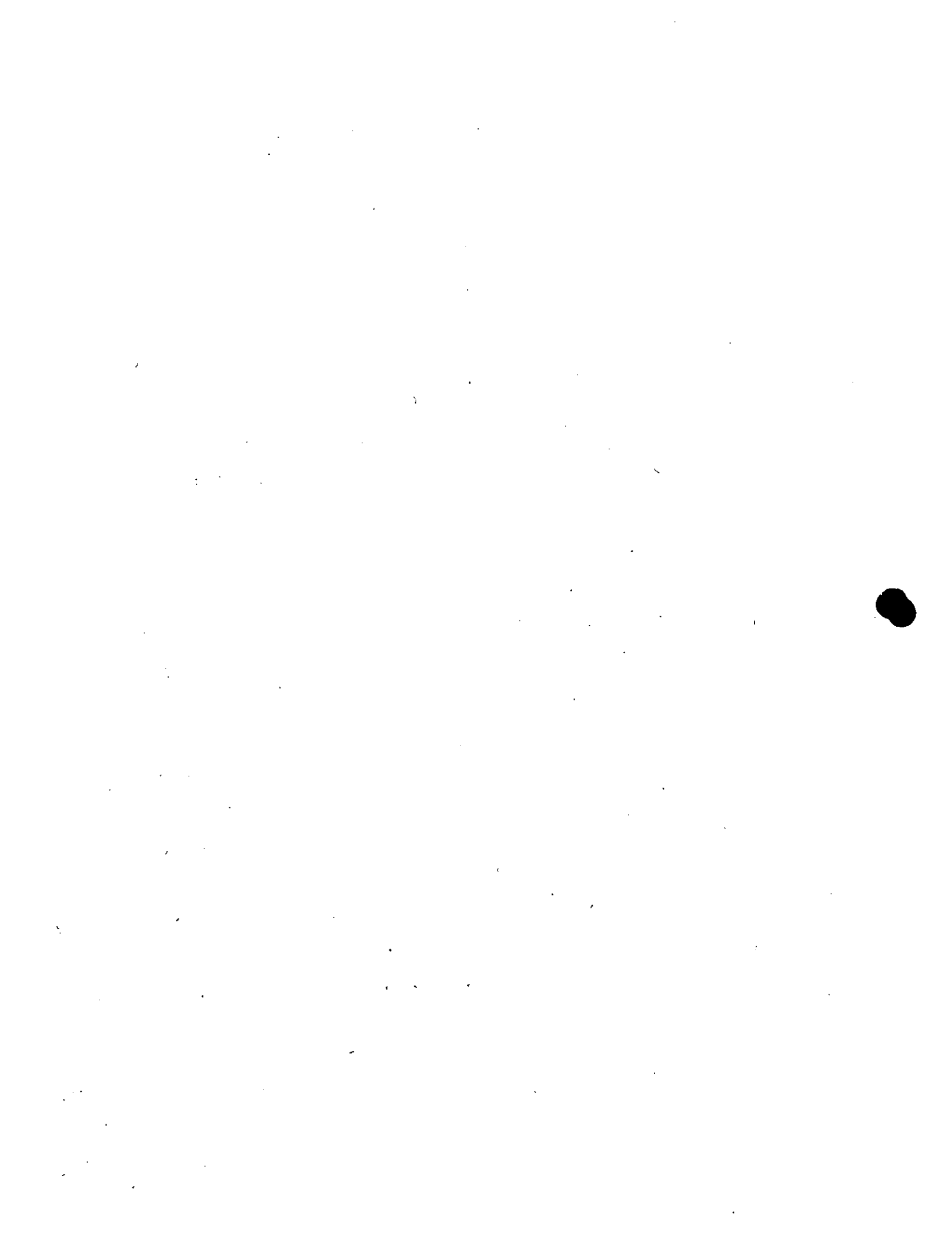
$$2\text{pHs} - \text{pH} = \text{índice de estabilidad o Ryznar.}$$

Los valores así obtenidos siempre son números positivos. Un índice de 6, se consdiera que no incrusta ni corroe, pero si cae por debajo de 6, el agua se vuelve incrustante en forma incremental con el valor y cuando el índice de estabilidad sube arriba de 6 el agua se transforma corrosiva incrementalmente.

El agua que muestra un valor positivo, es decir, incrustante bajo el índice de saturación puede ser corrosivo en el índice de estabilidad y da una idea verdadera de la habilidad del agua en cuanto a su tendencia para reducir la incrustación o causar corrosión.

Los análisis químicos y microbiológicos del agua realizados en forma regular conjuntamente con la utilización de testigos pueden indicar la presencia y grado de contaminantes de incrustación o de depósitos.

Quando se va a poner en servicio una torre de enfriamiento nueva, o después de un mantenimiento mayor, es necesario



como parte de los procedimientos de prearranque se debe remover la suciedad y basura que se haya acumulado en el depósito de distribución de agua caliente, retirar los sedimentos de la pileta de agua fría, del cárcamo de bombeo y rejillas, debiéndose asegurar que no haya toberas tapadas, utilizando mangueras de agua para lavarlas, incluyendo también las piletas. Cuando se trate de una torre de enfriamiento nueva se deberá circular agua continuamente durante varios días antes de arrancar el equipo mecánico y poner la torre en operación continua. Es muy importante que se inspeccionen las siguientes partes antes de ponerlas en operación :

- verificar el alineamiento de la flecha del motor, flecha de la transmisión y flecha del reductor de velocidad, realineándose en caso necesario.
- verificar que estén apretados todos los tornillos que sujetan el soporte del ventilador a la torre, los tornillos de las anclas del cilindro del ventilador y las varillas atiesadoras, teniendo la precaución de no utilizar rondanas en la madera.
- se deberán apretar los tornillos flojos en las diagonales, vigas y columnas de la estructura.
- se deberá verificar que se encuentren apretadas las juntas atornilladas siguientes (en el ventilador

y la transmisión): cubierta del cubo del ventilador, abrazadera del cubo del ventilador, tornillos de montaje del reductor de velocidad y motor, tornillos del acoplamiento de la flecha y de la guarda del cople.

- se deberá verificar que el aceite del reductor de velocidad no tenga lodos o agua, drenando y/o probando una muestra. Verificar el nivel del reductor de velocidad en el tapón de llenado o en el cristal de nivel. Verificar que el nivel de cristal externo tenga la posición correcta para indicar el nivel de aceite. En caso necesario deberá agregarse aceite del tipo apropiado.
- se deberá girar a mano el ventilador para asegurarse que está libre y también para verificar que tiene los claros correctos en la punta de las aspas.
- se deberá verificar la resistencia del aislamiento eléctrico del motor.
- deberá lubricarse el motor de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- se deberá probar cada ventilador en forma separada durante un tiempo corto verificando que no existe vibración excesiva o ruidos anormales, asegurándose que gire en la dirección correcta.
- *se deberá verificar el funcionamiento correcto del suministro de agua de repuesto.*
- *se deberá verificar que la perilla tenga la cantidad correcta de agua.*



**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.**

C U R S O S A B I E R T O S

T O R R E S D E E N F R I A M I E N T O

**I N S P E C C I O N D E T O R R E S D E
E N F R I A M I E N T O**

I N G . M I G U E L A . C A S T I L L O H O I L

M A Y O 1 9 9 2 .

INSPECCION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

Una torre de enfriamiento que funciona bien produce dinero proporcionando agua fría para su uso en refrigeración, enfriamiento o agua de proceso. Un retorno de agua más fría en 1°C de la torre de enfriamiento, bajo condiciones similares de carga y temperatura, puede añadir hasta miles de dólares de ahorro en el consumo de energía o en los resultados del producto. Para mantener una torre funcionando eficientemente, todos sus componentes deben ser puestos en óptima disposición de trabajo para eliminar los carga por energía excesiva.

Un incremento de 1°C en la temperatura del agua que proviene de la torre de agua, requiere un 5.5% de kilowatts adicionales para obtener el mismo funcionamiento de refrigeración del sistema de aire acondicionado, de acuerdo con cálculos utilizando las gráficas de entalpía-presión.

Por tanto, si una torre de enfriamiento está retornando el agua 1.67°F más caliente que su diseño, se requiere aproximadamente un 10% más de energía. En dinero, para un sistema de compresión de 1500 ton, a \$300 por kilowatt-hora, la carga extra de energía es igual a \$11,667 por hora; \$116,675 por 10 horas día; \$670,050 por semana; \$28,809,900 por mes; \$230,479,200 por 8 meses de operación (dólares).

Obviamente corresponde al operador inspeccionar cuidadosamente su torre para eliminar cualesquiera deficiencias que impidan que existan temperaturas óptimas del agua fría que retorna de la torre hacia el equipo de compresión y condensación, darse cuenta de estos problemas y hacer un presupuesto en dinero y tiempo para efectuar las reparaciones. Un gran esfuerzo de reajuste pudo ahorrar \$230,479,200 en un sistema de 1,500 tons.

Las plantas químicas que fabrican un producto condensado vendible, pueden hechar más de \$3,000,000 al día de materiales adicionales, lo que será más que pagar por un amplio mejoramiento y reconstrucción de grandes torres de enfriamiento industriales. Las centrales eléctricas utilizan su energía para generar más energía y el grado de consumo se conoce como sanción de energía. Nuevamente, el agua más

fría utiliza menos energía y reduce esta sanción, con lo cual se produce electricidad más vendible.

Existen muchas maneras de obtener un mejor funcionamiento de una torre de enfriamiento. La menos cara es mediante la aplicación del sentido común, mantenimiento ordinario. A través de los años, existe un "deslizamiento", con lo cual el equipo se ve reducido en su eficiencia de acuerdo con la Ley de Murphy, la cual establece: "Cuando una situación es mala y va cuesta abajo, no puede pasar otra cosa que empeorar". Un corolario es: "El equipo no mejorará por sí mismo".

La herramienta más vieja y mejor, disponible para el personal de mantenimiento es el Globo del Ojo Mark II. Una inspección propia y una adecuada atención invertidas para reducir las discrepancias, será más que pagar por las mismas en una operación más uniforme. Un equipo mecánico tan complejo como una torre de enfriamiento, debe ser inspeccionado con lista de revisión preparada de tal manera que todos los puntos pertinentes estén cubiertos.

Cuando la temporada de enfriamiento está por cerrarse, los operadores de los sistemas de aire acondicionado y refrigeración están planeando abatir los paros y programar el mantenimiento normal de los compresores, del cuerpo y los tubos, así como de las turbinas.

La torre de enfriamiento, un elemento importante de todo el sistema, debido a su típica localización (figura 1), frecuentemente es ignorado hasta "cinco minutos" antes de encenderla en la primavera.

Muchos propietarios y grandes usuarios industriales, se atienen a -- inspecciones periódicas y reportes hechos por un ingeniero profesional en el campo, quien invierte por lo menos uno o dos días en el lugar y expone una evaluación detallada de las discrepancias encontradas y programas de reparación sugeridos junto con la capacidad posible de un mejoramiento térmico.

Este trabajo discute el procedimiento que corre paralelo a la manera metódica en la que se hacen las inspecciones de campo.

Mientras existe una gran variedad de tipos de torres de enfriamiento, los elementos de todas las unidades son los mismos, y se puede desarrollar una lista de revisión que cubra todos los puntos, como un procedimiento de preplaneación para desarrollar un amplio programa de inspección.

Existen tres divisiones principales de una torre de enfriamiento: estructura exterior, equipo mecánico y estructura interior. Investigaremos cada división como una unidad, marcando las discrepancias a medida que aparezcan.

1.- ESTRUCTURA EXTERIOR (Figura 2). Esta inspección consiste en caminar alrededor de ella y examinar visualmente los siguientes componentes:

A. Rejillas: Determinése el número de rejillas faltantes, midiendo en forma exacta el tamaño de las rejillas existentes, su longitud, ancho y el espesor cuidadosamente, ya que una diferencia de 1/16" puede evitar que las nuevas rejillas no encajen en las rejillas de soporte existentes. Las rejillas que estén fuera de posición deben ser revisadas para su reposición. Si las rejillas son de madera, busquense rajaduras o roturas y revítese la madera de descomposición y putrefacción.

