



28

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE  
UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO  
HÚMEDA DE TIRO MECÁNICO  
INDUCIDO.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO  
P R E S E N T A :  
ELEAZAR ULISES FLORES LARA

ASESOR DE TESIS:  
ING. EVERARDO ESQUIVEL SÁNCHEZ

2995772

MÉXICO 2001.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# **AGRADECIMIENTOS**

## **A DIOS**

**Principio y Fin de todo.**

## **A MIS MAESTROS**

**Por compartir sus conocimientos conmigo.**

## **AL ING. EVERARDO ESQUIVEL SANCHEZ**

**Por guiarme sabiamente durante el desarrollo de mi tesis. Por la paciencia y facilidades otorgadas.**

## **A LUIS A. FLORES GOMEZ**

**Por la asesoría técnica prestada en materia de computación.**

# CONTENIDO

	Pág.
<b>PRESENTACION</b> .....	2
<b><u>CAPITULO I</u> INTRODUCCION</b> .....	4
I.1 Clasificación de centrales eléctricas. ....	4
I.2 Sistema de agua de circulación (S.A.C.) en centrales termoeléctricas. ....	9
I.2.1 ¿En dónde está ubicado el S.A.C.? .....	9
I.2.2 Modos de operación del S.A.C. ....	11
<b><u>CAPITULO II</u> CLASIFICACION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO</b> .....	15
II.1 Torres de enfriamiento húmedas. ....	17
II.2 Torres de enfriamiento secas. ....	26
II.3 Torre de enfriamiento húmeda-seca. ....	28
<b><u>CAPITULO III</u> ELEMENTOS Y SISTEMAS BASICOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO HUMEDAS (CIRCULACION FORZADA)</b> .....	31
<b><u>CAPITULO IV</u> TEORIA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO HUMEDA</b> .....	41
IV.1 Conceptos fundamentales. ....	41
IV.2 Comportamiento de una torre de enfriamiento húmeda (circulación forzada). ....	49
IV.2.1 Ecuación de Merkel (Valor característico de la torre de enfriamiento). ....	49
IV.2.2 Influencia de las condiciones y de las variables de operación. ...	54
IV.3 Cálculo de la eficiencia de una torre de enfriamiento húmeda de tiro mecánico inducido. ....	59
IV.3.1 Cálculo de la eficiencia a partir de datos de diseño y de prueba. ....	59
IV.3.2 Cálculo de la eficiencia por el Método Gráfico. ....	63
<b><u>CAPITULO V</u> EJEMPLOS DE CALCULO</b> .....	65
V.1 Eficiencia a partir de datos de diseño y de prueba. ....	65
V.2 Eficiencia por el Método Gráfico. ....	76
<b>CONCLUSIONES</b> .....	77
<b>ANEXOS</b> .....	79
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	105

## PRESENTACION

Durante la realización de mi servicio social en la Coordinación de Proyectos Termoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), desarrollé gran cantidad de actividades vinculadas con una parte importante de los conocimientos adquiridos a lo largo de mi licenciatura.

Los proyectos que se llevan a cabo en la C.F.E., ofrecen una gama extensa de temas a desarrollar en una tesis profesional. Uno de esos temas es el que tomo como base para elaborar mi tesis: "Evaluación de la eficiencia de una torre de enfriamiento húmeda de tiro mecánico inducido".

Existen diversos tipos de torres de enfriamiento, uno de ellos es la torre de enfriamiento húmeda de tiro mecánico inducido, ésta es utilizada en algunas centrales generadoras de electricidad; del funcionamiento óptimo de la torre de enfriamiento depende en buena medida la cantidad de electricidad que la central generadora garantiza producir.

La finalidad que persigo en el presente trabajo es la de ofrecer de la manera más sencilla posible una visión general de los siguientes puntos:

- Por qué tiene que intervenir una torre de enfriamiento en el funcionamiento de algunas centrales generadoras de electricidad.
- Clasificar y exponer las características de los tipos de torres de enfriamiento existentes.
- Exponer dos de cuatro métodos utilizados para evaluar la eficiencia de una torre de enfriamiento húmeda de tiro mecánico inducido.

El valor de la eficiencia es un indicador del buen o mal funcionamiento de la torre de enfriamiento. A cualquier tipo de torre se le puede determinar la eficiencia; para la que considero en mi tesis existen cuatro formas de hallarla (cada una con sus gráficas respectivas). Los otros tipos emplean métodos distintos cada uno, si sumáramos todos serían bastantes (cada uno con sus gráficas respectivas).

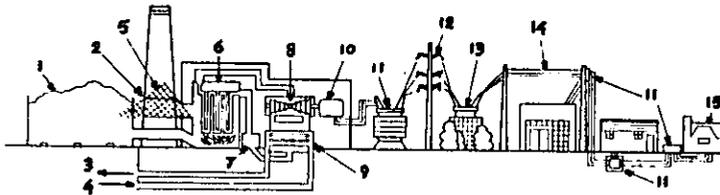
# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### I.1 CLASIFICACION DE CENTRALES ELECTRICAS.

Se llama planta de generación a toda estación que transforma una energía primaria dada en otra forma de energía utilizable, eléctrica en nuestro caso.

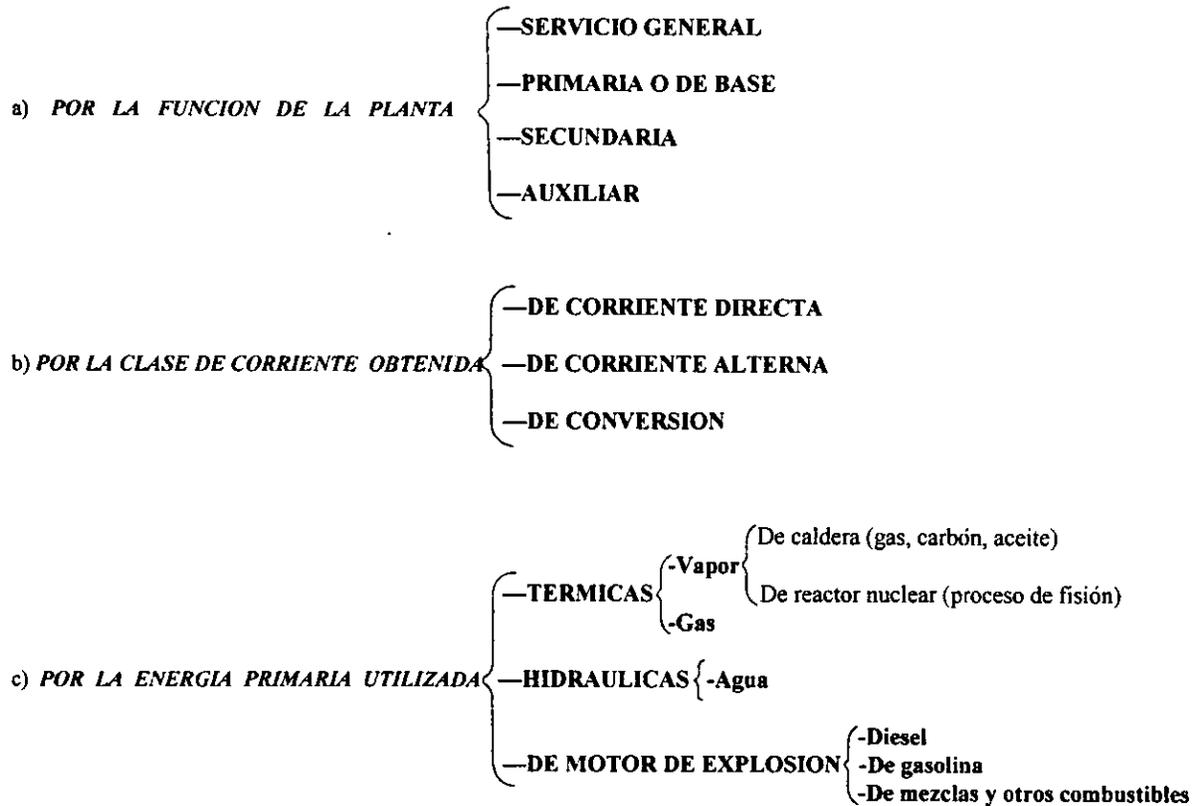
El nombre *centrales eléctricas* es más restrictivo, limitándose a las --- plantas de generación eléctrica destinadas a abastecer un área más o me-- nos extensa, por medio de múltiples líneas de transmisión y estaciones de distribución. En la figura I.1, se presenta un tipo de central eléctrica, en la que se observa la forma de generar y distribuir la energía.



- |                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 1. Carbón                         | 8. Turbina                 |
| 2. Filtros                        | 9. Condensador             |
| 3. Agua caliente                  | 10. Generador              |
| 4. Agua fría                      | 11. Transformadores        |
| 5. Precipitadores electrostáticos | 12. Líneas de transmisión  |
| 6. Generador de vapor             | 13. Subestación            |
| 7. Bomba de agua                  | 14. Líneas de distribución |
|                                   | 15. Residencia             |

Fig. I.1 Esquema de generación y distribución de la energía a partir de una central termoeléctrica.

En cuanto a la forma de producción de energía eléctrica y campo de -- utilización de la misma, las centrales eléctricas se clasifican de la siguiente manera:



**Tabla 1.1** Clasificación de las centrales eléctricas.

## **I.2 SISTEMA DE AGUA DE CIRCULACION (S.A.C.) EN CENTRALES TERMOELECTRICAS.**

### **I.2.1 ¿EN DONDE ESTA UBICADO EL S.A.C.?**

De acuerdo con la clasificación que se presenta en la tabla I.1, las centrales termoeléctricas se subdividen en dos: las que utilizan como fluido de trabajo en la turbina el vapor de agua y las que utilizan gas. En lo sucesivo, centramos nuestra atención en las centrales termoeléctricas subdivisión de vapor. El funcionamiento de este tipo de centrales, está basado en el ciclo Rankine, que es el ciclo térmico generador de potencia a base de vapor.

Para los fines de este subcapítulo (ubicar física y funcionalmente el S.A.C. en la central y el ciclo térmico empleado), y del trabajo en general, no es necesario tener que recurrir a la exposición teórica rigurosa del ciclo Rankine; baste con presentar una visión muy elemental de dicho ciclo.

La figura I.2.1.1, muestra el esquema básico de operación de una central termoeléctrica, además de su respectivo sistema de enfriamiento [más comúnmente llamado sistema de agua de circulación (S.A.C.)]. En el proceso entra energía en forma de calor ( $Q_{entra}$ ) que se aplica al agua en la caldera [1] y en el recalentador [2]; sale también energía en forma de calor ( $Q_{sale}$ ) por el dispositivo [6], conocido como condensador. Se aplica energía de arrastre ( $W_{entra}$ ) por medio de la bomba de agua [7]; se obtiene este mismo tipo de energía ( $W_{sale}$ ) en la turbina [3], la cual es aplicada a través del eje [4] al generador eléctrico [5]. No se pierda de vista que el fluido de trabajo a lo largo del ciclo es agua en sus fases líquida y vapor.

En la figura I.2.1.2, podemos observar el diagrama de operación de la misma central.

La energía en forma de calor no aprovechable por la central, es decir, la energía que sale a través del condensador debe entregarse directa o in-

lor del agua antes de depositarla nuevamente en la fuente natural; la figura 1.2.2.3, muestra una disposición del sistema combinado, existen otras -- que pueden consultarse en textos especializados en el tema.

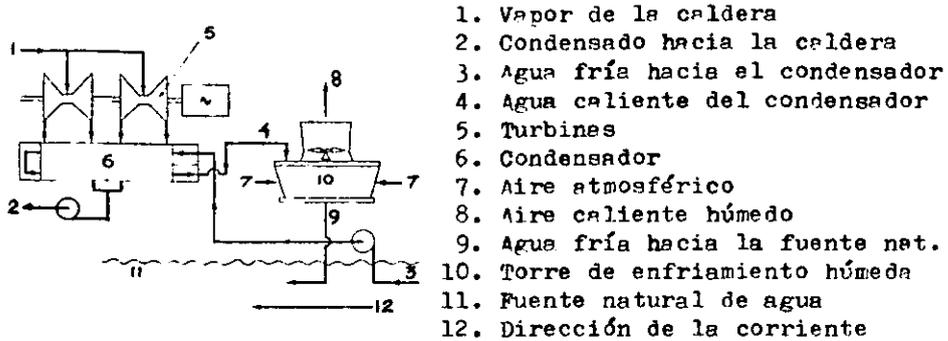


Fig. 1.2.2.3 Sistema de agua de circulación combinado.

En el desarrollo de este punto, hemos hecho mención del concepto *torre de enfriamiento húmeda*; es precisamente de este tipo de dispositivo de enfriamiento de donde surge el tema central del presente trabajo. Sin embargo, en el siguiente capítulo expondremos de manera breve una clasificación general de las torres de enfriamiento.

## CAPITULO II

### CLASIFICACION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

De una forma general, la torre de enfriamiento se puede definir como un dispositivo que se utiliza para enfriar agua de una manera artificial. Existen dos formas de lograr el enfriamiento: 1a) poner el agua en contacto directo con aire; 2a) hacer fluir aire sobre la superficie de un conducto que contenga al agua. En el primer caso, los procesos que promoverán el enfriamiento del agua son la transferencia de masa y la transferencia de calor sensible; en el segundo, la transferencia de calor sensible únicamente.

Una manera de clasificar a las torres de enfriamiento es la que se muestra en la tabla II.1. Los criterios utilizados en esta clasificación son: a) si existe o no contacto directo entre el agua y el aire; b) la forma en que el aire se introduce a la torre.

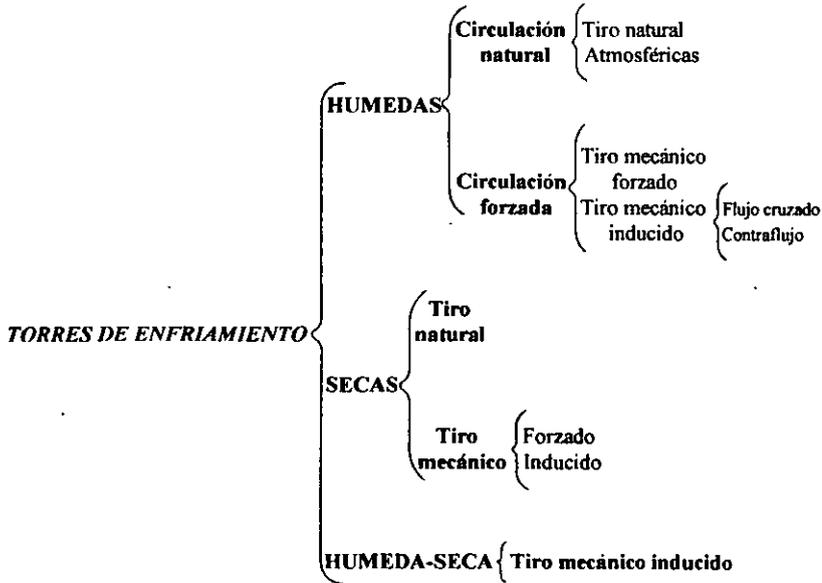


Tabla II.1 Clasificación de torres de enfriamiento.

Cuando se desea agua a una temperatura cercana a la de bulbo húmedo, este tipo de torre es incapaz de producirla.

Las torres atmosféricas tienen un costo inicial alto debido a su tamaño y cuando hay calma deben dejar de operarse. Sin embargo, tienen una gran ventaja, eliminan el costo principal de operación de las torres de tiro mecánico, es decir, el costo que implica la utilización del abanico.

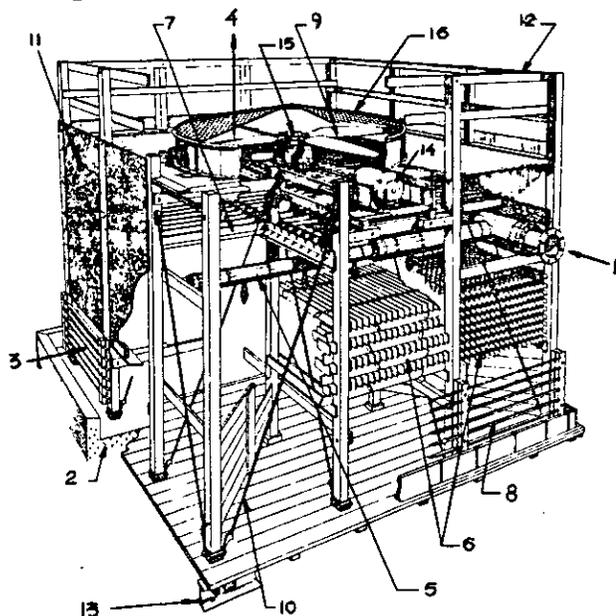
Un promedio de velocidad que exceda las 5 ó 6 millas por hora no es indicación suficiente de que la torre atmosférica sea la mejor. Con un promedio de velocidad en el viento de 5 millas por hora la torre operará a menos de su capacidad térmica de diseño parte del tiempo. La localización de la torre en un lugar con vientos de 5 millas por hora debe ser tal que no debe tener obstrucciones y debe aprovechar completamente las corrientes existentes.

En las torres atmosféricas deben enfatizarse las características del viento. En las torres de tiro natural la consideración primordial debe darse a las características de temperatura del aire.

### **Torres de tiro mecánico**

En este tipo de torres el aire se hace circular a través de ellas impulsándolo por medio de abanicos mecánicos. Pueden ser de *tiro forzado*, en las que el abanico se coloca en la parte inferior de una de las paredes de la torre, forzando con ello la entrada de aire al dispositivo. Existen también las de *tiro inducido*, en las cuales el aire entra por las persianas colocadas en las paredes de la torre, en este caso el abanico se encuentra en la parte superior de la torre.

*Torres de tiro forzado.* En estas torres la distribución del aire es relativamente pobre, puesto que este debe dar un giro de aproximadamente 90° a gran velocidad, en consecuencia el aire se descarga a baja velocidad a través de una gran abertura en la parte superior de la torre. Esta baja velo-



1. Agua caliente
2. Pileta colectora de agua fría
3. Entrada de aire (por los cuatro lados)
4. Salida de aire
5. Sistema de distribución de agua caliente
6. Relleno
7. Eliminadores de errastre
8. Persianas
9. Abanico
10. Varillas de acero
11. Cubierta de asbesto-cemento
12. Barandal
13. Vigas de acero
14. Motor
15. Reductor de velocidad
16. Malla de alambre

*Fig. II.1.5 Torre de enfriamiento húmeda - tiro mecánico inducido (contraflujo).*

Algunos datos técnicos de las torres de tiro inducido se presentan - a continuación:

- Pérdida de agua por arrastre: usualmente no mayor de 0.2%.
- Pérdida de agua por evaporación: usualmente no mayor de 2%.
- Flujo volumétrico de agua por pie<sup>2</sup> de área de sección transversal de la torre: de 1 a 8 GPM con contraflujo; un mínimo de 14 GPM con flujo - cruzado.
- Flujo másico de aire por pie<sup>2</sup> de área de sección transversal de la torre: de 20 a 30 lb/min.
- Caída de presión del aire: un máximo de 2 pulgadas de agua.
- Rango de enfriamiento: de 7.2 a 18 °F.
- Aproximación del agua fría: mayor a 5 °F.

Las torres de tiro mecánico inducido son, en la práctica, las de mayor- empleo en nuestro país.

Las principales ventajas de las torres de tiro mecánico son: garantizan la cantidad de aire requerida a cargas de agua y condiciones climáticas -- cualesquiera; baja inversión inicial de capital; relativamente poco material para su construcción. Sus principales desventajas son: el consumo de potencia en los abanicos; sus costos de operación y mantenimiento; mucho ruido durante su operación.

húmeda. Por otro lado, si se desea aumentar el flujo de aire en la sección-húmeda durante el verano, simplemente se hace lo contrario, es decir, bloquear mediante el dispositivo adecuado la entrada de aire a la parte seca, incrementando con ello el flujo de aire en la parte húmeda. Cabe aclarar que el bloqueo del flujo de aire tanto en invierno como en verano no es total.

### CAPITULO III

## **ELEMENTOS Y SISTEMAS BASICOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO HUMEDAS (CIRCULACION FORZADA)**

### **ESTRUCTURA**

El diseño de la estructura de estas torres de enfriamiento se encuentra afectado por las diferentes formas, tamaños y modos de operación que --- existen de estos equipos, así como por los diferentes materiales de construcción.

Para un buen diseño de la configuración de la estructura de la torre se debe tomar en cuenta, principalmente, la forma de proporcionar la mejor-distribución del flujo de aire, lo cual está en función del perfil de la base- y de cómo se pretende hacer entrar el aire a la torre; no debe perderse de vista tampoco, el diámetro y el número de abanicos necesario para proporcionar el flujo de aire requerido.

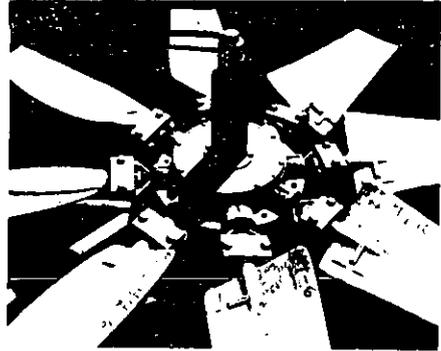
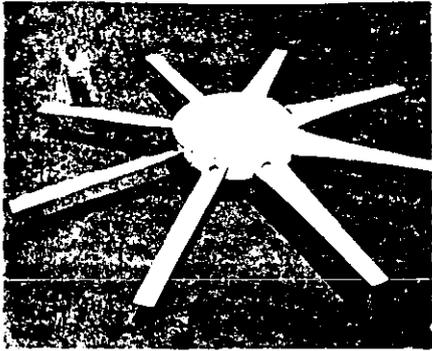
Los materiales más usuales para la construcción de la estructura son - los siguientes:

— **La madera.** Tiene normalmente una vida útil de 12 a 15 años, siendo el material más comúnmente usado debido a su disponibilidad y bajo costo.

— **El concreto.** Tiene algunas desventajas, como son: alto costo inicial, tiempo de construcción prolongado y requiere mano de obra especializada.

— **El acero.** Se ha utilizado en muy pocas ocasiones debido a su costo elevado y a que su vida útil en este tipo de aplicaciones es de 6 a 8 años como consecuencia de la atmósfera húmeda que prevalece.

En los últimos años, la tendencia en cuanto a los materiales de construcción se ha enfocado hacia el asbesto-cemento y la fibra de vidrio.



*Fig. III.1* Abanicos típicos utilizados en las torres de enfriamiento húmedas con circulación forzada.

## **PILETA**

La pileta receptora del agua fría está situada en la parte inferior de la torre de enfriamiento, aquélla debe proveerse de un sistema de filtración para evitar que el agua fría arrastre materiales extraños hacia el condensador. Es en este elemento en donde se recibe el agua de repuesto para el S.A.C.