Las rejillas de asbesto-cemento o de políester reforzado con fibra de vidrio, se deben examinar para detectar roturas, rajaduras y daño en las esquinas, lo cual impide un buen alineamiento. Examínense los soportes de las rejillas. Si estos están hechos de madera, también se deben revisar para detectar putrefacción y descomposición; si son de acero galvanizado, obsérvese la condición del recubrimiento de protección y tómese nota de los soportes hechados a perder o rotos.

Veáse que los herrajes de fijación sean adecuados y que so porten en forma correcta los puntales de las rejillas. Examinense estos últimos del daño por hielo.

- B. Cubierta: En tableros de asbesto-cemento corrugados o planos, temporales, o cubiertos de poliéster reforzados con fibra de vidrio, búsquense grietas, goteras y revísese la condición de fijación de los herrajes y otros daños físicos. Debe observarse la integridad y seguridad de fijación de los rodillos de esquinas.

En torres con cubierta de madera, búsquense si existen tableros faltantes, si hay alguna evidencia de descomposición de la madera, fugas y rotura de esta última (figura 3). La utilización de la madera para las cubiertas es una técnica bastante vieja y usualmente consta de doble capa. Esta se debe revisar desde el interior para determinar si las roturas de la madera ameritan su total reemplazo con un moderno forro de fibra de vidrio (figura 4).

- C. Puerta de Acceso: Revísese si hay puertas faltantes, bisagras o cerrojos faltantes o rotos, la condición general de las puertas en operación y cualquier evidencia de daño físico (figura 5). Mídase con exactitud la puerta si es necesario reemplazarla.

- D. Sistema de Distribución: Obsérvense los conectores de las bridas en la parte superior del tubo elevador en cuanto a su seguridad y empaque y tómese nota de la efectividad del recubrimiento de control de la corrosión en líneas de suministro y tubos elevadores. En torres de contraflujo, revísese el lugar donde el conducto entra por la cubierta (figura 6) para determinar si está sellado apropiadamente y no existen fugas. En este tipo de torres, revísese si existe deterioro en los depósitos de distribución, protección contra salpicaduras y tuberías asociadas. Con una configuración en canaletas, revísese si existe alabeo de los ta--

bleros o hendiduras en los lados del depósito y fugas debidas a espacios en las canaletas.

- E. Tableros de Desague: Búsquese evidencia de que el agua haya salido del desague hacia el exterior de la torre. Revísese si existen tableros de desague desplazados o dañados. Si éstos son de metal, obsérvese si existe corrosión o roturas. Independientemente del material, véase si hay tableros faltantes y la condición de los sujetadores.
- F. Escalera: Revísese si los pasamanos están deteriorados o faltan piezas. Así mismo, si los largueros y escalones están incompletos, rotos o tienen rajaduras. Examínese la estructura si está floja, si existe evidencia de pudrición y la condición de los dispositivos de sujeción. Las escaleras de acero se deben revisar para ver si existe evidencia de corrosión o ataque de ácidos. Por seguridad, se deben revisar todos los sujetadores (en la mayoría de las instalaciones es prudente mover la escalera antes de utilizarla). Se debe poner especial atención en la condición y seguridad de los miembros superiores de los soportes de plataformas en cantiléver (figura 7).
- G. Escaleras Marinas y Andadores: Antes de subir cualquier escalera marina, revísese la seguridad de los sujetadores moviendo vigorosamente los escalones de la misma y observando que todos los peldaños faltantes o deteriorados. Así mismo los escalones sobre los andadores en cuanto a su seguridad, pudrición o corrosión. Revísense los largueros y barandillas de corrosión. Con objeto de cumplir con los requerimientos de seguridad, cualquier escalera marina de más de 6 m debe contar con una reja o un dispositivo de seguridad para proteger al usuario. Además, una reja por arriba de los 6 m debe tener plataformas soldadas a un intervalo de 6m o estar protegida con dispositivos; veáse si existen evidencias de corrosión, pudrición o debilidad. un viejo "truco de supervivencia para los que suben escaleras marinas" es -

asirse fuertemente del barandal en lugar de los escalones, ya que éstos podrían estar podridos y débiles.

- H. Cubierta del Ventilador: Examínese la cubierta del ventilador para ver si hay pudrición, miembros faltantes o rotos y espacios entre tableros, los cuales pueden provocar un corto circuito en la circulación del aire. En cubiertas de acero, revísese si hay corrosión, agujeros (figura 8) y la condición del recubrimiento de control de la corrosión. Se deben examinar los soportes de la cubierta para ver si existe corrosión, miembros rotos o faltantes y la condición de los dispositivos de sujeción.
- I. Cilindros del Ventilador: Revísese que los cilindros del ventilador estén seguramente anclados a los soportes de la cubierta del ventilador. Obsérvese si existe holgura en el cilindro del ventilador y la condición de los dispositivos de sujeción. Búsqese si hay daño, partes faltantes de la estructura y deterioro de los componentes. Veáse si existe pudrición de la madera, o cuando sea aplicable, corrosión de los lados de acero, anillos (figura 9), o los flejes de la correa de soporte. Inspeccionese si hay un claro adecuado de la punta entre los álabes del ventilador y el interior de las paredes del cilindro. Los requerimientos de seguridad de la OSHA dictan que haya una protección del ventilador en los cilindros menores que 5' de alto. Si esta protección se instala revísese la condición de los componentes en cuanto a corrosión, flameo y partes faltantes.

2.- ESTRUCTURA INTERIOR

- A. Sistema de Distribución: Inspecciónense los conductos de la tubería de metal por si hay pudrición, oxidación o ataque de ácidos. Revísense lo ajustado de las conexiones de las bridas y la condición de los soportes y empaques. Veáse que todos los brazos de los ramales sean seguros; nótese si hay corrosión en los conductos de las bridas. Compruebe si fal-

tan boquillas y, si es posible, observe el patrón de rocío para ver si las boquillas están operando adecuadamente y no están obstruidos (figura 10). Para una distribución de agua con flujo cruzado, veáse que las boquillas estén limpias y operando y, si estas no se utilizan, revísense que todas - las perforaciones de distribución estén limpias y no obs- - truidas. Cersiórese de la condición de la sección de redis- tribución debajo del depósito de agua caliente, por si son necesarias reparaciones y reemplazos de algunas piezas. Si las tuberías están fabricadas en madera, examínese la condi- ción de las bandas de retención, veáse si existen tableros alabeados o cuarteados y revísese si existen fugas excesi- - vas. Se debe observar la condición de la distribución de - las canaletas de toma de agua, en cuanto a la madera, sopor- tes, espacios excesivos entre el fondo y los lados de la ca- naleta y el alineamiento de las tazas para salpicaduras.

- B. Soportes del Equipo Mecánico: Inspeccionese si existe corro- sión, la condición de los sujetadores; correas o suspenso- res del acero de los soportes del equipo mecánico. Revísen- se los miembros estructurales de madera en contacto con los soportes de acero para asegurarse de su integridad o debili- dad, lo cual tendría como resultado una pérdi- da en la resis- tencia estructural. Si los resortes de goma para la absor- ción de las vibraciones se han instalado, véanse las condi- ciones de éstos, de los pernos de montaje y ajuste, la co- rrosión de los miembros ferrosos y de los cojines de goma. Revísese si existe "pudrición del fierro" donde están en - contacto acero y madera (figura 11).
- C. Detección de Incendios: Pruébense las válvulas y la condi- ción de operación del sistema de aspersion húmedo o en seco. Revísese si existe evidencia de corrosión en los tubos y co- nectores. Veáse que los dispositivos de activación estén en evidente buen funcionamiento. Si se utiliza un sistema de - cableado de termopar como indicador de alarma, revísese si el cableado está roto.

- D. Eliminadores: Revísense los eliminadores de desviación en cuanto a álabes rotos, desplazados o deteriorados por espacios o desalineamiento, lo cual permitirá una desviación - excesiva. (figura 12). Compruébese que no estén deteriorados o rotos los soportes. Veáse si no están obstruidos por algas, basura o lama. Las láminas de fibra de flujo cruzado cuarteadas o expandidas o los miembros de soporte vertical de madera laminada, deben examinarse para su posible reemplazo.
- E. Relleno: Inspecciónese el relleno de la torre para ver si existen roturas, deterioro o barras de salpicado mal colocadas o faltantes. Veáse si existe daño en los soportes de las barras de salpicado y en los del relleno (figura 13). - Si hay secciones del relleno que se han colapsado, revísese si existe daño por hielo. Obténganse las condiciones de diseño del agua y las temperaturas de operación, de manera - que más tarde se puedan hacer los cálculos térmicos para de terminar el grado de mejoramiento en la capacidad disponible, por el cambio de relleno a un diseño más eficiente. El relleno de asbesto a prueba de fuego debe considerarse como una alternativa al caro sistema automático de inundación, - ya que las tuberías y los controles del sistema de alarma - contra incendios necesitan revisión y mantenimiento contínuos, mientras el relleno de asbestos por la naturaleza de su construcción a prueba de fuego, hace su trabajo de protección contra incendios sin ninguna atención adicional.
- F. Soportes de la Estructura Interior: Las columnas, largueros y diagonales de madera se pueden probar para revisar su integridad, golpeándolos con un martillo. Un sonido agudo y brillante indica buena madera, mientras un sonido grave y opaco, suavidad en ésta. La pudrición de la madera la suaviza y si en un área existe la posibilidad de que se presente, pruébese con un desarmador para determinar más ampliamente la condición de la madera (figura 14). Revísese cuidadosamente la existencia de "pudrición de fierro" alrededor de los sujetadores de metal en la madera en contacto con éste

último. Revísense los interiores de acero contra la corrosión y el deterioro debidos al enmohecimiento. Revísese la condición y apretamiento de los pernos en interiores de madera y acero.

- G. Divisiones: Examínese la flojedad y corrosión de los pernos y tuercas de la división. Inspeccionese si existen tableros de división deteriorados o sueltos. Obsérvese si las divisiones van desde el depósito hasta la cubierta del techo - dividiendo las celdas individuales, de tal manera que se prevenga que los ventiladores de trabajo en vacío funcionen como molinos de viento, o que haya un corto circuito de aire entre celdas. Véase que las paredes de viento paralelas a las lumbreras de entrada de aire estén en posición, que los tableros o miembros transitorios estén sujetos firmemente. Revísense los soportes ya sean de madera o acero en cuanto a la condición de pudrición, corrosión y a la del recubrimiento protector.
- H. Puertas: Tómese nota de las puertas faltantes, condición de las bisagras y sujetadores y revísese si hay corrosión, pudrición o deterioro del material de la puerta. Si la división de la celda no tiene puertas al nivel del depósito, indíquese en el reporte.
- I. Depósito de Agua Fría: Para depósitos de madera, revísese el deterioro, si los lados del mismo están alabeados o presentan rajaduras, si existen juntas abiertas y si la madera está sana. Inspecciónese el depósito de acero en cuanto a corrosión, perforaciones y la condición del recubrimiento de protección (figura 15). Los depósitos de concreto se deben inspeccionar por la existencia de fracturas, rotura del concreto, descascaramiento, juntas abiertas o ataque de ácidos. Se debe observar si existe acumulación de basura, la condición de las rejillas, de las placas anti-turbulencia y la libertad de operación de las válvulas de drenaje de todos los cárcamos. Si el depósito es una unidad continua, se debe recomendar que las divisiones junto con los cárcamos y

tubería necesarios deben sumar flexibilidad para la utilización del equipo mediante la operación sólo del número de celdas requeridas por la carga de rechazo de calor, con lo cual se conserva energía.