Las principales conexiones de la pileta son: agua de repuesto y de llenado, dispositivo de sobreflujo, desagüe de fondo, purga, rejillas del cárcamo de bombeo e inyección de inhibidor de corrosión, ácido y cloro. Generalmente la pileta se construye de concreto, éstas deben tener pendiente normal hacia el cárcamo de bombeo. Casi siempre funcionan como cimentación de la torre misma.

## **CILINDRO**

El cilindro de los abanicos se utiliza para: ayudar a eliminar la turbulencia del aire en la garganta; en caso de que tenga altura suficiente, producir un efecto de chimenea en la expulsión del aire; actuar como guarda del abanico.

En el caso del cilindro del tipo de recuperación de velocidad con garganta Venturi de altura igual a 13 pies o más, se recupera la carga de velocidad de la corriente de aire descargada, en la forma de presión reducida, con lo cual se incrementa la eficiencia de los abanicos.

La superficie interior de estos elementos debe ser lisa para lograr un máximo de flujo de aire; para evitar fugas en la base debe equiparse con las juntas apropiadas. El claro entre la punta de las aspas y el cilindro normalmente se especifica entre  $13/32$  y  $1/2$  de pulgada, con tolerancia de  $+1/8$  de pulgada; este claro es importante por el efecto que tiene sobre la eficiencia del ventilador.

Tanto los materiales de construcción del cilindro, como de tornillos y demás herrajes de las juntas, deberán ser resistentes al deterioro que les imponen las condiciones que prevalecen en la atmósfera de la torre.

## **SISTEMA DE DISTRIBUCION DEL AGUA CALIENTE**

En los sistemas de distribución de agua de las torres de circulación forzada el agua caliente proveniente del condensador es bombeada a la parte superior del aparato, para que por medio de algún método pase a través del relleno.

Existen distintos sistemas de distribución del agua, entre los cuales se encuentran los siguientes:

**1. Distribución por gravedad.** Utilizado principalmente en torres de flujo cruzado, en este caso el agua caliente se distribuye sobre una charola de concreto abierta a la intemperie, desde la cual a través de unos orificios el agua fluye hacia el relleno por gravedad [Fig. III.2(a)].

**2. Distribución por rocío.** Utilizado preferentemente en torres de contraflujo; consiste en una red de tubería cruzada, con boquillas atomizadoras del agua que apuntan hacia el relleno [Fig. III.2(b)].

3. **Distribución giratoria.** Consiste en una estructura con dos brazos-distribuidores acanalados que giran alrededor de un cubo por donde el agua caliente circula a presión. Las canales apuntan hacia el relleno, pero no de manera perpendicular, esto provoca que la fuerza de la cortina de agua, producto de su choque con el relleno, genere el movimiento de los brazos. La velocidad de rotación es de alrededor de 25 a 30 RPM; esta velocidad está en función de la posición que guarden las canales con respecto al relleno [Fig. III.2(c)].

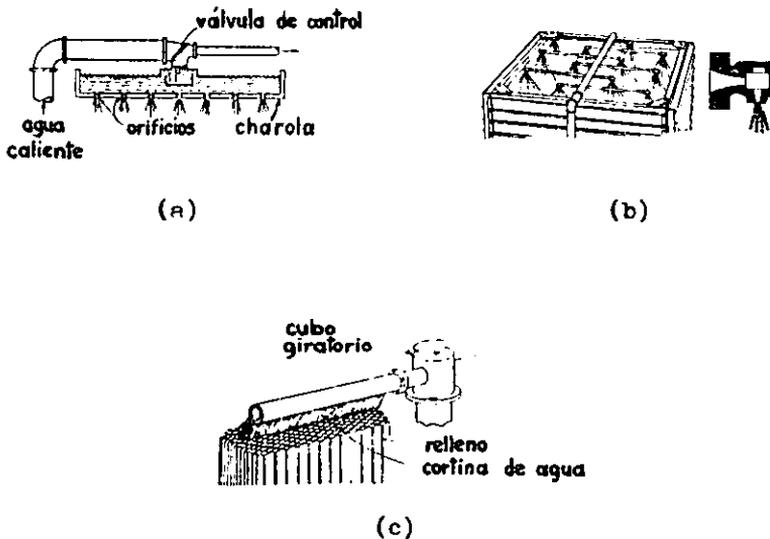


Fig. III.2 Sistema de distribución del agua: a) Por gravedad, b) Por roció, c) Giratorio.

## RELLENO

El relleno (o empaque) es el corazón de la torre de enfriamiento. Este debe cumplir dos funciones básicas: procurar un máximo de contacto entre el agua y el aire con el fin de obtener gran transferencia de calor y de masa entre ambos, y presentar un mínimo de resistencia al flujo de aire. El

superficie de aquélla. La película de agua fluye adherida a la superficie -- de la placa sin formación de gotas, disminuyendo de esta forma la caída -- de presión a través de la torre, esto permite un aumento en el flujo volu-- métrico del aire de entrada [Fig. III.3(b)]. Este tipo de relleno se presenta en las siguientes formas y materiales:

— *Entablillado de madera roja*. Se construye con tablas de canto es-- trecho; las tablas de cada capa se colocan a  $90^\circ$  con respecto a las de las -- capas de arriba y de abajo. El canto estrecho permite un buen flujo de ai-- re.

— *Placas formando células*. Se construyen de plástico reforzado. La -- parte inferior de las placas adopta el perfil “punta diente de sierra”, con -- lo que se logra un mojado uniforme.

— *Placas de asbesto-cemento*. Tienen un espesor de aproximadamen-- te 0.2 pulgadas; el espacio entre cada placa es de alrededor de 0.75 pulga-- das.

— *Placas onduladas*. Se hacen de plástico o metálicas. Su configura-- ción les permite, en dado momento, expulsar materiales extraños que pu-- diera contener el agua a enfriar.

El relleno tipo película ofrece resistencia mínima al paso del aire y su altura es menor que la del tipo salpiqueo.

## ELIMINADORES DE ARRASTRE

El arrastre se presenta cuando el aire de circulación se lleva una cierta cantidad de agua pero no precisamente por evaporación sino en forma de pequeñas gotas de agua. Esta agua se suma a las pérdidas que sufre el S.A.C., sólo que en este caso el agua perdida, estrictamente hablando, no contribuye a la remoción de calor como en el caso del agua que se pierde por evaporación. El arrastre se minimiza empleando los eliminadores de arrastre, que simplemente son tablas largas, angostas y de poco espesor -- colocadas en arreglos de una, dos o tres hileras, tal como se ve en la figura III.4.

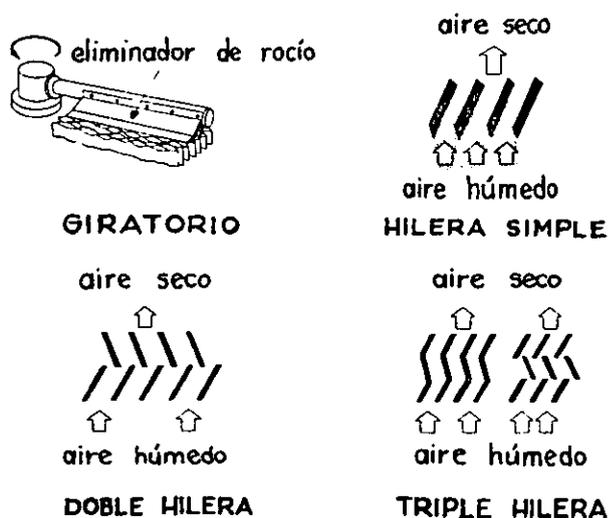


Fig. III.4 Tipos de eliminadores de arrastre.

Básicamente los eliminadores de arrastre funcionan forzando al aire a realizar un cambio brusco de dirección, con lo que la fuerza centrífuga resultante separa las gotas de agua lanzándolas contra las tablas que com-

## CAPITULO IV

### TEORIA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO HUMEDA

#### IV.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

Existen procesos de transferencia de calor en los que los fluidos caliente y frío se encuentran separados por medio de superficies impermeables. -- Una de las principales razones para emplear dichas superficies es la de -- prevenir la contaminación de los fluidos. Cuando uno de los fluidos es un gas y el otro es un líquido, la superficie impermeable es a menudo innecesaria; puesto que puede no haber problema de contaminación mutua, el -- gas y el líquido se separan fácilmente después de ponerse en contacto e intercambiar calor. Generalmente, la mayor intimidad de contacto directo permite lograr coeficientes de transferencia de calor mayores que en -- los procesos con equipos en donde existen las superficies impermeables.

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

Dentro de la teoría básica de la torre de enfriamiento húmeda se manejan conceptos cuyo conocimiento es necesario para comprender (por lo -- menos en forma elemental) los procesos que se manifiestan durante el funcionamiento de estas torres. Enseguida se exponen dichos conceptos.

**Difusión.** Si el aire seco a temperatura constante se satura con agua a la misma temperatura en un aparato de contacto directo, el vapor de -- agua que sale con el aire lleva consigo su calor latente de vaporización. -- En estas condiciones, la humedad de la mezcla aire-vapor de agua aumenta durante la saturación debido a que la presión de vapor en la superficie del agua es mayor que aquella en el aire no saturado, dando por resultado una vaporización.

La temperatura del agua puede mantenerse constante durante la saturación

$$Q = RL(C_p) \quad (\text{IV.1.1.a})$$

donde

R = rango de enfriamiento [ $^{\circ}\text{F}$ ].

L = flujo de agua de circulación [GPM].

$C_p$  = calor específico del agua.

Asumiendo que el  $C_p = 1$ , obtenemos:

$$Q = RL \quad (\text{IV.1.1.b})$$

Introduciendo un factor de conversión de 8.34 con el fin de obtener las unidades requeridas, llegamos finalmente a:

$$Q = 8.34RL \text{ [Btu/min]} \quad (\text{IV.1.1.c})$$

**Curvas de comportamiento y Curvas características de una torre de enfriamiento húmeda (circulación forzada).** Las *curvas de comportamiento* de este tipo de torres, muestran la temperatura del agua de salida que produciría la torre al operar con una determinada temperatura de bulbo húmedo en el ambiente. En dichas curvas se presenta también una gama de rangos de enfriamiento y de flujos de agua de circulación.

Refiriéndonos a un solo valor del rango y del flujo de agua, la curva correspondiente se puede ver modificada a causa del deterioro físico que la torre sufre durante su vida útil, es decir, la temperatura del agua de salida que entregará la torre a una determinada temperatura de bulbo húmedo dependerá del estado en que se encuentre el equipo.

Las *curvas características* proporcionan valores que se pueden utilizar como una medida de la eficiencia de la torre de enfriamiento. Estas, relacionan a los valores  $L/G$  y  $KaV/L$  de diseño (estos dos conceptos se aclaran más adelante), en la siguiente forma:

$$KaV/L = c(L/G)^n + m \quad (IV.1.2)$$

donde

**K** = coeficiente de transferencia de masa.

**a** = área de contacto.

**V** = volumen de enfriamiento activo.

**L** = flujo de agua de circulación.

**G** = flujo de aire.

**c,n,m** = constantes para una torre dada.

Cada gráfica corresponde a una combinación fija de temperatura de bulbo húmedo y rango de enfriamiento, aparece también la aproximación como parámetro.

En la figura IV.1.2, podemos apreciar los dos tipos de curvas.

## IV.2 COMPORTAMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO HUMEDA (CIRCULACION FORZADA).

### IV.2.1 ECUACION DE MERKEL (Valor característico de la torre de enfriamiento).

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento húmeda que ha tenido mayor aceptación, es la que desarrolló Merkel - en el año de 1925.