3.- EQUIPO MECANICO

- A. Ventiladores: Obsérvese si existe corrosión en los enchufes de conexión del ventilador. Inspecciónese si hay corrosión en las cubiertas de estos últimos y la condición de los herrajes de fijación. Revísese el arreglo de abrazaderas de los álabes en cuanto a su apretamiento y corrosión (figura 16). Véase cuidadosamente si existe corrosión y erosión en los álabes del ventilador. Compruebese la uniformidad del paso de estos últimos con un transportador de burbuja; revísese si existe formación de sólidos que pudieran cambiar el peso del momento del álabe o las características de la lámina de aire, con lo cual se causaría vibración excesiva.
- B. Cajas de Engranés: Revísese que haya un nivel adecuado de aceite en los reductores de engranes, inspecciónese si no existe humedad o lodo en el aceite. Rótese el eje de entrada con la mano al derecho y al revés, en contra del contacto entre los engranes para sentir la holgura. Examínese si existe desgaste en el cojinete del eje del piñón de entrada tratando el eje radialmente. Véase si los cojinetes del eje del ventilador tienen juego excesivo en el extremo, aplicando una fuerza hacia arriba y hacia abajo sobre la punta de un álabe del ventilador y observando el movimiento del eje de salida (figura 17). Se ha dejado un claro de recorrido en algunos ejes de salida, el cual no se debe confundir con un juego excesivo del extremo.
- C. Transmisión de Energía: Inspecciónen las llaves de accionamiento del eje y los prisioneros; revísense los herrajes de ensamblaje en cuanto a su apretamiento. Examínese si existe corrosión, desgaste o elementos faltantes del eje de accio-

namiento. Véase el exterior del eje de accionamiento para detectar si existe corrosión y revísese el interior taladrando ligeramente el eje y verificando lo sano de éste, observando si existen puntos muertos que podrían indicar corrosión interna.

Obsérvense cuidadosamente los conectores flexibles de ambos extremos del eje (figura 18). Es imperativa una protección del eje para prevenir roturas del ventilador. El tramo más débil en el tren de transmisión de potencia son los conectores de acoplamiento. Invariablemente, cuando se rompe un acoplamiento, el eje rotatorio oscila hacia arriba y rompe los álabes del ventilador, además de dañar posiblemente la caja de engranes y el motor. Esto se puede prevenir con la instalación de protecciones del eje que son simples y baratas, para absorber el empuje ascendente del eje rotatorio roto (figura 19). Se debe observar el alineamiento, tensión y condición de las bandas en cuanto a desgaste, en las unidades accionadas por éstas.

- D. Motores: Obsérvese si existe calentamiento del motor; véase si existe una lubricación adecuada de los cojinetes. Un exceso de grasa o aceite aplicado a los motores de cojinetes de esferas, puede dañar la unidad forzando a que la grasa entre a los bobinados y provoque un deterioro en el aislamiento.

Revísese si existen depósitos de suciedad o polvo en las tomas de aire del motor y revísense los motores tipo TEFC para ver la condición de los conductos de aire y ventiladores. Junto con el motor se suministra un tapón para drenar la humedad, véase si está operando. Mídanse las cargas de operación con un amperímetro y voltímetro y comparéense con los datos de la placa del fabricante; varíese hacia arriba y hacia abajo el paso de los álabes del ventilador para compensar. Examinense los pernos de montaje y los sujetadores en cuanto a seguridad y corrosión.

Todos los puntos anteriores podrían parecer excesivamente complicados y representar mucho trabajo. Sin embargo, si se va a hacer una descripción e investigación completas, éstas deben cubrir todos los elementos de la torre de enfriamiento. Para facilitar la inspección real, se puede compilar una lista de revisión (veáse el ejemplo), - la cual acelerará grandemente el trabajo y asegurará que se cumplan todos los aspectos de la inspección. Esta también sirve como una referencia para escribir y presentar su informe.

4.- LISTA DE REVISION DE INSPECCION Y MANTENIMIENTO

A. Introducción

1. Procedimientos periódicos con rutinas planeadas de inspección y mantenimiento son muy necesarios para prolongar la vida de la torre de enfriamiento. El equipo mecánico requiere inspección y lubricación. Una lista de revisión preparada es esencial para un mantenimiento adecuado.
2. Deben mantenerse y documentarse todos los programas de lubricación.
3. Debe encontrarse la fuente de ruidos inusuales y se deben detectar las vibraciones en forma temprana, antes que ocurra un daño.
4. La transferencia de calor se puede mantener a óptimos niveles, mediante una distribución uniforme del agua a través de aspersores limpios, tuberías de distribución de agua - limpias y sin roturas, válvulas de operación adecuadas y - materiales uniformes de relleno. También se deben inspeccionar las bombas, motores y equipo relacionado.
5. La seguridad es primordial. Las operaciones de inspección y mantenimiento se deben llevar a cabo de tal manera que no causen lesiones al personal.
6. Se debe hacer un recorrido de inspección visual de la to--

re una vez en cada turno para asegurarse de que no se están desarrollando problemas. En ese momento se debe hacer un reporte al operador del cuarto de control de la planta o una anotación en la bitácora.

B. Arranque Después de un Tiempo Muerto

1. Reductor de Engranés

- a. Compruebase que la lubricación es del tipo recomendado y tiene un nivel adecuado y que todas las líneas de aceite, válvulas y aditamentos estén apretados.
- b. Si se ha suministrado filtro de aceite, este debe ser enfriado con aire y las válvulas de derivación deben estar cerradas adecuadamente.
- c. Si se han suministrado aditamentos de grasa, se deben revisar en cuanto a tipo y cantidad.
- d. Todos los pernos de montaje se deben apretar a las especificaciones de momento de torsión.

2. Motor Eléctrico

- a. Los pernos de montaje se deben apretar en forma adecuada y en el alineamiento requerido.
- b. Debe haber grasa adecuada en los cojinetes del motor.
- c. Las conexiones eléctricas deben estar apretadas.
- d. Se debe revisar la correcta rotación del eje del motor.

3. Acoplamiento Mecánico

- a. Se debe revisar el extremo de acoplamiento del motor en cuanto a su alineamiento, grietas, placas alabeadas y conexiones apretadas.

- b. Véase que los cojinetes de la chumacera de caja estén lubricados con grasa adecuada para una velocidad de 1800 RPM y alta exposición a la humedad.
- c. Revísese el alineamiento, que no haya grietas, placas alabeadas y que las conexiones estén apretadas en el acoplamiento al extremo de la caja de engranes.

4. Ensamblaje del Ventilador

- a. Se debe revisar que los álabes del ventilador tengan un paso adecuado y uniformidad del ángulo de paso.
- b. El claro entre la punta del ventilador y la pared debe ser de 1 1/4 a 2 pulgadas.
- c. Los pernos del enchufe de conexión deben estar apretados adecuadamente.
- d. Examínese la dirección de rotación para un movimiento adecuado del aire.

5. Interruptores de Corte de Seguridad por Vibración

- a. Revísese que los interruptores operan adecuadamente y que los límites de corte están de acuerdo con las especificaciones.
- b. Véase que los componentes tienen libertad de movimiento al nivel adecuado de sensibilidad.

6. Análisis de Marcas de Vibración

- a. En el arranque se debe realizar un monitoreo y análisis de la vibración del equipo mecánico.

7. Válvulas de Compuerta

- a. Si está accionado el motor, revítese para determinar el correcto alineamiento de los componentes, apretado, las conexiones eléctricas a prueba de agua y una acción adecuada del relevador.
- b. Las unidades deben ser programadas para determinar sus tiempos de apertura y cierre de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- c. Un tiempo excesivo indicaría una unión o mal funcionamiento, el cual debe ser corregido.
- d. Compruébese la adecuada rotación del motor.

8. Transferencia Térmica

- a. Se debe inspeccionar la integridad, uniformidad y cualquier desgaste inusual del material de relleno.
- b. Examínense los eliminadores de desviación para ver si hay álabes rotos o mal funcionamiento que pueda corregirse.
- c. Los aspersores se pueden inspeccionar en cuanto a su mal funcionamiento, observando el patrón del agua en el depósito de agua fría.
- d. Se deben inspeccionar visualmente las rejillas de entrada de aire para asegurar su adecuado funcionamiento.

9. Miembros Estructurales

- a. Los componentes estructurales deben ser observados periódicamente para determinar su condición global.
- b. Debe observarse el apretamiento de los conectores, y si están fabricados de material ferroso, deben ser monitoreados en cuanto a corrosión.

- c. Los pasamanos deben estar en su lugar y firmes; las escaleras marinas, escaleras y andadores también deben ser - seguros.
- d. Las excotillas y los paneles de acceso se deben mantener cerrados y tener buen mantenimiento.
- e. Los eliminadores de desviación no soportarán a los trabajadores bajo condiciones normales y deberán ser encofrados. Estos últimos se deben quitar después de que se hayan completado la inspección y el mantenimiento.
- f. Se debe tener cuidado con los componentes mecánicos en - movimiento (p.ej: ventiladores, ejes o motores) y obser- var los procedimientos de cierre de seguridad de la planta.



Fig. 1 - La localización de la torre de enfriamiento puede hacer difícil el mantenimiento.

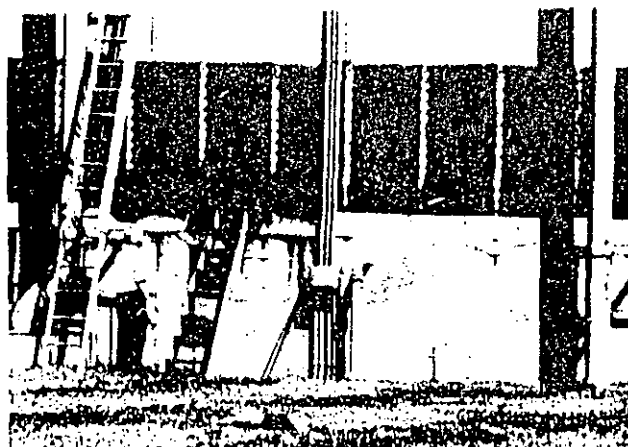


Fig. 2 - El recorrido de inspección incluye el notar las hojas rotas o faltantes de las rejillas.



Fig. 3 - La pudrición de la madera de los lados verticales exteriores, requiere de remplazo.

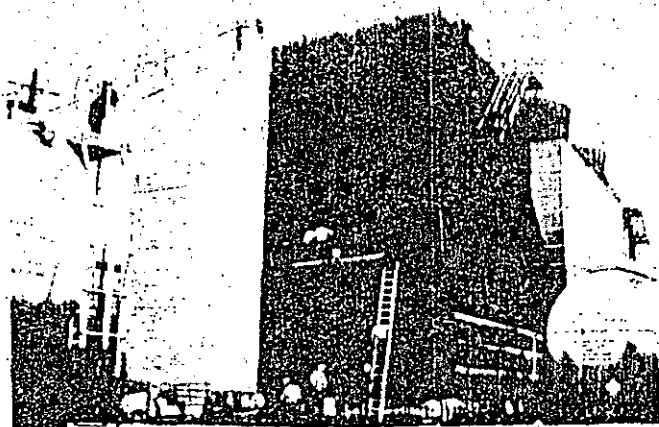


Fig. 4 - Instalación de un costado de fibra de vidrio para remplazar madera podrida.

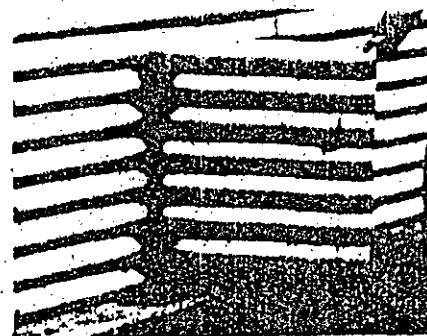


Fig. 5 - Examínese la operación de las bisagras de la puerta de acceso.



Fig. 6 - La pared de transición de entrada de la tubería debe ser impermeable.

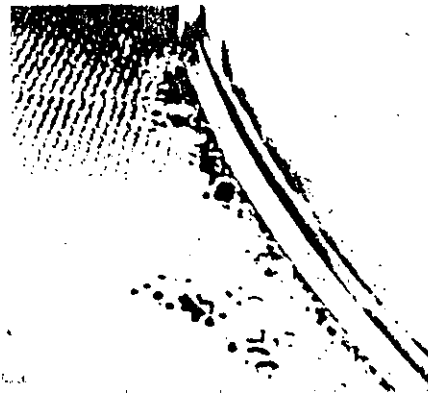


Fig. 8 - Además de ser peligrosos, los agujeros en las placas de la plataforma provocan cortocircuito del movimiento del aire, disminuyendo el funcionamiento.



Fig. 7 - Obsérvense los soportes en cantiléver antes de subir las escaleras.



Fig. 9 - La corrosión del cilindro del ventilador puede mover el acero hacia adentro del camino del álabo rotatorio del ventilador.



Fig. 10 - Se debe revisar que los aspersores tengan un patrón de distribución del agua adecuado.

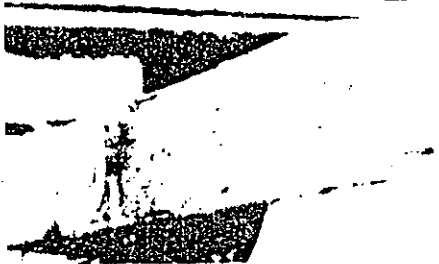


Fig. 11 - La pudrición del fierro ocurre entre las caras de contacto de la madera y el acero.

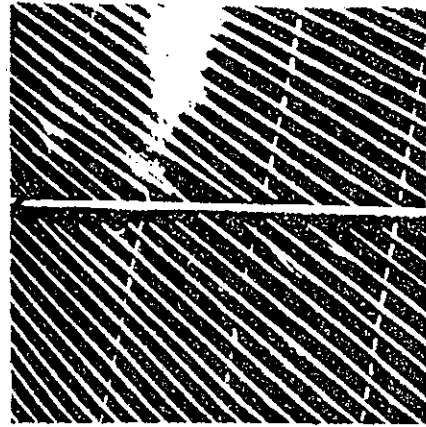


Fig. 12 - El desalineamiento de las hojas del eliminador de desviación de flujo cruzado, crea problemas de desviación.

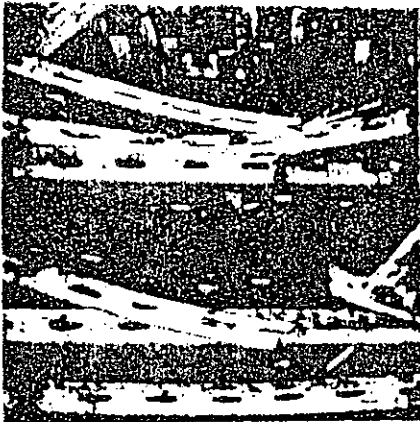


Fig. 13 - El daño por hielo en las rejillas de entrada del aire romperá las tablas de relleno de madera.



Fig. 14 - Los soportes interiores de madera podridos deben cambiarse.

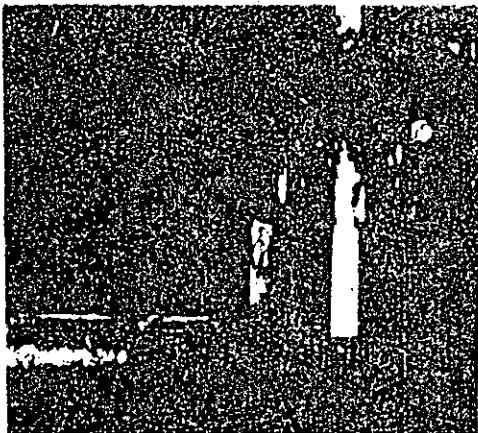


Fig. 15 - La inspección de pernos rotos y expulsados evitará un derrumbe del ventilador que sería muy caro (flechas).

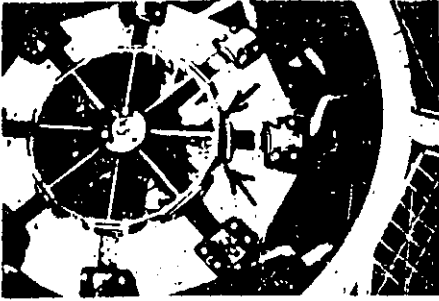


Fig. 16 - El acero corroído debe ser sopleado con chorro de arena a presión. Obsérvese las bridas del depósito de división de las celdas. Las paredes divisorias se deben añadir desde el fondo del relleno del depósito para prevenir cortocircuito del aire en la operación de la celda limitada.



Fig. 17 - Un juego excesivo y cojinetes ruidosos necesitan cambio en el campo de los cojinetes de la caja de engranes.

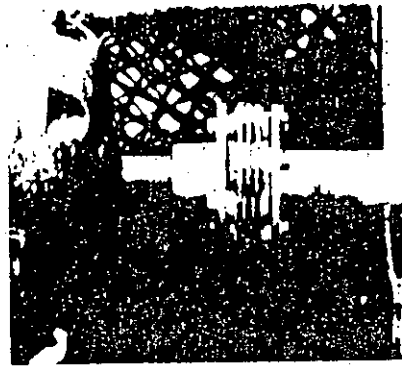


Fig. 18 - Inspecciónense los conectores de los acomplamientos flexibles.

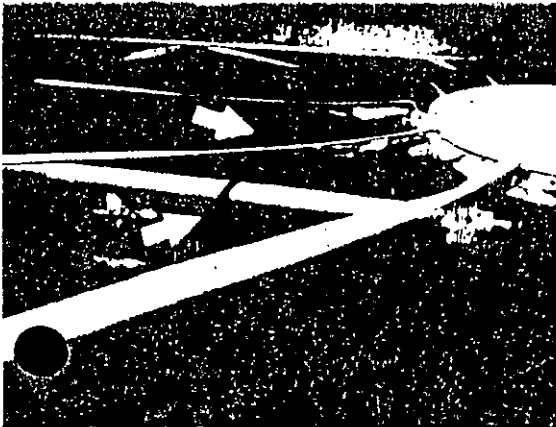
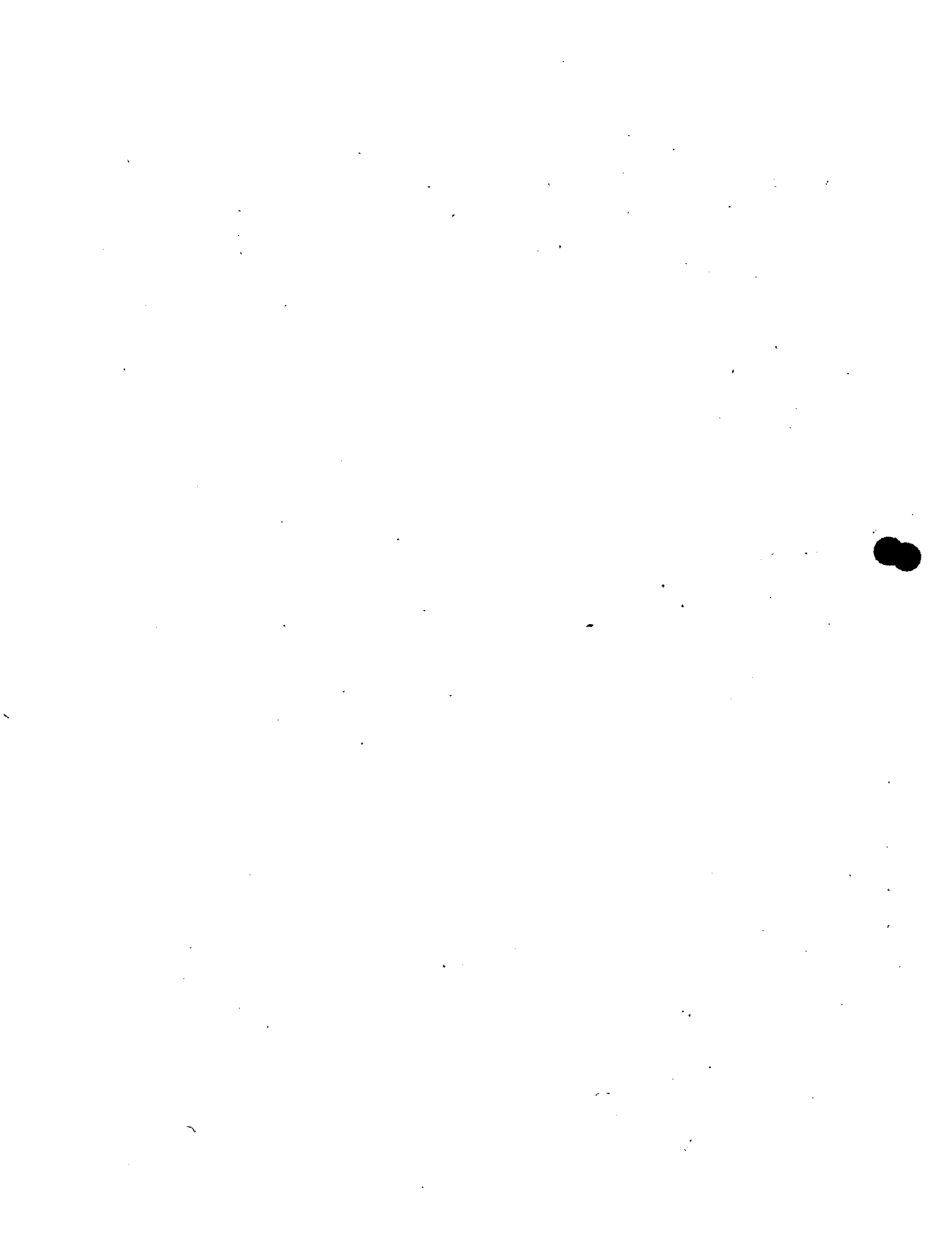


Fig. 19 - Una protección instalada del eje, que no es cara, puede prevenir un costoso derrumbe del ventilador si se rompe el acomplamiento.



MANTENIMIENTO CORRECTIVO, PREVENTIVO Y PREDICTIVO.

Las torres de enfriamiento, al igual que los demás equipos de una planta termoeléctrica, dan los mejores resultados de operación y los mínimos costos de mantenimiento cuando se les proporciona un mantenimiento adecuado.

Fundamentalmente existen dos tipos de mantenimiento:

- a) mantenimiento correctivo o según condición
- b) mantenimiento preventivo y/o predictivo.

El mantenimiento correctivo es el más ampliamente conocido y empleado, se basa en la toma de decisiones y en la habilidad artesanal más que en técnicas precisas o sistemas modernos y requiere de la necesidad manifiesta para actuar.

El mantenimiento preventivo y/o predictivo se refiere a la atención sistemática y análisis, aplicados

para asegurar un funcionamiento satisfactorio y retardar el deterioro de los equipos. Aún cuando los objetivos y filosofía de los mantenimientos preventivo y predictivo son los mismos, difieren en cuanto a la técnica de aplicación. El mantenimiento preventivo se basa en la historia del equipo, en los períodos de vida útil de sus partes estimadas en bases estadísticas; las experiencias válidas se pueden considerar como pruebas destructivas y normalmente requieren sistemas de control mecanizado. El mantenimiento predictivo se basa en técnicas para diagnosticar fallas incipientes, consideradas como pruebas no destructivas con el equipo en operación, mediante mediciones, registros e interpretaciones periódicas de indicadores de comportamiento del equipo; las técnicas empleadas para diagnosticar son visuales, audibles, ultrasónicas, radiaciones, análisis de laboratorio, temperatura, electromagnetismo, vibraciones, etc.

a) MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y/O PREDICTIVO

El mantenimiento preventivo y/o predictivo se refiere principalmente a las recomendaciones que normalmente proporcionan los fabricantes de las torres y que incluyen las inspecciones rutinarias que día a día se efectúan con la vigilancia de operación, la lubricación y los ajustes necesarios.- En realidad, más que una técnica, el mantenimiento

preventivo es más bien una filosofía o una actitud mental, por lo que en este trabajo se dará información general relacionada, que puede ser aplicada en cada caso específico. Esta información se refiere a las siguientes partes, que también tienen aplicación en el mantenimiento según condición o correctivo:

- madera
- vibración
- lubricación
- aislamiento eléctrico

La información sobre los anteriores aspectos incluye en el ANEXO 5.-

INSTRUCCIONES ESPECIFICAS

Ventilador.- Diariamente deberá verificarse que no existan ruidos o vibraciones anormales; semestralmente deberá verificarse el claro en la punta de las aspas, apretar los tornillos sueltos y varillas atiesadoras de la chimenea, así como efectuar una inspección de las condiciones generales. Deberá también limpiarse, repintarse y balancearse cuando ésto sea requerido. Debido a que las vibraciones inducidas por frentes de onda de aire son las principales causas de fallas, en los ventiladores axiales de grandes diámetros deberán determinarse desde la etapa de diseño, algunas características como la respuesta dinámica del ventilador a bajas velocidades.

Los ventiladores se desbalancean durante el servicio normal requiriendo balanceo cada 3 ó 4 años, debido a la erosión que no es uniforme, a la corrosión o a depósitos sobre las aspas.

Los principales tipos de vibración, debido a las fallas de instalación, son las siguientes:

- el ventilador se desbalancea, lo cual causa un movimiento de oscilación de la torre, debido a la baja velocidad relativa y a las

aspas masivas.