Merkel desarrolla el concepto de funcionamiento de la torre de enfriamiento, que se fundamenta en una diferencia de entalpías como potencial impulsor de la energía. Esta diferencia de entalpías proviene de la correspondiente a la supuesta película de aire que se encuentra rodeando a cada partícula de agua, y a la correspondiente al aire circundante.

Al existir una diferencia de entalpías se presentará una transferencia - de calor entre el agua y el aire: ¿en qué forma?:

1a) Transferencia de calor sensible por convección, debida a la diferencia existente entre las temperaturas del agua y de bulbo seco del aire.

2a) Transferencia de masa (extracción de calor latente), producto de la diferencia entre las presiones de vapor en la superficie del agua y en el aire.

En la torre de enfriamiento, la transferencia de calor del agua al aire - está representada por el aumento de entalpía que éste adquiere conforme - asciende.

La ecuación de Merkel se expresa en forma integrada de la manera siguiente:

$$KaV/L = \int_{T_2}^{T_1} [dT/(H - h)] \quad (IV.2.1.1)$$

donde

El agua entra por arriba de la torre a una temperatura  $T_a$ , mientras que el aire entra por el lado izquierdo con una entalpía  $h_c$ . En el incremento 1, el aire entra con entalpía  $h_c$  y sale con entalpía  $h_1$ . También en el incremento 1, el agua entra a una temperatura  $T_a$  y sale a una temperatura  $T_1$ . La entalpía del aire a la entrada del incremento 2 es  $h_1$ , y la temperatura del agua a la entrada del 4 es  $T_1$ . Las temperaturas del agua a la salida de los incrementos 7, 8 y 9, en el fondo de la torre, son  $T_7$ ,  $T_8$  y  $T_9$ , respectivamente. Estas temperaturas son todas diferentes y los flujos se combinan para formar un flujo único de temperatura  $T_b$ .

Al hacer el análisis de la torre de flujo cruzado de la figura IV.2.1.2, - deben calcularse primeramente las condiciones a la salida del incremento 1, después se consideran los incrementos 2 y 4, a continuación los 3, 5 y 7, siguiendo los 6 y 8, y finalmente el 9. Si la torre se divide en un gran -- número de incrementos, la media aritmética de las diferencias de entalpía de cada incremento será lo suficientemente precisa para utilizarla en la -- ecuación (IV.2.1.1).

#### IV.2.2 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES Y DE LAS VARIABLES DE OPERACION.

**Influencia de las condiciones de operación.** Es importante analizar - los efectos que provoca en el tamaño requerido de la torre de enfriamien-- to, el cambio en las condiciones de operación. Cinco de las condiciones -- que afectan el tamaño de la torre se indican en la figura IV.2.2.1. Estas se analizan mejor mediante el diagrama entalpía-temperatura. A menor o ma-- yor área de la torre, se requerirá una altura mayor o menor de la misma, -- respectivamente, para cumplir con las condiciones de operación.

a) *Sequedad del aire a la entrada.* Hasta aquí se ha hecho referencia-- sólamante a la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada y no a su temperatura de bulbo seco. Se ha supuesto idéntica con el bulbo húmedo, es decir, adiabáticamente saturada. Suponga que el aire está a un bulbo se-- co de 78 °F cuando el bulbo húmedo es de 75 °F; el aire estará no satura--

ma razón  $L/G$ , ya que la línea de operación  $(h_1)-(h_2)$  intersectaría la curva de saturación. Obviamente, la transferencia de calor se detendría en la intersección  $(H_2)$ , puesto que el potencial sería cero en ese punto. Se requerirá un cociente  $L/G$  considerablemente menor, lo que a su vez significa - que debe circularse más aire para la remoción de la misma carga térmica.

e) *Elevación.* Algunas plantas se localizan a elevaciones considerables. ¿Debe ésto mencionarse como una condición de operación? A una presión atmosférica reducida, la curva de saturación es más alta, como se ve en el inciso (e) de la figura IV.2.2.1, lo que a su vez aumenta el potencial y reduce el tamaño requerido de la torre si las otras condiciones son constantes. Esto se debe a que la presión parcial del agua es fija, mientras que la presión total ha disminuido. La humedad del aire saturado a elevación considerable es también mayor.

**Influencia de las variables de operación.** Ya que una torre de enfriamiento usa la atmósfera como medio de enfriamiento, está también sujeta a las variaciones de ésta. Cuando se opera al bulbo húmedo de diseño la torre deberá producir agua en el rango y temperatura especificados en la garantía. Sin embargo, cuando el bulbo húmedo baja, es lo mismo que aumentar el potencial en la torre. Si la carga térmica y los valores de  $L$  y  $G$  - circulados a través de la torre se mantienen constantes el agua pasa por el mismo número de grados de enfriamiento, pero las temperaturas de entrada y salida serán menores que las garantizadas. Las temperaturas del agua varían de acuerdo con el bulbo húmedo.

Si en alguna forma las cargas de agua y aire en una torre se cambian, - el potencial también se altera. Ordinariamente las cargas en una celda no pueden cambiarse considerablemente. De hecho, una variación de 20% -- del promedio de carga de agua del diseño es el máximo que puede manejarse ya que el sistema de distribución de agua se ha escogido para un flujo dado a carga determinada. La máxima capacidad de descarga será de 120% de diseño, y cuando se usa menos del 80% de la carga de diseño se reduce la dispersión del agua sobre el relleno, junto con la cantidad total - de agua. La carga de aire puede regularse variando el paso de las aspas --

1.4 Trazar sobre papel logarítmico la curva característica con los  $n$  pares ordenados ( $L/G, KaV/L$ ) obtenidos.

## 2. DETERMINACION DE LA CURVA DE REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

(Se utilizan sólo datos de diseño)

2.1 Considerar un valor razonable de  $L/G$ .

2.2 Calcular su respectivo valor de  $KaV/L$ .

Los pasos 2.1 y 2.2, se repiten por lo menos tres veces.

2.3 Trazar la curva de requerimientos de diseño con los pares ordenados ( $L/G, KaV/L$ ) obtenidos. Esta curva se traza en la misma gráfica donde se trazó la curva característica.

## 3. CALCULAR LOS VALORES $G$ Y $L$ ESPERADOS A CONDICIONES DE DISEÑO ( $G'$ )<sub>dis</sub> Y ( $L'$ )<sub>dis</sub>

(Se utilizan datos de diseño y de prueba)

3.1 Calcular el volumen específico promedio del aire ( $Va'$ ), para valores de diseño.

3.2 Calcular los valores  $G'$  y  $L/G'$ .

El paso 3.2 se aplica a cada conjunto de datos de prueba.

3.3 Calcular los valores ( $G'$ )<sub>dis</sub> y ( $L'$ )<sub>dis</sub>.

## 4. DETERMINAR LA EFICIENCIA A LA QUE OPERA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Existen otros pequeños cálculos en el desarrollo de este procedimiento, éstos serán expuestos con detalle en el ejemplo que al respecto se ana-

## CAPITULO V EJEMPLOS DE CALCULO

### V.1 EFICIENCIA A PARTIR DE DATOS DE DISEÑO Y DE PRUEBA.

Determinar la eficiencia de una torre de enfriamiento húmeda de tiro mecánico inducido (contraflujo), a partir de los siguientes datos:

DATO	SIMBOLO	UNIDAD	VALOR		
			Diseño	Pba. # 1	Pba. # 2
FLUJO DE AGUA DE CIRCULACION	L	GPM	14,000	13,100	14,700
TEMPERATURA DEL AGUA DE ENTRADA	T <sub>ae</sub>	°F	116	114.20	111.90
TEMPERATURA DEL AGUA DE SALIDA	T <sub>as</sub>	°F	86	82.70	83.90
RANGO	R	°F	30	31.50	28
TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO	T <sub>bh</sub>	°F	76	71.40	72
APROXIMACION	A	°F	10	11.30	11.90
POTENCIA AL FRENO DEL VENTILADOR	HP	Hp	230	218	221
FLUJO DE AIRE	G	pie <sup>3</sup> /min	1'750,000	1'810,000	1'790,000
Presión barométrica	—	pulg Hg		29.92	

### PROCEDIMIENTO DE CALCULO

#### 1. DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA

Para los datos de la prueba # 1

1.1 Se dispone de los siguientes datos:

$$L = 13,100 \text{ GPM}$$

$$G = 1'810,000 \text{ pie}^3/\text{min}$$

$$R = 31.50 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{bh\text{entrada}} = T_{bh1} = 71.40 \text{ }^\circ\text{F} \text{ (de tablas: } h_1 = 35.30 \text{ Btu/lb de aire seco)}$$

Conviene realizar aquí los siguientes cálculos:

$$L = (13,100)(8.34) = 109,254 \text{ lb de agua/min}$$

que se resolverá por el método de Tchebycheff.

De la ecuación (IV.2.1.2), se tiene que:

$$h_2 = h_1 + (T_1 - T_2)(L/G) = 39.57 + (116 - 86)(0.800)$$

$$h_2 = 63.57 \text{ Btu/lb de aire seco}$$

Con los valores de que se dispone, se puede determinar ahora el valor buscado.

T	H	h	H - h	1/(H - h)
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 89$	54.56	$h_1 + 0.1(h_2 - h_1) = 41.97$	12.59	0.0749
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 98$	68.23	$h_1 + 0.4(h_2 - h_1) = 49.17$	19.06	0.0525
$T_1 - 0.4(T_1 - T_2) = 104$	79.32	$h_2 - 0.4(h_2 - h_1) = 59.37$	25.35	0.0394
$T_1 - 0.1(T_1 - T_2) = 113$	99.71	$h_2 - 0.1(h_2 - h_1) = 61.17$	38.54	0.0259

$$\sum[1/(H - h)] = 0.1972$$

$$KaV/L = [(T_1 - T_2)/4] \{ \sum[1/(H - h)] \} = [(116 - 86)/4](0.1972)$$

$$KaV/L = 1.479$$

Los pasos 2.1 y 2.2 se repiten dos veces más. Los valores de L/G a considerar son: 1.000 y 1.200. Para la determinación de los valores respectivos de KaV/L se sigue el mismo procedimiento que en el paso 2.2; los datos para su determinación son los mismos en las tres veces que se repite el cálculo.

Los valores que se obtienen son:

para L/G = 1.000, se obtiene KaV/L = 1.647  
 para L/G = 1.200, se obtiene KaV/L = 1.868

### 2.3 Trazado de la curva de requerimientos de diseño.

Los siguientes valores de L/G (supuestos) y KaV/L (determinados),

0.885	123,446.81
0.960	(G') <sub>dis</sub>
1.008	121,450

de donde

$$(G')_{dis} = 123,297.05 \text{ lb de aire seco/min}$$

Utilizando la ecuación (IV.3.1.3) hallamos (L')<sub>dis</sub>.

$$(L')_{dis} = (G')_{dis}(L/G)_{dis} = (123,297.05)(0.960)$$

$$(L')_{dis} = 118,365.17 \text{ lb de agua/min}$$

#### 4. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA A LA QUE OPERA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

Para hallar la eficiencia de la torre se utilizan los siguientes valores:

$$L = 14,000 \text{ GPM} = 116,760 \text{ lb de agua/min (dato de dise\~{n}o)}$$

$$(L')_{dis} = 118,365.17 \text{ lb de agua/min (valor determinado)}$$

y nos auxiliamos de la ecuación (IV.3.1.4); entonces:

$$\% \eta = [(L')_{dis}/L \text{ de dise\~{n}o}]100 = (118,365.17/116,760)100$$

$$\% \eta = \mathbf{101.37}$$

En el anexo A-V(a), está contenido un programa de computadora codificado en lenguaje BASIC, con el que se puede realizar todo el cálculo anterior. En el anexo A-V(b), se muestra un formato de hoja que se puede utilizar para llevar un control de valores que han sido determinados con ayuda de dicho programa.