- el motor y el reductor se desalínean, lo cual induce una alta velocidad de vibración que causa un sonido especial.
- fuerzas de excitación aerodinámicas de frentes de ondas de aire, producidas por obstrucciones en la succión del ventilador (como vigas soporte) de frecuencias coincidentes con alguna armónica de la velocidad de rotación, producen grandes esfuerzos en el equipo mecánico.
- los ventiladores de 4 ó 6 aspas pueden eliminar algunos de los problemas de oscilación debido a que están mejor balanceados. Un ventilador de 2 aspas en tiro forzado puede causar formación de ondas en la piletta.

El daño por amplitud de vibración excesiva a baja frecuencia tanto a la torre como al equipo mecánico, puede reducirse instalando dispositivos de disparo que se localicen fuera del anillo del ventilador y que se conecten al circuito que energiza al motor.

Motor.- Diariamente deberá verificarse que no existan ruidos o vibraciones anormales, cada tres meses lubricarse o engrasarse y semestral

mente revisar las cuñas y cuñeros, así como apretar todos los tornillos flojos; semanalmente deberá limpiarse el motor y repintarse cuando sea necesario.

Precaución.- Es necesario asegurarse de que cuando se esté trabajando sobre el ventilador o su transmisión, ya sea por reparación, instalación o ajuste, nadie pueda poner en marcha el motor.

Para obtener una máxima vida del motor, será necesario establecer un programa de mantenimiento basado en sus necesidades y que se observen las siguientes precauciones.

Limpieza.- Límpiense cualquier depósito, polvo o aceite sobre el motor, que puedan causar un aislamiento innecesario en el motor evitando su correcta ventilación o disipación de calor.

Baleros.- La siguiente tabla puede usarse como una guía para determinar los períodos de lubricación de los motores.

SERVICIO	1-30 HP	40-125 HP
Intermitente	12 meses	12 meses
8 a 16 horas diarias	12 meses	6 meses
Continuo	8 meses	4 meses

Todas las grasas lubricantes se deterioran con el tiempo dependiendo del tamaño del balero, velocidad y temperatura.

El tipo de grasa lubricante empleada debe ser la recomendada por el fabricante del motor; pero en general, cualquier grasa a base de litio con inhibidores contra la oxidación y la herrumbre es recomendada. Una grasa con una consistencia No. 2 es lo mejor para aplicaciones en motores horizontales. No es nada recomendable el mezclar una grasa ya existente en el balero o afuera con otra de tipo y especificaciones diferentes. Si se desea cambiar tipo de grasa, será necesario lavar el balero y la caja antes de usar la nueva grasa.

El método de lubricación empleado en los motores tiende a purgar o desalojar toda la grasa usada existente en la caja y el balero, por medio de inyección de la nueva.

Debe emplearse una pistola engrasadora, que no forzará demasiado la grasa en el interior del balero o caja del motor.

La falta de grasa lubricante y en mayor grado el exceso de la misma, causarán calentamiento excesivo en el balero. Para evitar este problema será necesario usar el siguiente método:

- parar el motor, si es necesario.
 - limpiar la grasera, la caja del balero y quitar y limpiar también el tapón de purga.
 - quitar la grasa vieja del tapón de purga de la caja y limpiar bien el orificio de cualquier grasa ya endurecida, usando un alambre, si es necesario, por la abertura.
 - agregar grasa nueva por medio de la pistola de engrasar manual, hasta que la grasa nueva aparezca por el orificio de purga.
- Se recomienda tener especial cuidado cuando se lubrique el cojinete o balero del lado del ventilador en motores totalmente cerrados con ventilación exterior, debido a que el orificio de purga, es excesivamente largo y pequeño para eliminar perfectamente la grasa en malas condiciones.
- operar el motor por una hora aproximadamente después de engrasado, para que las par-

tes en movimiento de los baleros del motor expulsen el exceso de grasa a través del orificio de purga, que debe estar libre del tapón hasta que salga toda la grasa de más en la caja.

- instálense nuevamente el tapón de purga y límpiese la parte exterior del motor.
- revise que la temperatura de la caja no sea más de la soportable al tacto de la mano.

Cada dos o tres años, deberá desarmarse el motor completamente, limpiarse y lavarse perfectamente, para eliminar toda la grasa lubricante y volverse a reengrasar a 1/3 de su capacidad, con grasa aprobada para baleros.

Los motores con baleros abiertos deberán limpiarse y empacarse a mano.

Los baleros deberán revisarse al tiempo de estarse lavando, con el fin de ver si se encuentran en buenas condiciones, girando el anillo exterior con una mano y fijando el interior con la otra, para asegurarse que no se encuentran asperezas por superficies desgastadas en las bolas o anillos, así como huelgos excesivos. En caso de que esto suceda, será necesario reemplazarlos por nuevos.

Cojinetes sencillos o chumaceras de fricción.- Debe revisarse el aceite por lo menos cada tres meses. Cuando la longitud de la chumacera sea menor de 5.08 cm (2 pulg.), debe pararse el motor para revisar el nivel del aceite. El aceite de la chumacera deberá cambiarse por lo menos una vez al año. Si al cambiarse el aceite hay muestras de lodos o impurezas, será necesario limpiar la chumacera antes de poner el aceite nuevo.

El motor deberá estar fuera de servicio cuando se esté lubricando. El aceite a usar deberá ser un aceite mineral de buen grado, de una viscosidad ligera o media (tal como un SAE No. 10 ó 20). Debe usarse un aceite tipo turbina, aunque también se recomienda usar aceites lubricantes para motor de automóvil con la viscosidad antes descrita.

Debe revisarse el desgaste de las chumaceras anualmente, midiendo el entre-hierro en el motor por lo menos en cuatro posiciones equidistantes en cada extremo del motor, principian-do en el punto más bajo y en el punto de carga del motor.

Aislamiento.- Debe revisarse la resistencia de aislamiento del embobinado con un megohmetro durante los paros del motor por un período de más de 24 horas y cuando la resistencia sea menor que el valor dado en la parte de AISLAMIENTO ELECTRICO, el motor deberá ser secado para poderse volver a usar.

Los motores en operación continua están a una temperatura arriba de la ambiente, lo que es suficiente para evitar la condensación del aire en el motor y en los embobinados, aún en atmósferas muy húmedas. Si los motores en las torres de enfriamiento quedan fuera de servicio por algún tiempo, será necesario mantenerlos a determinada temperatura arriba de la ambiente de acuerdo con el lugar, para evitar la absorción de la humedad por los embobinados, que causan una destrucción gradual de ellos, previniendo así dicha destrucción. Esta temperatura puede lograrse energizándose sólo una fase del motor o calentándolo por medio de una fuente eléctrica.

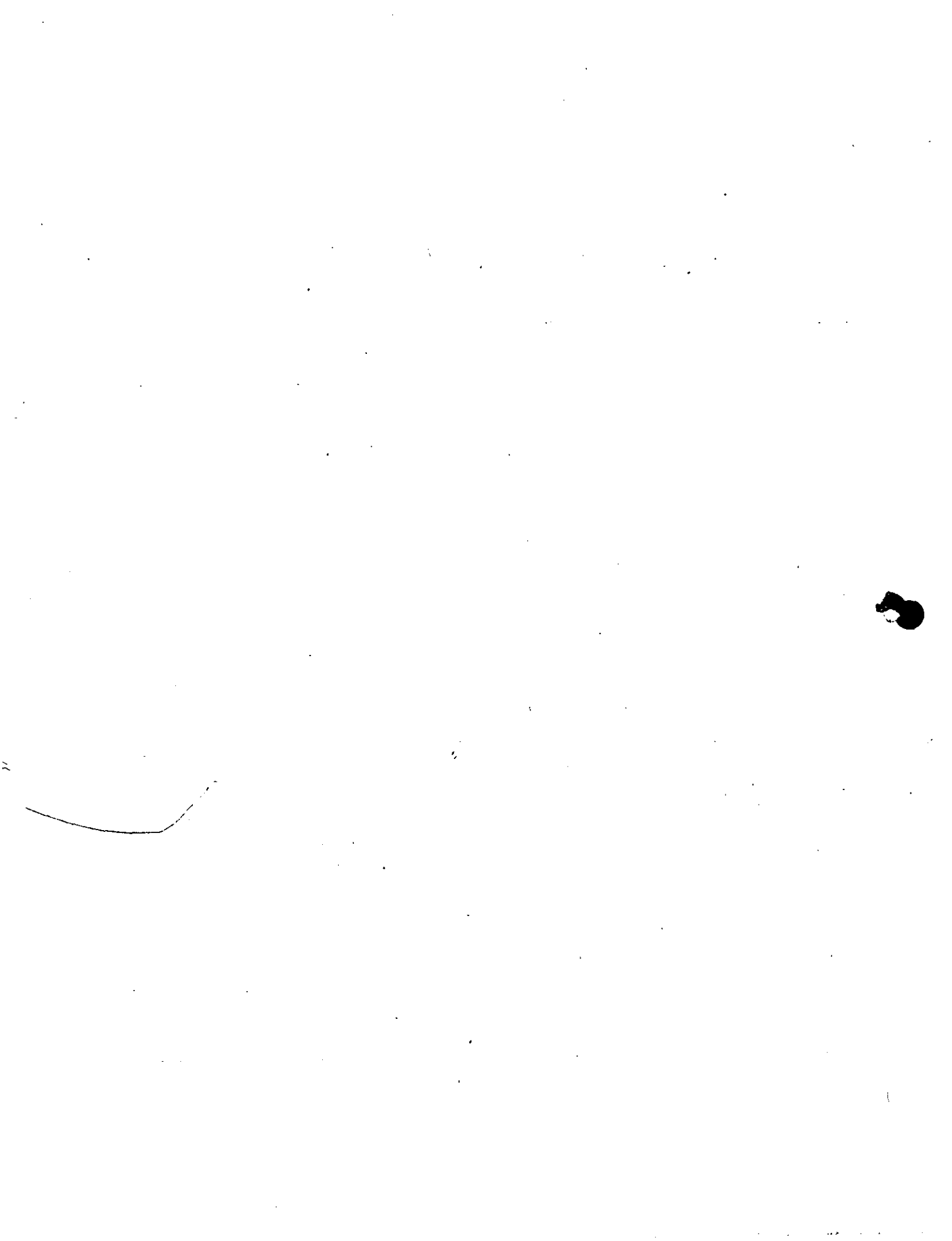
Debe revisarse la resistencia de aislamiento del motor por lo menos una vez al año, con el motor a la temperatura normal de operación. Esta deberá ser comparada con varias lecturas previas para poder determinar el grado del va

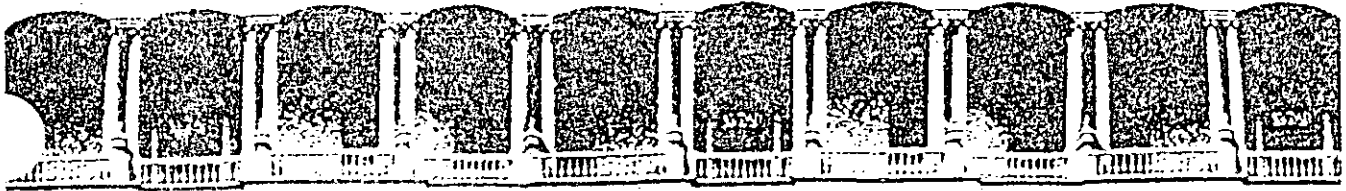
lor de la deterioración en el aislamiento.

Flecha de transmisión.- Diariamente deberá verificarse que no existan ruidos o vibraciones anormales, semestralmente revisar el alineamiento y condiciones de los coples, revisar su condición general; deberá limpiarse, repintarse y balancearse cuando sea requerido.

Reductor de velocidad.- Diariamente deberá revisarse que no existan ruidos o vibraciones anormales, semanalmente verificar el nivel del aceite y revisar las cuñas y cuñeros, verificar que los venteos se encuentren apretados, que no existan fugas de aceite, revisar la condición general, apretar tornillos sueltos y cambiarle el aceite. Limpiarlo y repintarlo cuando lo requiera.

Válvulas.- Las válvulas de control deberán lubricarse, abrirse y cerrarse completamente cada seis meses y limpiarse cuando se requiera. La válvula del flotador deberá revisarse, que no tenga fugas, cada seis meses, revisar su condición general cada año y limpiarse cuando se requiera.





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**TORRES DE ENFRIAMIENTO, OPERACION
Y MANTENIMIENTO**

Del 11 al 13 de mayo de 1992.

TRATAMIENTO DE AGUA

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

MAYO - 1992


X.- TRATAMIENTO DE AGUA.

Los principales problemas de operación que se tienen cuando no existe un tratamiento adecuado del agua de enfriamiento, son los siguientes :

- reducción de la transferencia de calor.
- paros no programados de equipos.
- acortamiento de la vida útil del equipo.
- aumento de los costos de bombeo
- corrosión del equipo.
- mal comportamiento de los inhibidores de corrosión
- pérdida de eficiencia, debido a enfriamiento no efectivo,
- mayor consumo de agua de repuesto.

La forma de tratamiento varía en cada caso particular, considerando que se tienen tipos diferentes de fuentes de suministro de agua con diferentes características, es decir, el origen de agua de repuesto puede ser de pozo, ríos, lagunas, o bien, de aguas negras.

El tratamiento del agua de circulación en una torre de enfriamiento se utiliza por lo siguiente :

- 
- a) para prevenir la corrosión de los metales en contacto con el agua de enfriamiento.
 - b) para prevenir la incrustación en las superficies de enfriamiento del sistema.
 - c) para prevenir los depósitos en las superficies de enfriamiento y en la propia torre.
 - d) para prevenir el deterioro de la madera de la torre de enfriamiento.

a) C O R R O S I O N

Existen varias teorías sobre la causa y el mecanismo de la corrosión; sobre la causa, la teoría más aceptada es la que establece que, la mayoría de los metales en estado puro son inestables en ciertos medios y tienden a revertirse a sus óxidos correspondientes u otras combinaciones más estables. La teoría más aceptada sobre el mecanismo de la corrosión es la llamada teoría electro-química, la cual establece que, para que ocurra la corrosión de los metales deberá existir una diferencia de potencial entre dos o más puntos que haga fluir una corriente eléctrica; la diferencia de potencial entre dos puntos puede ser causada por varios factores entre los que se encuentran los siguientes :

- pequeñas diferencias de composición
- tamaño de los cristales
- orientación de los cristales
- película de óxido discontinua debido al aire o a tratamiento térmico
- esfuerzos residuales
- materia extraña superficial
- inclusión de escoria
- rayaduras o indentaciones
- diferencias en las concentraciones de oxígeno disuelto en un punto comparado con otro.
- uso de metales discímiles

La corrosión de los metales en un medio acuoso ocurre por una combinación de reacciones anódicas a catódicas, cuya intensidad puede retardarse por la adición de ciertos compuestos químicos conocidos como inhibidores de corrosión, los cuales de acuerdo con la polarización que produzcan puede clasificarse en anódicos y/o catódicos. La acción inhibidora de corrosión es producida por la formación de una película insoluble protectora sobre el metal. No existe un inhibidor de corrosión universal, siendo necesario tomar en cuenta tanto el tipo de equipo por proteger, como el tipo de agua, para seleccionar el inhibidor que da protección a un sistema puede fallar en otro o aún puede producir ataques intensivos a áreas restringidas por picaduras, produciendo una

perforación rápida.

Las impurezas en el agua, la temperatura y el régimen de flujo de agua son los factores que influyen en la corrosión; las impurezas en el agua que controlan las características de corrosión son las siguientes :

- contenido de oxígeno disuelto
- contenido de CO_2
- pH
- sólidos disueltos (un aumento de cloruros o sulfatos acrecenta el efecto corrosivo del O_2 y el CO_2)
- presencia de ácidos minerales libres.
- sulfatos.

De los anteriormente mencionados, el oxígeno disuelto y el CO_2 , son los que causan los principales problemas de corrosión.

Los inhibidores anódicos principales son los cromatos y dicromatos de sodio y potasio, polifosfatos, silicatos, nitratos, filocianuros y molibdatos.

Los inhibidores catódicos inorgánicos principales son las sales de zinc, níquel, magnesio y cromato trivalente.

Los inhibidores anódicos y/o catódicos orgánicos principales son las aminas, amidas, paramidas, ácidos car

ción es una reversión a ortofosfatos con posibles precipitación de fosfatos de calcio complejos, en función de las concentraciones de calcio, ortofosfatos, sólidos totales, temperatura y pH del agua de circulación. A altos niveles de concentración, los polifosfatos proporcionan una buena protección al acero contra la corrosión a pH's de 6 a 6.5, pero a este mismo pH puede haber corrosión del cobre.

Los compuestos químicos solos, únicamente pueden proporcionar buena protección contra la corrosión a altos niveles de concentración, lo cual aumenta los costos de operación y problemas con la formación de incrustaciones o depósitos, por lo que se utilizan combinaciones de inhibidores de corrosión como la combinación de polifosfatos y zinc. El tratamiento con un polifosfato y un cromato, es llamado "dianódico" porque ambos inhibidores son anódicos.

Algunos tratamientos tienen el efecto que a alta velocidad son removidos por el agua y a baja velocidad ocurre corrosión por picaduras, probablemente porque el inhibidor no alcanza a formar bien la película protectora.

b) INCRUSTACION

La incrustación es un depósito de partículas minerales adherentes y densas que forman unas con otras

y con las superficies metálicas un compuesto sellado. Los principales materiales que causan problemas de incrustación son los siguientes :

- Carbonato de Calcio, el cual es el más común y que tiene una solubilidad inversa con la temperatura.
- Sulfato de Calcio, el cual es más soluble que el carbonato, pero que con purgas apropiadas se puede controlar y no dar problemas de incrustaciones.
- Sílice, que tiene alta solubilidad en función directa con el pH, sin embargo, debe mantenerse abajo de 150 a 200 ppm.
- Compuestos de Magnesio, los cuales no es usual encontrarlos.
- Hierro o Magnesio.
- Fosfatos y lodos, que son productos de la reversión de polifosfatos a ortofosfatos que reaccionan con los minerales presentes en el agua.

Los factores principales que afectan la formación de incrustaciones son los siguientes :

- temperatura; normalmente un aumento de temperatura acrecenta la formación de incrustacio-

nes al proporcionar calor para completar la reacción química o bien, al disminuir la solu bilidad de los materiales en el agua.

- cambio en el pH o alcalinidad; no tiene la mis ma tendencia en todos los materiales.
- concentración de sólidos disueltos; altas con- centraciones de unos afectan la solubilidad de otros y acrecentan la tendencia a la forma- ción de incrustaciones.
- actividad de ciertos microorganismos.
- alta concentración de algunos inhibidores de corrosión.
- condiciones alternadas de seco y humedad.

La prevención de formación de incrustaciones en las superficies de enfriamiento se logra contro- lando las constituyentes que forman las incrusta ciones, mediante un tratamiento externo con sua- vizadores de cal o con suavizadores de intercam- bio de iones. También se puede evitar la in- crustación conservando los elementos que forman incrustación en solución, por medio de un tratamien- to interno con ácido para bajar el pH o bien, uti- lizando agentes en forma de gelatos para secues- trar los constituyentes.

Los elementos que forman incrustaciones, son las

sales de calcio y de magnesio que tienen una tendencia incrustante en forma inversa a la solubilidad con temperatura: si el agua de enfriamiento entra en contacto con las superficies de calentamiento que tengan temperaturas que exceden la solubilidad de estos componentes, entonces se precipitan sobre la superficie.

Anteriormente para evitar la incrustación y la corrosión se usaba principalmente agua suavizada y se purgaba fuertemente la torre para evitar concentraciones que formaran incrustaciones. Debido a que las sales de Calcio y de Magnesio aumentan su solubilidad cuando se disminuye el pH, se emplea el ácido sulfúrico para bajar el pH dentro de los límites de 7.0. Los polifosfatos se emplean también para inhibir la corrosión y como material secuestrante que puede conservar el calcio y el magnesio en solución.

Otro método de control, es el propuesto por Langelier, el cual consiste en calcular un índice de saturación que es la diferencia entre el pH real y el pH de saturación; un índice positivo indica formación de incrustación y el índice negativo indica corrosión, siendo sus efectos más grandes mientras mayores sean los valores del índice. A partir de este principio se han utilizado otros, modificando el método de Langelier, entre los

cuales se encuentra el del índice Ryznar o de es
tabilidad (I.E.) que puede calcularse por medio
de la siguiente ecuación :

$$2pHs - pH = I.E.$$

siendo los valores positivos los que se encuentran
arriba de 6.0 que indican una tendencia a la corro
sión y los valores menores de 6.0 indican una ten
dencia a la incrustación. El método del índice de
Langelier o el de índice de estabilidad llamado mé
todo de "Incrustación Controlada" tiene la idea
de ajustar la composición del agua por la adición
de ácido, en tal forma de obtener una capa delga
da de incrustación sobre las superficies de calen
tamiento, lo suficientemente gruesa para proteger
el metal contra la corrosión, pero suficientemen
te delgada para no disminuir la transferencia de
calor. Este método es satisfactorio en donde se
tienen bajas temperaturas diferenciales a través
de los cambiadores de calor, pero en donde se tie
nen altas temperaturas de servicio a altas tempe
raturas diferenciales no se obtiene la protección
adecuada y se produce corrosión en uno o en ambos
extremos.

El método llamado de "Alto Fosfato - Bajo pH" se
denomina así porque se tienen altas concentracio
nes de polifosfatos (de 30 a 50 ppm) y bajo pH
porque éste se controla a valores más bajos de

6 y 6.5. La teoría de este tratamiento es de llevar el agua al lado ácido conservando las sales de calcio y de magnesio en solución, haciendo el agua ligeramente corrosiva y añadiendo un inhibidor de corrosión para prevenir ésta; también se emplean mezclas de polifosfatos y cromatos o polifosfatos y persulfatos en el agua alcalina, que son inhibidores de corrosión más efectivos en combinación que la suma de sus efectos individuales, conociéndose lo anterior como "sinergismo".

La prevención contra la incrustación removiendo los constituyentes que forman incrustación por medio de un tratamiento externo antes de recircular el agua, es la mejor forma de evitarla.

La prevención de incrustación por medio de un tratamiento interno normalmente se hace bajando el pH con ácido sulfúrico; la cantidad de ácido necesario depende de varios factores y requiere ser determinada en cada caso particular, pero para propósitos de estimación puede utilizarse la Fig.38 para calcular la cantidad de ácido sulfúrico necesario. Los límites de ciclos de concentración a que puede operarse el agua de circulación, están limitados por la dureza a la cual la precipitación tiene lugar para un valor de pH dado cuando se emplea el tratamiento con fosfato, recomendándose que la dureza del agua no sea mayor del 70%, mos-

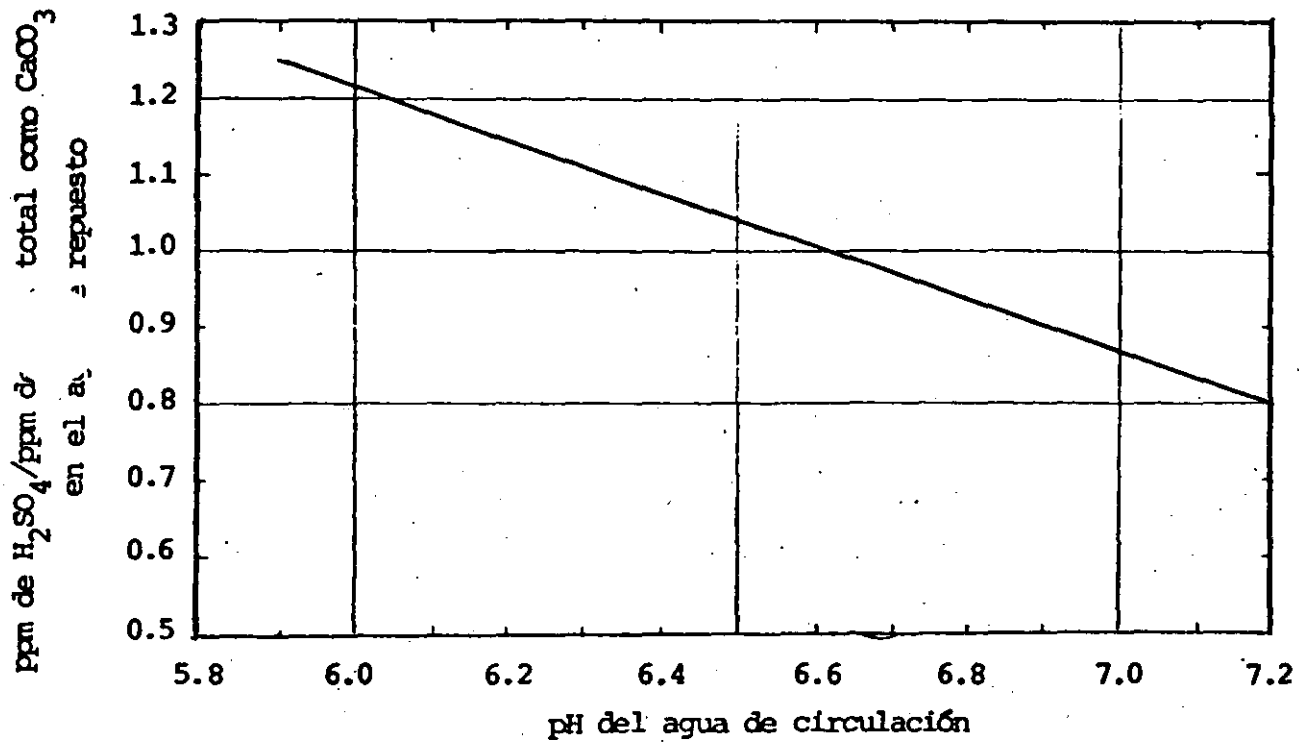


FIG. 38 .- ACIDO SULFURICO NECESARIO PARA UN pH DEL AGUA DE CIRCULACION

trado en la Fig. 39

Si el valor del pH es menos de 6, el efecto inhibidor de la corrosión se reduce, a 4.5 no tiene efecto y a 2.0 el efecto sinérgico se invierte.