## CONCLUSIONES

La torre de enfriamiento es un dispositivo que se utiliza para enfriar agua de una manera artificial. Desde el ineludible punto de vista ecológico, las razones que sustentan su uso son básicamente dos: a) evitar la contaminación térmica de las fuentes naturales de agua, b) ahorrar una considerable cantidad de agua cuando ésta es utilizada como medio refrigerante en algún proceso. Existen diversos tipos y arreglos de torres de enfriamiento.

En lo referente a centrales termoeléctricas subdivisión de vapor, la torre de enfriamiento es el elemento principal del sistema de agua de circulación cerrado. Aquí, la torre actúa enfriando agua y al mismo tiempo completa el ciclo térmico de la planta generadora. Se ha visto que la temperatura disponible en el agua de enfriamiento es un importante factor económico en el diseño de las plantas de fuerza.

La torre de enfriamiento tiene un impacto directo sobre la eficiencia del ciclo termodinámico empleado en la central termoeléctrica. Un comportamiento deficiente de la torre produce un incremento de la temperatura del agua de enfriamiento, ocasionando con ello, un abatimiento de la eficiencia térmica de la central.

Al incrementarse la temperatura del agua de enfriamiento, la presión en el condensador se incrementa provocando una menor expansión del vapor en la turbina y, consecuentemente, menor generación; es práctica usual para mantener la generación nominal de la central, aumentar el gasto de combustible en el generador de vapor (hasta donde las limitaciones de diseño del generador de vapor lo permiten), provocando con ello, un mayor consumo unitario de combustible (dicho en otras palabras, un mayor gasto de dinero en la generación de la energía).

Por esta poderosa razón, el estudio de la torre de enfriamiento es de gran importancia para las plantas de fuerza que la utilizan.

Una forma de verificar el comportamiento de la torre de enfriamiento

## ANEXOS

**A-IV(a)** Método de Tchebycheff para evaluar la integral  $\int_a^b y dx$ .

**A-IV(b)** Propiedades termodinámicas para mezclas aire-vapor de agua a una presión de 29.92 pulg Hg.

- Entalpía de saturación.
- Volumen específico de saturación.

**A-IV(c)** Gráficas de comportamiento.

- Gráfica de  $R = 10$  °F.
- Gráfica de  $R = 15$  °F.
- Gráfica de  $R = 25$  °F.
- Gráfica de  $Tbh = 60$  °F.
- Gráfica de  $Tbh = 70$  °F.
- Gráfica de  $Tbh = 80$  °F.

**A-V(a)** Programa de computadora para evaluar la eficiencia de una torre de enfriamiento húmeda de tiro mecánico inducido.

**A-V(b)** Hoja de Control para el programa de computadora del anexo A-V(a).

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

# Anexo A-IV(b)

(continuación)

82

Entalpía de saturación [Btu/lb de aire seco]

°F	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
66	30.83	30.90	30.98	31.06	31.14	31.22	31.30	31.38	31.46	31.54
67	31.62	31.70	31.78	31.86	31.94	32.02	32.10	32.18	32.26	32.34
68	32.42	32.50	32.59	32.67	32.75	32.83	32.92	33.00	33.08	33.17
69	33.23	33.33	33.41	33.50	33.58	33.66	33.74	33.83	33.91	34.00
70	34.09	34.17	34.25	34.34	34.43	34.51	34.60	34.69	34.78	34.87
71	34.95	35.04	35.13	35.22	35.30	35.39	35.48	35.57	35.66	35.75
72	35.83	35.92	36.01	36.10	36.19	36.28	36.37	36.46	36.56	36.65
73	36.74	36.83	36.92	37.01	37.10	37.20	37.29	37.38	37.48	37.57
74	37.66	37.76	37.85	37.94	38.04	38.13	38.23	38.32	38.41	38.51
75	38.61	38.70	38.80	38.89	38.98	39.08	39.18	39.27	39.37	39.47
76	39.57	39.67	39.77	39.87	39.97	40.07	40.17	40.27	40.37	40.47
77	40.57	40.67	40.77	40.87	40.97	41.07	41.17	41.27	41.37	41.48
78	41.58	41.68	41.78	41.88	41.99	42.10	42.20	42.30	42.41	42.52
79	42.62	42.73	42.84	42.94	43.05	43.16	43.26	43.37	43.47	43.58
80	43.69	43.80	43.91	44.01	44.12	44.23	44.34	44.45	44.56	44.67
81	44.78	44.89	45.00	45.11	45.22	45.34	45.45	45.56	45.67	45.78
82	45.90	46.01	46.12	46.23	46.35	46.46	46.58	46.70	46.81	46.92
83	47.04	47.15	47.27	47.39	47.51	47.63	47.74	47.86	47.98	48.10
84	48.22	48.34	48.46	48.58	48.70	48.82	48.94	49.06	49.18	49.30
85	49.43	49.55	49.67	49.79	49.91	50.03	50.15	50.28	50.40	50.53
86	50.66	50.78	50.90	51.03	51.16	51.28	51.41	51.54	51.67	51.80
87	51.93	52.06	52.19	52.32	52.45	52.58	52.71	52.84	52.97	53.10
88	53.23	53.36	53.49	53.62	53.75	53.88	54.02	54.15	54.28	54.42
89	54.56	54.69	54.82	54.96	55.09	55.23	55.37	55.51	55.65	55.79
90	55.93	56.07	56.21	56.35	56.49	56.63	56.77	56.91	57.05	57.19
91	57.33	57.47	57.61	57.76	57.90	58.05	58.19	58.34	58.48	58.63
92	58.78	58.92	59.07	59.21	59.36	59.50	59.65	59.80	59.95	60.10
93	60.25	60.40	60.55	60.70	60.85	61.00	61.15	61.31	61.46	61.61
94	61.77	61.92	62.07	62.23	62.38	62.54	62.69	62.85	63.00	63.16
95	63.32	63.48	63.63	63.79	63.95	64.11	64.27	64.44	64.60	64.76
96	64.92	65.08	65.25	65.41	65.58	65.74	65.90	66.06	66.23	66.39
97	66.53	66.72	66.88	67.05	67.22	67.39	67.56	67.73	67.90	68.07
98	68.23	68.40	68.57	68.74	68.91	69.08	69.26	69.43	69.61	69.78
99	69.96	70.14	70.32	70.50	70.67	70.85	71.02	71.20	71.38	71.55
100	71.73	71.91	72.09	72.27	72.45	72.63	72.82	73.00	73.19	73.37
101	73.53	73.73	73.92	74.11	74.29	74.48	74.67	74.86	75.04	75.23
102	75.42	75.62	75.82	76.01	76.20	76.39	76.58	76.77	76.96	77.15
103	77.34	77.54	77.73	77.93	78.12	78.32	78.52	78.72	78.92	79.12
104	79.32	79.52	79.72	79.92	80.12	80.32	80.52	80.72	80.93	81.13
105	81.34	81.54	81.75	81.95	82.16	82.37	82.58	82.79	83.00	83.21
106	83.42	83.63	83.84	84.05	84.26	84.48	84.69	84.91	85.12	85.34
107	85.56	85.77	85.99	86.21	86.43	86.65	86.87	87.10	87.32	87.54
108	87.76	87.99	88.22	88.44	88.67	88.89	89.11	89.34	89.57	89.80
109	90.03	90.25	90.48	90.71	90.94	91.17	91.40	91.64	91.87	92.10
110	92.34	92.57	92.81	93.05	93.29	93.52	93.76	94.00	94.24	94.48
111	94.72	94.96	95.21	95.45	95.70	95.94	96.19	96.44	96.68	96.93
112	97.18	97.43	97.68	97.93	98.18	98.43	98.68	98.94	99.19	99.45
113	99.71	99.96	100.22	100.48	100.74	101.00	101.26	101.52	101.78	102.05
114	102.31	102.58	102.84	103.10	103.37	103.63	103.90	104.17	104.44	104.71
115	104.98	105.25	105.52	105.79	106.06	106.34	106.61	106.89	107.17	107.45
116	107.73	108.01	108.29	108.57	108.85	109.13	109.41	109.70	109.98	110.27
117	110.55	110.84	111.13	111.42	111.71	112.00	112.29	112.58	112.87	113.16
118	113.46	113.75	114.05	114.35	114.65	114.95	115.25	115.55	115.86	116.16
119	116.46	116.77	117.07	117.38	117.69	118.00	118.30	118.61	118.92	119.23
120	119.34	119.65	120.17	120.48	120.80	121.12	121.44	121.76	122.08	122.40
121	122.72	123.04	123.36	123.68	124.01	124.34	124.67	125.00	125.33	125.65
122	125.98	126.31	126.64	126.98	127.31	127.65	127.99	128.33	128.67	129.01
123	129.33	129.69	130.03	130.37	130.72	131.06	131.41	131.75	132.10	132.45
124	132.80	133.15	133.50	133.85	134.21	134.57	134.93	135.29	135.66	136.03
125	136.4	136.7	137.1	137.5	137.8	138.2	138.6	139.0	139.3	139.7
126	140.1	140.5	140.8	141.2	141.6	142.0	142.3	142.7	143.1	143.5
127	143.9	144.3	144.7	145.1	145.5	145.9	146.3	146.7	147.1	147.4
128	147.8	148.2	148.6	149.0	149.4	149.8	150.2	150.6	151.0	151.4
129	151.8	152.2	152.6	153.0	153.4	153.8	154.2	154.6	155.1	155.5
130	155.9	156.3	156.8	157.2	157.6	158.0	158.5	158.9	159.4	159.8
131	160.3	160.7	161.2	161.6	162.0	162.5	162.9	163.4	163.8	164.2
132	164.7	165.1	165.6	166.0	166.5	167.0	167.4	167.9	168.3	168.8
133	169.3	169.7	170.2	170.7	171.1	171.6	172.1	172.6	173.0	173.5
134	174.0	174.5	175.0	175.4	175.9	176.4	176.9	177.4	177.9	178.4
135	178.9	179.4	179.9	180.4	180.9	181.4	181.9	182.4	182.9	183.4

# Anexo A-IV(b)

(continuación)

83

Entalpia de saturación [Btu/lb de aire seco]

°F	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
136	181.9	184.4	184.9	185.4	185.9	186.4	186.9	187.4	188.0	188.5
137	189.0	189.3	190.0	190.6	191.1	191.6	192.2	192.7	193.3	193.8
138	194.4	194.9	195.5	196.0	196.6	197.1	197.6	198.2	198.8	199.4
139	199.9	200.5	201.1	201.7	202.2	202.8	203.4	204.0	204.5	205.1
140	203.7	206.3	206.9	207.5	208.1	208.7	209.3	209.9	210.4	211.0
141	211.6	212.2	212.8	213.4	214.0	214.6	215.2	215.8	216.4	217.0
142	217.7	218.3	218.9	219.5	220.2	220.8	221.5	222.1	222.8	223.4
143	224.1	224.7	225.3	226.0	226.6	227.3	228.0	228.6	229.3	229.9
144	230.6	231.3	232.0	232.6	233.3	234.0	234.7	235.3	236.0	236.7
145	237.4	238.1	238.8	239.5	240.2	240.9	241.6	242.3	243.0	243.7
146	244.4	245.1	245.8	246.5	247.2	248.0	248.7	249.5	250.2	250.9
147	251.7	252.4	253.2	254.0	254.7	255.5	256.2	257.0	257.7	258.5
148	259.3	260.0	260.8	261.6	262.4	263.2	263.9	264.7	265.5	266.3
149	267.1	267.9	268.7	269.5	270.3	271.1	271.9	272.7	273.5	274.4
150	275.3	276.1	276.9	277.7	278.5	279.4	280.2	281.1	281.9	282.8
151	283.6	284.5	285.3	286.2	287.1	287.9	288.8	289.7	290.6	291.5
152	292.4	293.3	294.2	295.1	296.0	296.9	297.8	298.7	299.7	300.6
153	301.3	302.4	303.3	304.3	305.2	306.1	307.1	308.0	309.0	309.9
154	310.9	311.9	312.8	313.8	314.8	315.4	316.8	317.8	318.8	319.8
155	320.8	321.8	322.8	323.8	324.8	325.8	326.9	327.9	328.9	330.0
156	331.0	332.1	333.1	334.2	335.2	336.3	337.4	338.4	339.5	340.6
157	341.7	342.8	343.9	345.0	346.1	347.4	348.3	349.4	350.5	351.6
158	352.7	353.8	355.0	356.1	357.2	358.4	359.5	360.7	361.9	363.0
159	364.2	365.4	366.6	367.8	369.0	370.2	371.4	372.6	373.8	375.1
160	376.3	377.5	378.8	380.0	381.2	382.5	383.7	385.0	386.3	387.5
161	388.8	390.1	391.4	392.7	394.0	395.3	396.6	398.0	399.3	400.7
162	402.0	403.3	404.7	406.1	407.4	408.8	410.2	411.5	412.9	414.3
163	415.7	417.1	418.5	419.9	421.3	422.7	424.1	425.5	427.0	428.4
164	429.9	431.4	432.9	434.3	435.8	437.4	438.9	440.4	441.9	443.5
165	445.0	446.5	448.1	449.6	451.2	452.8	454.3	455.9	457.5	459.1
166	460.7	462.3	463.9	465.6	467.2	468.9	470.5	472.2	473.8	475.5
167	477.2	478.9	480.6	482.3	484.0	485.7	487.4	489.2	490.9	492.6
168	494.4	496.2	497.9	499.7	501.5	503.3	505.1	506.9	508.7	510.6
169	512.4	514.3	516.1	518.0	519.9	521.8	523.7	525.7	527.6	529.5
170	531.3	533.3	535.4	537.4	539.4	541.4	543.4	545.4	547.4	549.5
171	551.3	553.6	555.6	557.7	559.8	562.0	564.1	566.2	568.4	570.5
172	572.7	574.9	577.1	579.2	581.4	583.7	585.9	588.1	590.4	592.6
173	594.9	597.2	599.5	601.8	604.1	606.4	608.8	611.1	613.5	615.9
174	618.3	620.7	623.2	625.6	628.1	630.6	633.1	635.6	638.1	640.6
175	643.2	645.8	648.3	650.9	653.5	656.1	658.7	661.4	664.0	666.7
176	669.4	672.1	674.8	677.6	680.4	683.1	685.9	688.8	691.6	694.4
177	697.3	700.2	703.1	706.0	708.9	711.9	714.8	717.8	720.8	723.9
178	728.9	730.9	733.0	736.1	739.2	742.4	745.5	748.7	751.9	755.1
179	758.3	761.6	764.9	768.1	771.4	774.8	778.1	781.5	784.9	788.4
180	791.8	795.3	798.7	802.2	805.8	809.3	812.9	816.5	820.1	823.7
181	827.4	831.1	834.8	838.6	842.4	846.2	850.1	853.9	857.8	861.8
182	863.7	867.9	871.6	875.6	881.7	885.7	889.8	894.0	898.1	902.3
183	906.4	910.8	915.0	919.4	923.7	928.1	932.5	937.0	941.4	946.0
184	950.3	955.1	959.7	964.3	968.9	973.6	978.4	983.2	988.0	992.8
185	998.	1003.	1008.	1013.	1018.	1023.	1028.	1033.	1038.	1044.
186	1049.	1054.	1060.	1065.	1070.	1076.	1081.	1087.	1093.	1098.
187	1104.	1110.	1116.	1121.	1127.	1133.	1139.	1145.	1152.	1158.
188	1164.	1170.	1177.	1183.	1189.	1196.	1202.	1209.	1216.	1222.
189	1229.	1236.	1243.	1250.	1257.	1264.	1271.	1279.	1286.	1294.
190	1301.	1308.	1316.	1323.	1331.	1339.	1346.	1354.	1362.	1370.
191	1378.	1386.	1394.	1403.	1411.	1420.	1429.	1437.	1446.	1455.
192	1464.	1473.	1482.	1491.	1501.	1510.	1520.	1529.	1539.	1549.
193	1539.	1549.	1559.	1569.	1579.	1589.	1599.	1609.	1619.	1629.
194	1666.	1678.	1689.	1700.	1712.	1723.	1735.	1747.	1759.	1772.
195	1784.	1797.	1809.	1822.	1836.	1849.	1862.	1876.	1890.	1904.
196	1918.	1932.	1947.	1961.	1976.	1991.	2006.	2022.	2037.	2053.
197	2069.	2085.	2102.	2119.	2136.	2153.	2170.	2188.	2206.	2224.
198	2243.	2262.	2281.	2300.	2319.	2339.	2359.	2380.	2401.	2422.
199	2443.	2465.	2487.	2509.	2532.	2555.	2579.	2603.	2627.	2652.
200	2677.	2702.	2728.	2755.	2781.	2809.	2836.	2864.	2893.	2922.

**Anexo A-IV(b)**

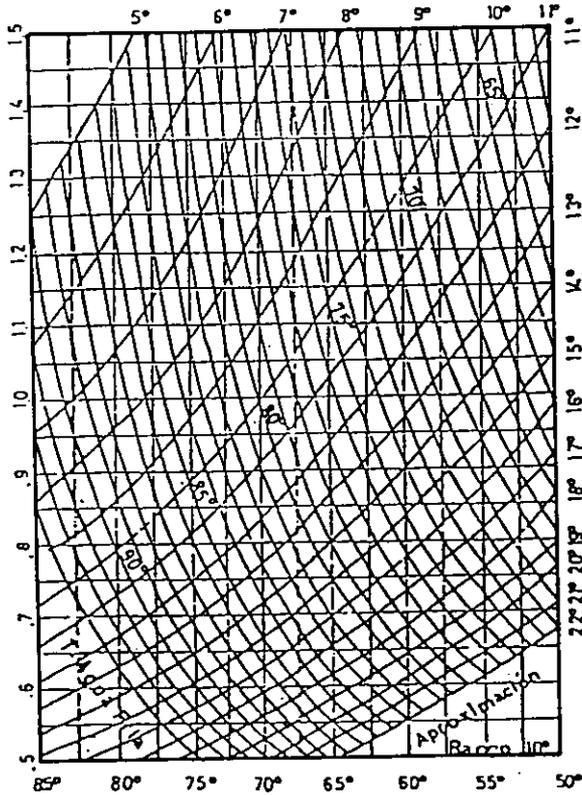
(continuación)

Volumen específico de saturación [pie<sup>3</sup> de mezcla/lb de aire seco]

°F	0.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
60	13.329	13.332	13.336	13.339	13.343	13.346	13.349	13.353	13.356	13.360
61	13.363	13.367	13.370	13.374	13.377	13.381	13.384	13.388	13.391	13.395
62	13.398	13.402	13.405	13.409	13.412	13.416	13.419	13.423	13.426	13.430
63	13.433	13.437	13.440	13.444	13.447	13.451	13.454	13.458	13.461	13.465
64	13.468	13.472	13.475	13.479	13.482	13.486	13.490	13.493	13.497	13.500
65	13.504	13.508	13.511	13.515	13.518	13.522	13.525	13.529	13.532	13.536
66	13.539	13.543	13.546	13.550	13.554	13.558	13.561	13.565	13.569	13.572
67	13.576	13.580	13.583	13.587	13.591	13.595	13.598	13.602	13.606	13.609
68	13.613	13.617	13.620	13.624	13.628	13.632	13.635	13.639	13.643	13.646
69	13.650	13.654	13.657	13.661	13.665	13.669	13.672	13.676	13.680	13.683
70	13.587	13.691	13.694	13.698	13.702	13.706	13.709	13.713	13.717	13.720
71	13.724	13.728	13.732	13.735	13.739	13.743	13.747	13.751	13.754	13.758
72	13.762	13.766	13.770	13.774	13.778	13.782	13.785	13.789	13.793	13.797
73	13.801	13.805	13.809	13.813	13.817	13.821	13.825	13.829	13.833	13.837
74	13.841	13.845	13.849	13.853	13.857	13.861	13.865	13.869	13.873	13.877
75	13.881	13.885	13.889	13.893	13.897	13.901	13.905	13.909	13.913	13.917
76	13.921	13.925	13.929	13.933	13.937	13.942	13.946	13.950	13.954	13.958
77	13.962	13.966	13.970	13.974	13.978	13.983	13.987	13.991	13.995	13.999
78	14.003	14.007	14.011	14.016	14.020	14.024	14.028	14.032	14.037	14.041
79	14.045	14.049	14.053	14.058	14.062	14.066	14.070	14.074	14.079	14.083
80	14.087	14.091	14.096	14.100	14.104	14.109	14.113	14.117	14.121	14.126
81	14.130	14.135	14.139	14.143	14.148	14.152	14.156	14.161	14.165	14.170
82	14.174	14.178	14.183	14.187	14.192	14.196	14.200	14.205	14.209	14.214
83	14.218	14.222	14.227	14.231	14.236	14.240	14.245	14.249	14.254	14.258
84	14.263	14.267	14.272	14.276	14.281	14.285	14.290	14.294	14.299	14.303
85	14.308	14.313	14.317	14.322	14.326	14.331	14.336	14.340	14.345	14.349
86	14.354	14.359	14.363	14.368	14.373	14.377	14.382	14.387	14.391	14.396
87	14.401	14.405	14.410	14.415	14.420	14.424	14.429	14.434	14.439	14.443
88	14.448	14.453	14.458	14.462	14.467	14.472	14.477	14.482	14.486	14.491
89	14.496	14.501	14.506	14.511	14.516	14.521	14.526	14.530	14.535	14.540
90	14.545	14.550	14.555	14.560	14.565	14.570	14.575	14.580	14.585	14.590
91	14.595	14.600	14.605	14.610	14.615	14.620	14.625	14.630	14.635	14.640
92	14.645	14.650	14.656	14.661	14.666	14.671	14.676	14.681	14.686	14.692
93	14.697	14.702	14.707	14.712	14.718	14.723	14.728	14.733	14.738	14.744
94	14.749	14.754	14.760	14.765	14.770	14.776	14.781	14.786	14.791	14.797
95	14.802	14.808	14.813	14.818	14.824	14.829	14.835	14.840	14.845	14.851
96	14.856	14.862	14.867	14.873	14.878	14.884	14.889	14.895	14.900	14.906
97	14.911	14.917	14.922	14.928	14.933	14.939	14.944	14.950	14.956	14.961
98	14.967	14.972	14.978	14.984	14.989	14.996	15.001	15.007	15.012	15.018
99	15.024	15.029	15.035	15.041	15.047	15.052	15.058	15.064	15.070	15.076
100	15.081	15.087	15.093	15.099	15.105	15.111	15.117	15.123	15.128	15.134
101	15.140	15.146	15.152	15.158	15.164	15.170	15.176	15.182	15.188	15.194
102	15.200	15.206	15.212	15.218	15.224	15.231	15.237	15.243	15.249	15.255
103	15.261	15.267	15.273	15.280	15.286	15.292	15.298	15.304	15.311	15.317
104	15.323	15.330	15.336	15.342	15.348	15.355	15.361	15.368	15.374	15.380
105	15.387	15.393	15.400	15.406	15.413	15.419	15.426	15.432	15.439	15.445
106	15.452	15.458	15.465	15.471	15.478	15.485	15.491	15.498	15.504	15.511
107	15.518	15.524	15.531	15.538	15.544	15.551	15.558	15.565	15.572	15.578
108	15.585	15.592	15.599	15.606	15.613	15.620	15.626	15.633	15.640	15.647
109	15.654	15.661	15.668	15.675	15.682	15.689	15.696	15.703	15.710	15.717
110	15.724	15.731	15.739	15.746	15.753	15.760	15.767	15.775	15.782	15.789
111	15.796	15.803	15.811	15.818	15.825	15.833	15.840	15.847	15.855	15.862
112	15.869	15.877	15.884	15.892	15.899	15.907	15.914	15.922	15.929	15.937
113	15.944	15.952	15.959	15.967	15.974	15.982	15.990	15.997	16.005	16.013
114	16.020	16.029	16.036	16.044	16.051	16.059	16.067	16.075	16.083	16.090
115	16.098	16.106	16.114	16.122	16.130	16.138	16.146	16.154	16.162	16.170
116	16.178	16.186	16.194	16.202	16.210	16.218	16.227	16.235	16.243	16.251
117	16.259	16.268	16.276	16.284	16.293	16.301	16.309	16.318	16.326	16.334
118	16.343	16.351	16.360	16.368	16.377	16.385	16.394	16.402	16.411	16.420
119	16.428	16.437	16.446	16.454	16.463	16.472	16.480	16.489	16.498	16.507
120	16.515	16.524	16.533	16.542	16.551	16.560	16.569	16.578	16.587	16.596
121	16.605	16.614	16.623	16.632	16.641	16.650	16.659	16.669	16.678	16.687
122	16.696	16.705	16.715	16.724	16.734	16.743	16.752	16.762	16.771	16.781
123	16.790	16.800	16.809	16.819	16.828	16.838	16.848	16.857	16.867	16.876
124	16.886	16.896	16.906	16.916	16.926	16.936	16.945	16.955	16.965	16.975