El uso de agentes secuestrantes no se emplea extensivamente, debido a su inestabilidad con las variaciones de temperatura.

Cuando se emplea el método de incrustación controlada el índice de estabilidad debe estar arriba de 6, si se emplea el de polifosfatos únicamente el índice de estabilidad debe estar arriba de 4 y si se emplea el tratamiento sinérgico se debe agregar suficiente ácido para remover cualquier ión de carbonato.

La purga y la adición de ácido debe controlarse en tal forma que los productos de calcio y de sulfato en ppm sean menores de 500 000 en el agua de circulación.

El control de la dureza y el pH del agua de circulación deberá estar abajo de la línea de 70% de la Fig. 39 .

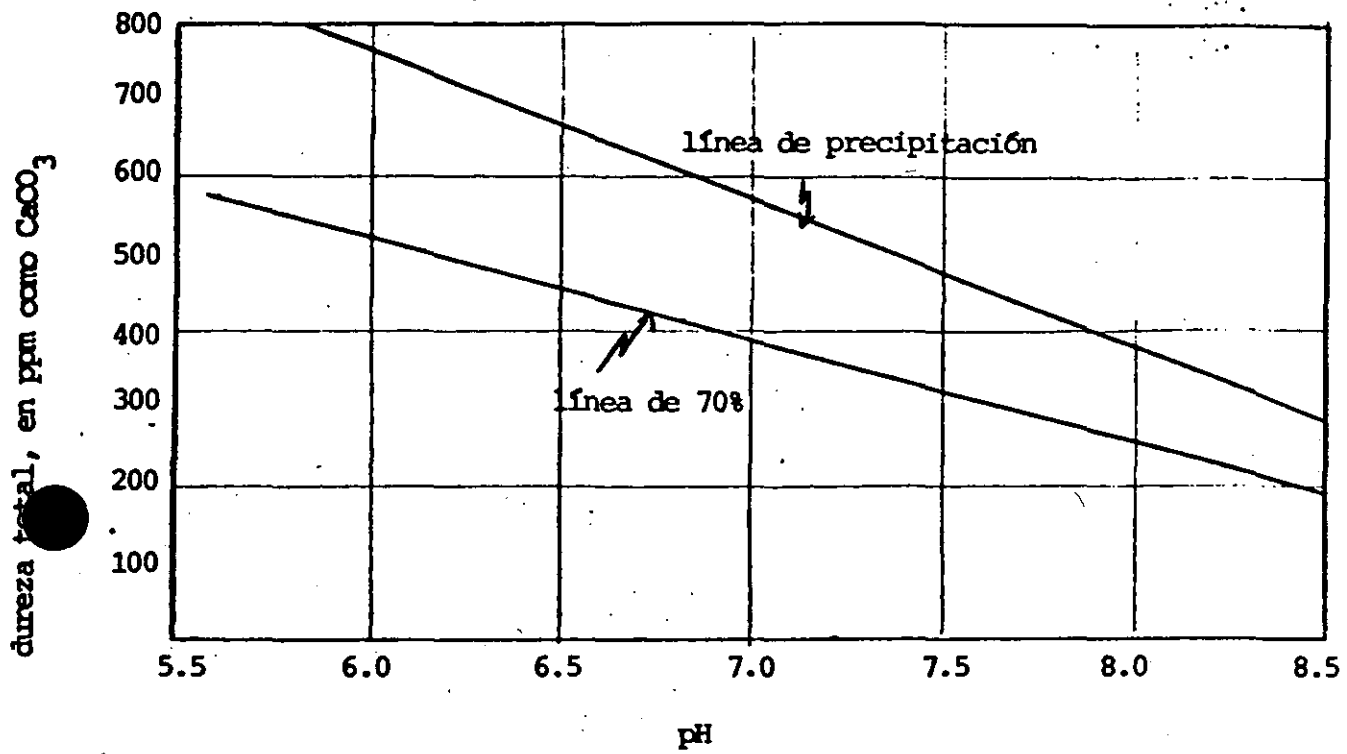


FIG. 39 .- pH DE OPERACION PARA UNA DUREZA DETERMINADA CON TRATAMIENTO DE FOSFATOS

Concluyendo, la prevención de incrustaciones puede lograrse mediante :

- suavización parcial o total del agua.
- con el ajuste del pH para proporcionar un índice de estabilidad que no sea corrosivo ni incrustante.
- con la inyección de polifosfatos o fosfatos que tienen la habilidad de disminuir el régimen de precipitación de los materiales incrustantes, retardándola hasta que pase el agua a través del equipo (3 a 5 ppm de polifosfatos controlan la tendencia incrustante).
- con la inyección de polifosfatos junto con ligninos o taninos, que de 10 a 100 ppm controlan la incrustación por la habilidad de estos materiales orgánicos de cubrir los cristales de materiales incrustantes para hacerlos no adherentes y los lodos formados se eliminan mediante purgas adecuadas.

c) DEPOSITOS (ENSUCIAMIENTO)

Los depósitos se distinguen de la incrustación en que los primeros se forman de materiales que se encuentran en suspensión en el agua de circulación, mientras que la incrustación se forma de materiales que se encuentran en solución; ambos fenómenos ocurren frecuentemente juntos y los resultados son peores que cualesquiera de -

ellos solo. Los depósitos son precipitaciones no adherentes de materiales en suspensión en el agua. Los materiales que causan depósitos en una torre son los siguientes :

- fango, arcilla u otros sólidos en suspensión en el agua de repuesto.
- polvo en el aire y otras partículas que llegan a la torre por el aire de entrada.
- substancias como aceites por fugas de los procesos
- deterioro de la madera de la torre
- lodos
- materia orgánica natural
- hierro
- arena
- basura
- productos de corrosión
- crecimientos biológicos dentro de la torre (mayores problemas y más difíciles de combatir).
- cromo trivalente.

Los factores que tienen influencia sobre la formación de depósitos o incrustaciones, son la velocidad del agua : de .3 m/s o menos los acrecienta y de .9 m/s o más puede ocurrir en forma menos severa, debido a la acción de lavado de los materiales en suspensión; variaciones en las

características del agua de repuesto que puede ser por variaciones de clima y también por las características del aire que normalmente introduce contaminantes a través de la torre de enfriamiento que funciona como lavadora de aire.

La prevención de la formación de depósitos puede hacerse eliminando los materiales del agua que causan depósitos o bien, mediante un tratamiento del agua de circulación para evitar que los materiales se adhieran a las superficies de transferencia de calor, efectuándose este tratamiento por medio de materiales dispersantes o aglomerantes.

El ensuciamiento biológico se debe al desarrollo y crecimiento excesivo de las siguientes formas microscópicas de vida.

- algas
- bacterias (lodos)
- hongos.

Las algas son organismos que únicamente sobreviven en la presencia de aire, luz solar y agua, poseen clorofila con lo cual desarrollan el proceso de fotosíntesis para elaborar su propio alimento; los tamaños de estos organismos varían desde plantas microscópicas unicelulares hasta plantas de más de 30 metros de longitud. Los cre

cimientos abundantes de algas en las torres de enfriamiento interfieren con la distribución - apropiada del agua con lo que producen una disminución del efecto enfriador, también tapan rejillas y restringen el flujo de tuberías y bombas, además de que las masas vivientes de algas sobre la superficie metálica aceleran la corrosión en la forma de picaduras debido a la acción de despolarización del oxígeno relevado durante su proceso de crecimiento; la acumulación de algas muertas alojadas en los cambiadores de calor producen también la acción de celdas locales que causan picaduras en el metal.

Las bacterias son organismos unicelulares de formas alargadas o de forma especial que se encuentran distribuidas en la naturaleza; el tipo más común encontrado en los sistemas de agua de circulación es el de bacterias formadas de lodos que forman cápsulas gelatinosas que integran a otros materiales y que protegen a las bacterias contra la acción de agentes químicos y físicos; los depósitos de lodos sobre las superficies metálicas crean acciones de celdas locales y agravan el problema de picaduras.

Los hongos son organismos celulíticos que utilizan la celulosa como fuente de carbón en su cre-

cimiento y desarrollo, siendo las responsables del ataque biológico de la madera que puede ser en la forma de putrefacción superficial o blanda y la de decaimiento interno; la degradación de la celulosa es acompañada por la secreción de enzimas que convierten la celulosa en compuestos que pueden ser absorbidos por este organismo volviendo a la madera de color obscuro y perdiendo su resistencia al volverse quebradiza y blanda.

El control de los depósitos biológicos se hace por medio de agentes químicos, cuya función es la de matar y/o inhibir el crecimiento y aumento de estos organismos. Los compuestos químicos utilizados para combatir los crecimientos biológicos son principalmente los siguientes :

- sales de cobre como el sulfato de cobre, que es tóxico, debido a la presencia del ión de cobre, pero la cantidad necesaria para matar las algas depende del tipo de éstas; lo que debe hacerse, es un estudio de la dosificación necesaria que además es nulificada con los altos pH's.
- los compuestos de mercurio son tóxicos para las algas, pero también para el personal, por lo cual su aceptación no ha sido completa.

- el permanganato de potasio, también es un agente oxidante que mata los microorganismos, pero la materia orgánica muerta también consume permanganato de potasio en la misma forma que la viva, por lo que la cantidad a dosificar se incrementa.
- los compuestos fenólicos, como el pentaclorofenato de sodio se emplea con bastante éxito, siendo soluble y estable en aguas alcalinas y no reacciona con la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos que normalmente se encuentran en el sistema.
- el cloro, debido a su alta toxicidad y acción rápida es el algicida más empleado; con un cloro residual de .5 ppm, se destruyen la mayoría de los microorganismos, requiriéndose esta cantidad residual debido a que el cloro actúa sobre toda la materia oxidable, material orgánico, sulfuro de hidrógeno, etc. El cloro es estable en aguas ácidas, neutras y alcalinas, aunque reduce algo su efecto tóxico bajo condiciones alcalinas; cuando se requieran grandes cantidades normalmente se emplea en la forma líquida por economía y conveniencia, pero cuando las cantidades necesarias son pequeñas puede emplearse el hipoclorito de sodio o de calcio.