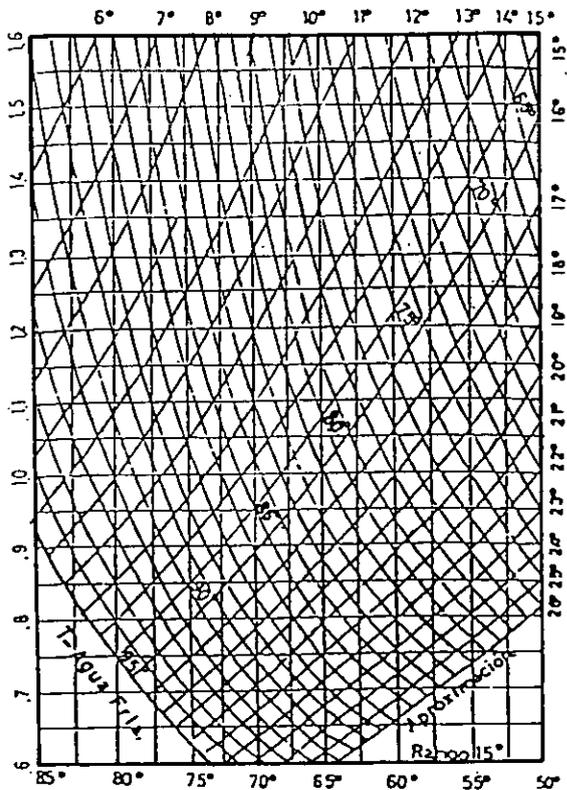
# Anexo A-IV(c)

## GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO.



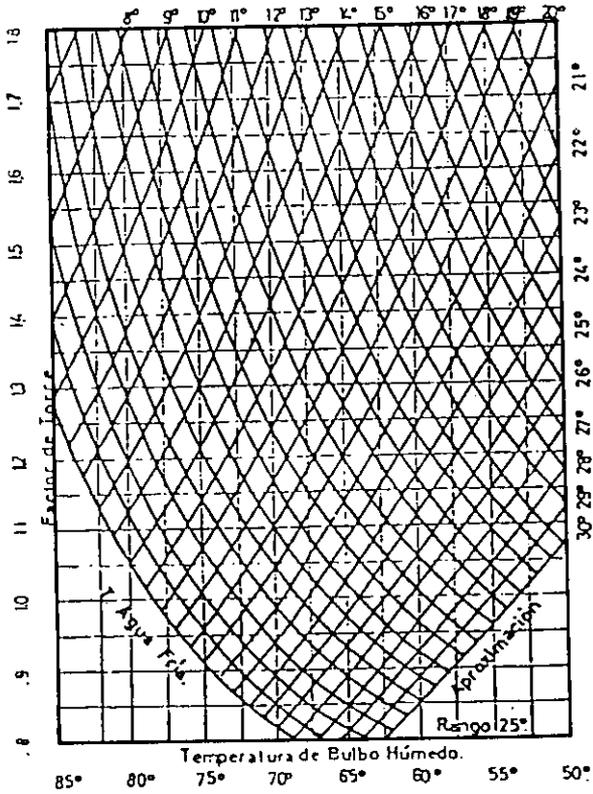
Gráfica de R = 10 °F

**Anexo A-IV(c)**  
(continuación)



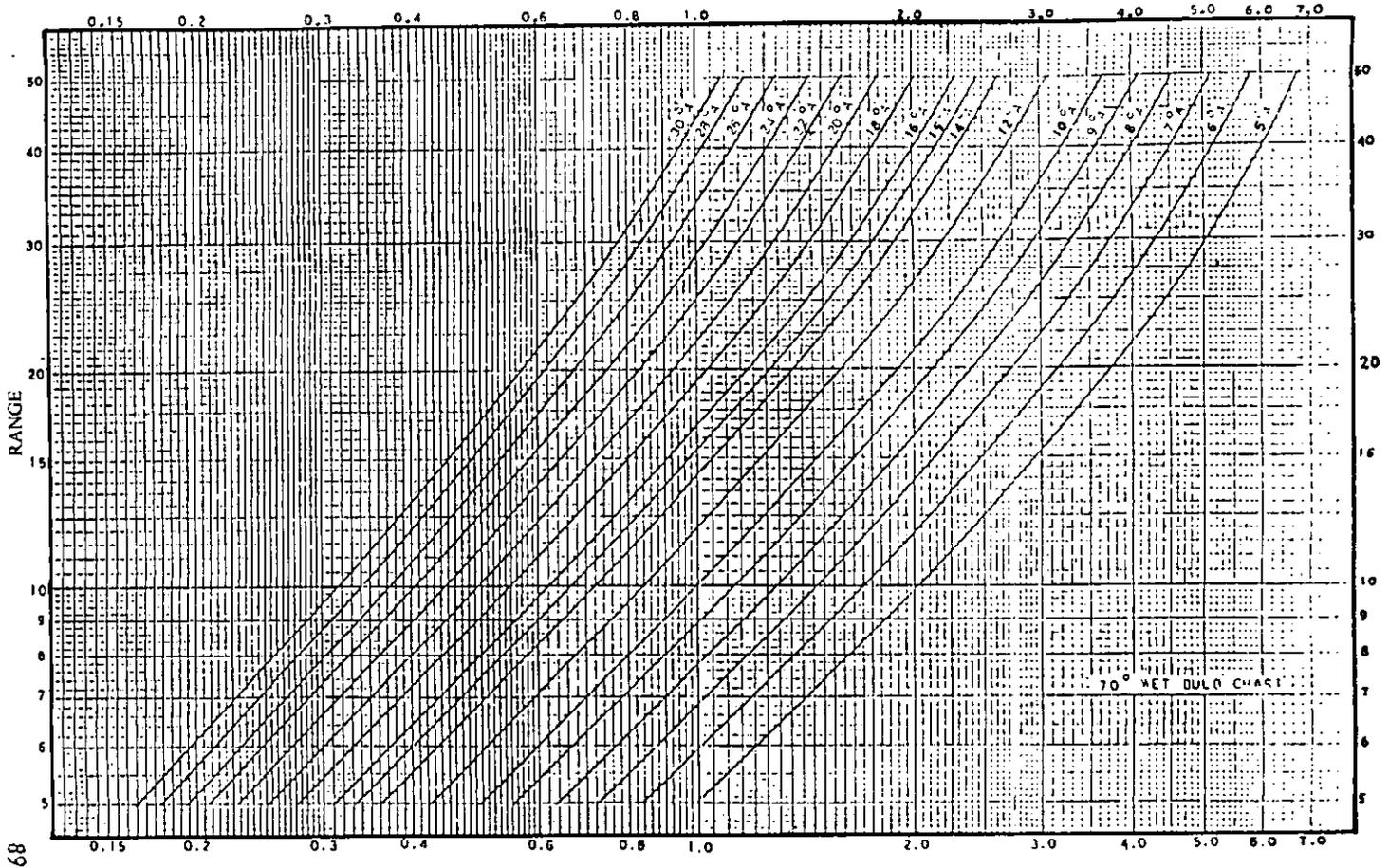
Gráfica de  $R = 15 \text{ } ^\circ\text{F}$

**Anexo A-IV(c)**  
(continuación)



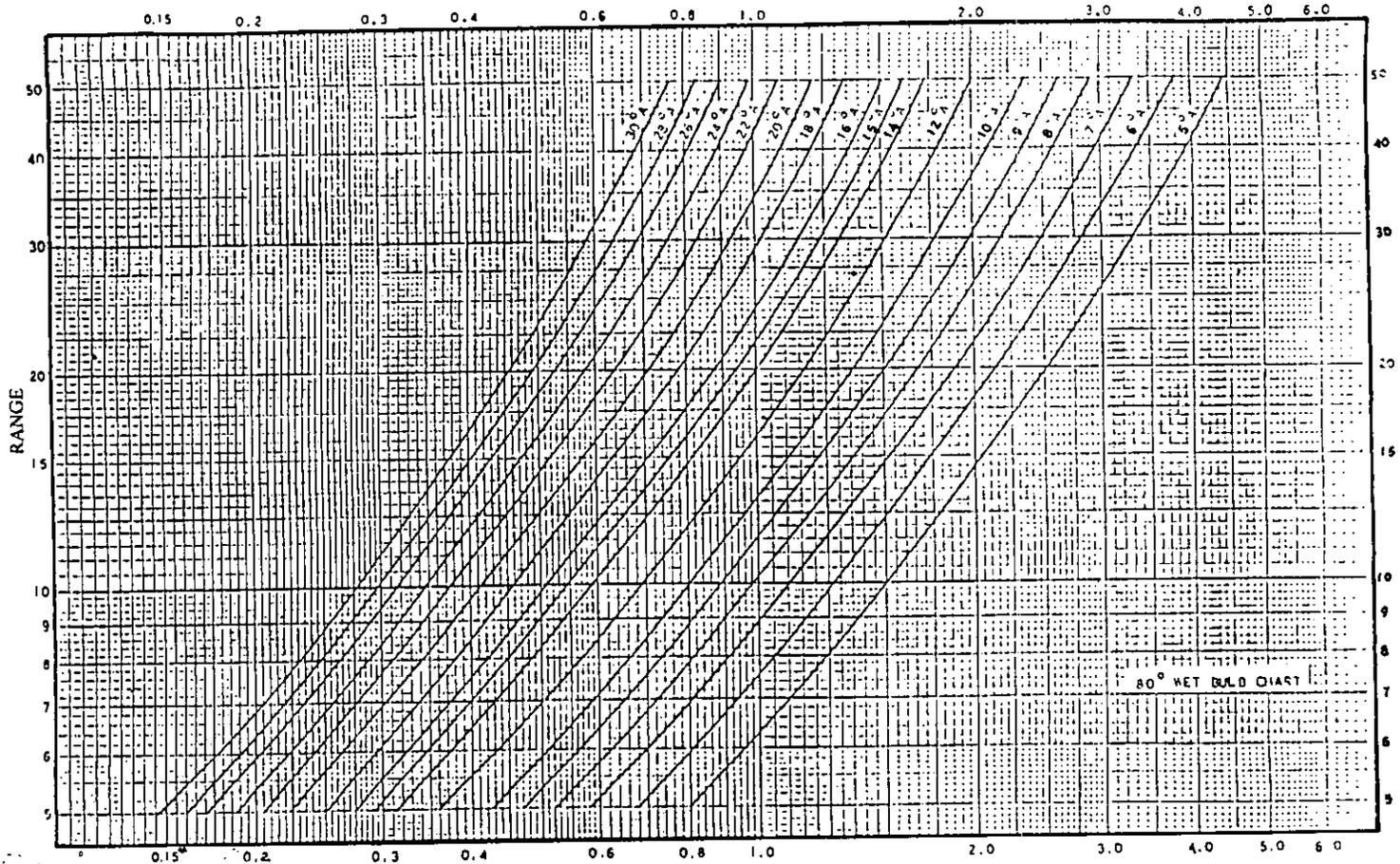
**Gráfica de R = 25 °F**

**Anexo A-IV(c)**  
(continuación)



Gráfica de  $T_{bh} = 70^\circ F$

**Anexo A-IV(c)**  
(continuación)



Gráfica de  $T_{bh} = 80^\circ F$

## Anexo A-V(a)

### **PROGRAMA DE COMPUTADORA PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO HUMEDA DE TIRO MECANICO INDUCIDO.**

10 CLS

20 CONT1 = 0: CONT2 = 0: CONT3 = 0

30 PRINT "EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO MECANICO INDUCIDO"

40 PRINT : PRINT

50 PRINT "La evaluación se hace a partir de datos de diseño y de prueba."

60 PRINT

70 PRINT "Es necesario contar con dos conjuntos de datos de prueba para realizar la evaluación."

80 PRINT : PRINT

90 PRINT "El método se desarrolla en cuatro etapas:"

100 PRINT

110 PRINT "1. DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA (Se utilizan sólo datos de prueba)"

120 PRINT "2. DETERMINACION DE LA CURVA DE REQUERIMIENTOS DE DISEÑO (Se utilizan sólo datos de diseño)"

130 PRINT "3. CALCULO DE LOS VALORES G Y L ESPERADOS A CONDICIONES DE DISEÑO ( $G'$ )<sub>dis</sub> Y ( $L'$ )<sub>dis</sub> (Se utilizan datos de diseño y de prueba)"

140 PRINT "4. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA A LA QUE OPERA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO"

150 PRINT

160 PRINT "Las curvas se grafican en papel logaritmico; las abscisas corresponden a los valores L/G, las ordenadas a los valores  $KaV/L$ ."

170 PRINT

180 PRINT "Las curvas deben trazarse sobre la misma gráfica."

190 PRINT : PRINT

200 PRINT "UTILIZAR LAS TABLAS DE PROPIEDADES TERMODINAMICAS QUE CORRESPONDEN A LA PRESION BAROMETRICA DEL SITIO DONDE SE HALLA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO."

210 PRINT : PRINT

220 INPUT "Anote a continuación el número de pruebas realizadas: "; NP

230 DIM T1(NP) : DIM T2(NP) : DIM T3(NP) : DIM T4(NP) : DIM T5(NP) : DIM T6(NP) : DIM T7(NP) : DIM T8(NP)

240 PRINT : PRINT

**Anexo A-V(a)**  
(continuación)

```
250 INPUT "Oprima <ENTER> para continuar"; I$
260 CLS
270 PRINT "EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE UNA TORRE DE ENFRI
      AMIENTO DE TIRO MECANICO INDUCIDO"
280 PRINT : PRINT
290 PRINT "1. DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA (Se ut
      ilizan sólo datos de prueba)"
300 PRINT
310 PRINT "Este cálculo se repetirá tantas veces como conjuntos de datos de prueba
      a existan."
320 PRINT : PRINT
330 CONT1 = CONT1 + 1
340 PRINT "Datos de entrada de la prueba No. "; CONT1; ":"
350 PRINT
360 INPUT "Flujo de agua de circulación [GPM] ="; GPMp
370 INPUT "Rango [°F] ="; Rp
380 INPUT "Temperatura de bulbo húmedo de entrada [°F] ="; Tbh1p
390 INPUT "Entalpía de saturación a Tbh entrada [Btu/lb aire seco] ="; h1p
400 INPUT "Flujo de aire [pie3/min] ="; Fasp
410 INPUT "Temperatura del agua de entrada [°F] ="; T1p
420 INPUT "Entalpía de saturación a Tae [Btu/lb aire seco] ="; hM1p
430 INPUT "Temperatura del agua de salida [°F] ="; T2p
440 INPUT "Entalpía de saturación a Tas [Btu/lb aire seco] ="; hM2p
450 Lp = GPMp * 8.34
460 Qp = Lp * Rp
470 PRINT : PRINT
480 INPUT "Oprima <ENTER> para continuar"; YO$
490 CLS
500 PRINT "EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE UNA TORRE DE ENFRI
      AMIENTO DE TIRO MECANICO INDUCIDO"
510 PRINT : PRINT
520 PRINT "1. DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA (Se ut
      ilizan sólo datos de prueba)"
530 PRINT
540 PRINT "Este cálculo se repetirá tantas veces como conjuntos de datos de prueba
      a existan."
```

**Anexo A-V(a)**  
(continuación)

```
860 C = Qp - Qcpa
870 D = (A * C) / B
880 Gp = GpA + (D)
890 LGp = Lp / Gp
900 h2p = h1p + Rp * LGp
910 T10 = T2p + .1 * Rp
920 T20 = T2p + .4 * Rp
930 T30 = T1p - .4 * Rp
940 T40 = T1p - .1 * Rp
950 PRINT
960 PRINT "A continuación se imprimen valores de temperatura [°F]; favor de intr
        oducir los valores correspondientes de entalpía de saturación [Btu/lb air
        e secco]."
```

```
970 PRINT
980 PRINT T10, T20, T30, T40
990 PRINT
1000 INPUT "Entalpía de saturación (valor 1) ="; hM10
1010 INPUT "Entalpía de saturación (valor 2) ="; hM20
1020 INPUT "Entalpía de saturación (valor 3) ="; hM30
1030 INPUT "Entalpía de saturación (valor 4) ="; hM40
1040 h10 = h1p + .1 * (h2p - h1p)
1050 h20 = h1p + .4 * (h2p - h1p)
1060 h30 = h2p - .4 * (h2p - h1p)
1070 h40 = h2p - .1 * (h2p - h1p)
1080 hMh10 = hM10 - h10
1090 hMh20 = hM20 - h20
1100 hMh30 = hM30 - h30
1110 hMh40 = hM40 - h40
1120 hM50 = hM10 + hM20 + hM30 + hM40
1130 h50 = h10 + h20 + h30 + h40
1140 hMh50 = hMh10 + hMh20 + hMh30 + hMh40
1150 A1 = 1 / hMh10
1160 A2 = 1 / hMh20
1170 A3 = 1 / hMh30
1180 A4 = 1 / hMh40
1190 SANp = A1 + A2 + A3 + A4
```

**Anexo A-V(a)**  
(continuación)

prueba)”

2460 PRINT

2470 PRINT “Este cálculo se repetirá tantas veces como conjuntos de datos de prueba existan.”

2480 PRINT : PRINT

2490 PRINT “Datos auxiliares (con la prueba No. ”; CONT3; “):”

2500 h2di = (LGdi) \* Rdi + h1di

2510 h2pr = T3(CONT3) \* Rpr + h1pr

2520 PRINT

2530 PRINT “A continuación se imprimen valores de entalpía de saturación [Btu/lb aire seco]; favor de introducir los valores de temperatura [°F] que corresponden, y con éstos, introducir los respectivos valores de Vol. Esp. de saturación [pie<sup>3</sup>/lb aire seco]:”

2540 PRINT

2550 PRINT h2di, h2pr

2560 PRINT

2570 INPUT “Temperatura (valor 1) =”; Tbh2di

2580 INPUT “Vol. Esp. de saturación a temperatura (valor 1) =”; v2di

2590 PRINT

2600 INPUT “Temperatura (valor 2) =”; Tbh2pr

2610 INPUT “Vol. Esp. de saturación a temperatura (valor 2) =”; v2pr

2620 Vemdi = (v1di + v2di) / 2

2630 Vempr = (v1pr + v2pr) / 2

2640 Gajust = T2(CONT3) \* ((BHPdi / BHPpr) ^ (1 / 3)) \* ((Vempr / Vemdi) ^ (2 / 3))

2650 LGajust = T1(CONT3) / Gajust

2660 T7(CONT3) = Gajust

2670 T8(CONT3) = LGajust

2680 PRINT : PRINT

2690 INPUT “¿Desea realizar otro cálculo? (S/N): ”; QUOS

2700 IF QUOS <> “S” AND QUOS <> “N” THEN 2690

2710 IF QUOS = “S” THEN 2190

2720 PRINT : PRINT

2730 INPUT “Oprima <ENTER> para continuar”; QW\$

2740 CLS

2750 B1 = T8(2) - T8(1)

2760 B2 = LGdi - T8(1)

RESULTADOS

Parámetro	Unidad	V a l o r	
		Prueba 1	Prueba 2
G°	lb as/min		
L/G°			

(G°)<sub>dis</sub> =

(L°)<sub>dis</sub> =

4. Determinación de la eficiencia a la que opera la torre de enfriamiento.

DATO DE ENTRADA

Flujo de agua de circulación - diseño [GPM] = \_\_\_\_\_

E F I C I E N C I A =

## BIBLIOGRAFIA

- ❶ A. Nasar, Syed; Electric Energy Conversion and Transmission; Ed. Macmillan; U.S.A., 1985.
- ❷ Chico Venancio, Jesús; Tesis: Apuntes para la asignatura de Ingeniería de - Procesos Industriales (IME) de la E.N.E.P. Aragón; México, U.N.A.M., - 1994.
- ❸ Cooling Tower Institute; Procedimiento CTI-ATC-105; U.S.A., 1990.
- ❹ El-Wakil, M. M.; Powerplant Technology; Ed. Mc. Graw-Hill; Singapore, - 1984.
- ❺ Enríquez Harper, Gilberto; Elementos de Centrales Eléctricas I (hidroeléctricas, termoeléctricas y nucleares); Ed. LIMUSA; México. 1995.
- ❻ F. Stoecker, W.; Refrigeración y Acondicionamiento de Aire; Ed. Mc Graw-Hill; México, 1978.
- ❼ Foust, Wenzel, Clump, Maus & Andersen; Principios de Operaciones Unitarias; Ed. CECSA; México, 1993.
- ❽ H. Perry, Robert; Manual del Ingeniero Químico (Tomo III); Ed. Mc. Graw-Hill; México, 1994.
- ❾ J. Van Wylen, Gordon; Fundamentos de Termodinámica; Ed. LIMUSA; México, 1990.
- ❿ Mataix, Claudio; Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas; Ed. HARLA; México, 1982.
- ⓫ Q. Kern, Donald; Procesos de Transferencia de Calor; Ed. CECSA; México, - 1990.
- ⓬ Santo Potess, E.; Centrales Eléctricas; Ed. Gustavo Gili, S. A.; España, 1980.