En la ausencia de sustancias que tengan una alta demanda de cloro, este material es el método más económico de tratamiento, por ser altamente tóxico y que rápidamente mata las bacterias, sin embargo, el cloro también daña algunos materiales como la madera de la torre de enfriamiento, por lo que su uso debe ser cuidadosamente controlado, sugiriéndose se que el cloro libre residual sea de .3 a .6 ppm en la línea de regreso de agua caliente a la torre. Debido a que el cloro no alcanza algunas partes del sistema al ser aerado en la torre, se deberá utilizar junto con otro biocida no-oxidante para eliminar los micro-organismos que crecen en las piletas

P R U E B A S D E L A G U A

De acuerdo con el programa de tratamiento de agua de enfriamiento, se deberá definir el sistema de pruebas para garantizar que se pueden obtener los resultados deseados, siendo el objetivo del programa prevenir o controlar adecuadamente lo siguiente :

- Corrosión
- Incrustaciones
- Depósitos
- Deterioro de la madera.

El sistema de pruebas incluye la definición de las pruebas y reactivos necesarios, los métodos óptimos de prueba, la referencia de análisis, así como las facilidades necesarias como resumidero con agua co-

rriente, consolas o mesas de trabajo, alumbrado adecuado, lugar libre de contaminación, con aire acondicionado (mismo lugar para análisis del circuito térmico), personal calificado y hojas de registros con interpretaciones y límites de operación.

Las pruebas específicas que normalmente se realizan en el circuito de agua de enfriamiento incluyen las que a continuación se mencionan.

Cromatos.- La determinación de cromatos se hace cuando se utilizan cromatos como inhibidores de corrosión con objeto de determinar si se está haciendo la dosificación correcta.

Polifosfatos.- Los polifosfatos se utilizan tanto para controlar la corrosión como para prevenir la incrustación por lo que se requiere determinar el contenido de polifosfatos en el agua para determinar la dosificación apropiada; en esta determinación, los polifosfatos se convierten a ortofosfatos.

pH.- El pH se emplea para controlar los depósitos y la corrosión en el sistema del agua de enfriamiento, por lo que la determinación deberá hacerse en forma precisa.

Alcalinidad Total.- La alcalinidad total se utiliza para controlar la inyección de ácido con objeto de prevenir la incrustación. Esta determinación se hace para suplementar la prueba de pH, o bien, para

en el agua de repuesto es alta.

Hierro.- La determinación de hierro se emplea en algunas ocasiones para medir el grado de corrosión en el sistema.

Sólidos Suspendidos o Turbidez.- Esta determinación se efectúa para conocer y poder controlar los depósitos en el sistema.

sustituirla cuando el equipo para este propósito no esté disponible.

Dureza Total o de Calcio.- La dureza total o de calcio del agua de enfriamiento se utiliza para regular las purgas del circuito; cuando se hace a base de los ciclos de concentración, la relación de la dureza total o de calcio del agua de circulación a la dureza total o de calcio en el agua de repuesto, es la que se emplea cuando no hay precipitación apreciable de dureza en el sistema de enfriamiento.

Cloruros.- Los ciclos de concentración se determinan también por medio de la relación de los cloruros en el circuito de agua de repuesto, empleándose para controlar las purgas; para evitar grandes errores la cantidad de cloruros deberá ser mayor de 5 ppm en el agua de repuesto.

Cloro.- La cantidad de cloro residual deberá ser determinada con mucha precisión con objeto de evitar deteriorar al equipo (madera de la torre de enfriamiento).

Sulfatos.- La determinación de sulfatos se hace para medir la cantidad de ácido que está siendo inyectado, o bien, para la regulación de purgas.

Sílice.- La determinación de sílice se hace para controlar las purgas cuando el contenido de sílice

LA MADERA EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Por su durabilidad, conveniencia y bajo costo inicial, la madera es el material mas común usado en la fabricación de las torres de enfriamiento, o en alguna proporción en el empaque o relleno y en la estructura.- Las maderas generalmente usadas son el pino rojo de California, ciprés y pino amarillo; también se emplean algunas veces el abeto Douglas, roble blanco, cedro y ayacahuite

Es una práctica común tratar la madera para la fabricación, existiendo varios métodos desarrollados por fabricantes de torres, de los cuales, los mas conocidos son:

- . Creosota
- . Arsenite Cupre Amoniacal
- . Cromato Acido de Cobre
- . Naftato de Cobre
- . Arsenato Creme Cúprico
- . Pentaclorofenol
- . Fenol-Arsen-Fluor-Crómico
- . Parafina Clorada, etc

El principal componente de la madera, es el mate-

rial celulósico, usualmente llamado celulosa, siendo aproximadamente la mitad de su peso seco. El lignino, el otro constituyente principal, comprende un tercio del peso seco. El material celuloso, es fibroso por naturaleza y consiste principalmente de una porción química estable, llamada celulosa alpha. El resto es una serie de materiales químicamente menos estables, de bajos pesos moleculares, que se conoce como hemicelulosa. La celulosa alpha es hidrolizada por ácidos diluidos a polisacáridos, los cuales se rompen en azúcar. La acción diluyente de ácidos es bastante lenta excepto a temperaturas elevadas.

El lignino es un material amorfo encontrado en la pared de las celdas como una unión entre las celdas. Es atacado tanto por alcalinidad como por agentes oxidantes, pero es insoluble en agua. Cuando una torre está en operación, la madera está sujeta a variación en las condiciones de humedad. Algunas secciones están constantemente en contacto con agua fluyendo, mientras otras están sujetas a neblina. Partes de la torre son intermitentemente salpicadas, partes son continuamente sumergidas y partes están completamente secas. Como resultado de esas condiciones, se

tienen los siguientes deterioros :

- erosión, debida al efecto del agua cayendo.
- "deslavado", el cual es selectivo debido a la amplia variación en la solubilidad de los componentes de la madera.
- deterioro químico, debido a que algunos componentes de la madera reaccionan con químicos presentes en el agua.
- decadencia, debida a micro-organismos que utilizan la madera como alimento.

Los dos últimos son los responsables del deterioro permanente.

El deterioro químico, es evidente por una pudrición aparente de la viga. El agua aparentemente extrae el lignino, dejando la madera en tiras largas fibrosas y con la masa completa tan porosa que es imposible retener los herrajes y clavos en la madera. La madera empieza a descomponerse y a perder toda su resistencia estructural. Esta pérdida ha sido definida como deslignificación.

De cualquier forma, manteniendo el pH del agua de circulación abajo de 7.5 este ataque será mantenido al mínimo.

El deterioro biológico es causado por hongos. Los hongos corresponden al reino vegetal pero difiere de muchas plantas en que no produce clorofila. Son incapaces de producir comida por fotosíntesis, pero deben llevar su alimentación de material orgánico. Los hongos son de naturaleza filamentosa y van creciendo por penetraciones de la madera con raíz parecida a filamentos. Su reproducción es por esporas, que son normalmente arrastradas por el aire y germinan en madera mojada. El crecimiento no puede ser sin la presencia de oxígeno y de humedad saturada en exceso. Esto significa que la madera seca no puede decaer y los hongos no pueden crecer en agua leñosa o madera sumergida en agua porque se excluye el oxígeno. Los hongos son, sin embargo, tolerantes a algunas variaciones en pH y temperatura. Los valores del pH abajo de 7 son óptimos y crecen en la más prolifera forma cuando la temperatura es entre 31 y 41°C. En congelación, los hongos permanecen dormidos, mientras que una temperatura de 66°C por 30 minutos es suficiente para matarlos.

Varias especies de hongos atacan preferentemente diferentes constituyentes de la madera. Algunas viven de azúcar y extractivos, pero los verdaderos hongos destructores de madera atacan

la celulosa del lignino. La mayoría, destructivos de celulosa, dejan un residuo obscuro desmoronado, rico en lignino y se conoce como "putrefacción café" o como "putrefacción blanda". El hongo que es nocivo al lignino produce "putrefacción en bolsas blancas" y reduce la madera a una masa fibrosa ligeramente coloreada. Ambas, la pudrición café y blanca, han sido encontradas en la madera de las torres de enfriamiento, con la blanca más predominante y peligrosa. La putrefacción café se ha encontrado únicamente en puntos donde la madera está en contacto con accesorios de hierro, o donde el agua gotea del hierro y la golpea. La putrefacción café es confinada a una pequeña área relativa, mientras la pudrición blanca penetra una vigueta entera, así como la madera adyacente.

El régimen de penetración de pudrición blanda es usualmente cerca de 0.25 mm/año por superficie, así que este régimen de destrucción normalmente debería ser permitida al seleccionar el espesor de la madera.

Es obvio que la inyección de sustancias químicas en el agua de enfriamiento no prevenirán el decaimiento que ocurre, principalmente en secciones de la torre no regularmente expuestas al

agua, pero minimizarán la posibilidad de infección.

Las torres de enfriamiento son protegidas más eficientemente de hongos por el tratamiento de la madera, por ejemplo, impregnación de la madera con un rociado de sulfato de cobre fuerte, seguido por una solución de cromato de sodio. El cromato de cobre tóxico precipita dentro del cuerpo de la madera. Este método de tratamiento es conocido como "doble difusión". Debido a que las sales de cobre son corrosivas al acero, esta combinación química no es muy popular.

METODOS DE CONTROL DE ATAQUE POR HONGOS

Las partes inundadas se controlan como se dijo manteniéndose:

- 1.- Control de PH abajo de 8 y preferentemente entre 6.0 y 7.0
- 2.- Uso de biocidas no oxidantes de amplio espectro biológico para el control de lamas y para prevenir ataque biológico superficial y sujeto a estudio económico.
- 3.- Cuando se use cloro, éste debe restringirse a 1 ppm y preferentemente a 0.3-0.5 ppm, suplementando con choques de biocida no oxidante de amplio espectro biológico (60-120 ppm por choque) Los residuales de cloro deben ser determinados en el retorno a torre. *la*
- 4.- Preferentemente tener un tratamiento a base de cromatos muy especialmente un sistema dianódico para inhibir corrosión de las superficies metálicas.

Con respecto a las secciones húmedas o no inundadas como paredes y techo de zona plena, eliminadores de niebla y chimenea de ventilador, se recomienda atomización neumática de biocidas de amplio espectro, teniendo precaución de limpiar con manguera antes los depósitos para que el fungicida penetre.

El tiro del ventilador debe cubrirse con un plástico.

No se recomienda usar vapor de 100 psig. (150-160°F); también puede hacerse manualmente por un hombre que entre a la cámara plena y atomice de cerca todo el maderamen.

La penetración del fungicida es normalmente de 1/16" a 1/4" y en caso de haber estado avanzada la infección biológica interna en miembros gruesos o infección superficial, es conveniente hacer la reposición de madera antes de la atomización.

Los comentarios anteriores, tienen la intención de presentar una panorámica de los problemas relacionados con destrucción de madera, y la forma de resolverlos, siendo cada caso específico sujeto a estudio individual, aconsejándose el muestreo rutinario de las zonas principales de cada celda con el correspondiente registro de reparaciones, costos etc. y la supervisión de especialistas en la materia. *la*

INTERPRETACION DE ANALISIS DE MADERA

Conociendo las causas principales del deterioro de madera, es convenientemente llevar una forma sistemática de enterarse del estado de la madera. Esa forma, es muestrear periódicamente zonas, además de hacer examen visual de las mismas; la observación indicará si la madera presenta fibrosidades tangibles con síntomas de deslignificación, si hay aspecto afibrado de ataque químico, erosión, agrietamiento fácil de fibra, color blanquecino etc.

El estudio microtómico de las células de la madera ayudan a determinar si hay ataque biológico. Este debe hacerse por expertos, en secciones de madera de 20 micras de espesor, que permiten ver la estructura interior de la madera.

La otra prueba que es importante, es la de la zona de inhibición, para determinar la penetración relativa de los fungicidas empleados, la cantidad de estos y la resistencia de la madera al crecimiento de hongos y ataque, si la muestra se inocula con organismos que normalmente la descomponen.

Las muestras son cubitos de $\frac{1}{2}$ " que se colocan en Agar inoculado con *Aspergillus Niger* o *Chaetomium Globosum* u otros microorganismos y se incuban por 7 días a 20°C.

Una buena protección se indica por una zona clara de inhibición, alrededor de la muestra.

En el caso de la zona de inhibición completa, esta se ha formado por efecto del fungicida que hay en la madera y debe notarse que no hay crecimiento sobre la misma.

Esta resistencia resulta de la aplicación de fungicida a la madera.

En el segundo caso de inhibición parcial, queda algo de efecto de fungicida residual. Puede verse que hay desarrollo de microorganismos en el nutriente pero no el Block y el desarrollo de esporas ha sido retrasado.