

106

205



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ANALISIS Y CALCULO DE TORRES DE
ENFRIAMIENTO DE AGUA QUE
OPERAN CON FLUJO CRUZADO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
PAUL SOSA OTERO

MEXICO, D. F.

TEJIS CON
FALLA DE ORIGEN

1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

Prólogo	X
---------------	---

Capítulo 1. Psicrometría

1.1. Introducción	1
1.2. Conceptos	2
1.2.1. Temperatura de bulbo seco	2
1.2.1. Humedad absoluta	2
1.2.2. Mezclas de aire y vapor de agua saturadas	5
1.2.3. Saturación porcentual	6
1.2.4. Saturación relativa	6

1.2.5. Volumen húmedo	8
1.2.6. Entalpía	8
1.2.7. Calor húmedo	9
1.2.8. Temperatura de saturación adiabática	10
1.2.9. Temperatura del punto de rocío	11
1.2.10. Temperatura de bulbo húmedo	12
1.2.11. La relación psicrométrica	21
1.2.12. La Carta Psicrométrica	22
1.2.12.1. Curvas que representan distintos porcentajes de humedades absolutas...	23
1.2.12.2. Curvas que representan distintos procesos de saturación adiabática	24
1.2.12.3. Curva de la entalpía de equilibrio y curva de la entalpía del aire seco	26
1.2.12.4. Curva del volumen de equilibrio y curva del volumen del aire seco	28
1.3. El Psicrómetro	29
1.4. Conclusiones	29

Capítulo II. Análisis de las torres de enfriamiento de agua

2.1. Transferencia simultánea de calor y masa	31
2.2. Generalidades	36
2.3. Clasificación	39

2.3.1. Torres atmosféricas	39
2.3.2. Torres de tiro natural o hiperbólicas	41
2.3.3. Torres de tiro mecánico	44
2.3.4. Torres de rocío	49
2.4. Torres de flujo en contracorriente vs. torres de flujo cruzado	50
2.5. Funcionamiento	54
2.5.1. El agua	54
2.5.2. El ventilador	58
2.5.3. El empaque y los eliminadores de rocío	61

Capítulo III. Diseño y operación de las torres de flujo cruzado

3.1. Desarrollo de las ecuaciones de diseño	63
3.2. El coeficiente requerido y las variables de diseño	109
3.3. Los factores de seguridad	119
3.4. Cálculo de las dimensiones de la región empacada	121
3.5. El coeficiente disponible y las variables de operación ..	139
3.6. Evaluación del rendimiento	145
3.7. Estimación del desempeño	146
3.8. Método de cálculo del coeficiente de desempeño	149

Capítulo IV. El programa TFC

4.1. Introducción	161
4.2. El paquete computacional	162
4.2.1. Conocimientos de computación que requiere tener el usuario	162
4.2.2. Los archivos del paquete computacional	163
4.3. El funcionamiento del programa TFC	163
4.3.1. El monitor	163
4.3.2. El Sistema de Cartas	164
4.3.2.1. El mandato seleccionado	166
4.3.2.2. Para seleccionar un mandato de la Carta Principal	166
4.3.2.3. Para ejecutar un mandato	166
4.3.2.4. Para seleccionar y activar simultáneamente un mandato	167
4.3.2.5. Para cancelar un mandato	169
4.3.2.6. El manejo de los submandatos	169
4.3.2.7. Para pasar de una carta de submandatos a otra	169
4.3.2.8. Submandatos para especificar	170
4.3.2.9. Submandatos para ejecutar	172
4.3.2.10. Instrucciones con mandatos terciarios ..	174
4.3.2.11. Las teclas principales	175
4.3.3. El Sistema Escritor	176

4.3.4. El Sistema de Ayuda	178
4.4. Las bases de datos	181
4.4.1. Usos y aplicaciones de la base de datos A clase I	182
4.4.1.1. Aplicación al diseño	182
4.4.1.2. Aplicación al procesamiento de información experimental	185
4.4.2. La base de datos B clase I	187
4.4.3. La base de datos A clase II	188
4.4.4. La base de datos B tipo II	190
4.4.5. Los submandatos de la carta de DATOS	191
4.4.5.1. Base actual	191
4.4.5.2. Coeficiente 5	194
4.4.5.3. Abrir base la Base A-I	194
4.4.5.4. Abrir base la Base A-II	194
4.4.5.5. Abrir la Base B acción	195
4.4.5.6. Revisión de datos	195
4.4.5.7. Tabla de resultados	197
4.4.5.8. Regresión lineal	198
4.4.5.8.1. Tipo de transformación	198
4.4.5.8.2. Información	198
4.4.5.8.3. Entrada de coeficientes	199
4.4.5.8.4. Realizar la regresión	200
4.4.5.9. Sistema de Unidades	200

4.5.5.1.1. Continuar	213
4.5.5.1.2. Desplegar	213
4.5.5.1.3. Grabar	215
4.5.5.1.4. Suspender	215
4.6. La interacción con el disco. La carta de ARCHIVOS	216
4.6.1. Introducción	216
4.6.2. Submandatos	217
4.6.2.1. Leer	217
4.6.2.2. Borrar	218
4.6.2.3. Grabar	218
4.6.2.4. Escribir	219
4.6.2.5. Cambiar el directorio	219
4.6.2.6. Salida	219
4.7. Los mensajes de error	220
4.8. El programa de accesorios	221
4.9. El manejo de archivos en TFCA	222
4.9.1. Submandatos	222
4.9.1.1. Leer	222
4.9.1.2. Matriz	222
4.9.1.3. Escribir	222
4.9.1.4. Cambiar el directorio	223
4.9.1.5. Salida	223
4.10. La Carta de gráficas	223
4.10.1. Submandatos de la carta de gráficas	223
4.10.1.1. Escala	224

4.10.1.1.1. Escala TFC	224
4.10.1.1.2. Escala del usuario	224
4.10.1.1.3. Escala total	224
4.10.1.2. Intervalos	224
4.10.1.2.1. Prácticos	225
4.10.1.2.2. Calculados	226
4.10.1.3. Curvas	226
4.10.1.4. Tipo de gráfica	226
4.10.1.5. Cuadrículado	226
4.10.1.6. Marcar los límites	227
4.10.1.7. Título	227
4.10.1.8. Dibujar	228
4.10.3. Impresión de las gráficas	229

Apéndice A. Suplemento del Capítulo I

A.1. La ley de Raoult	230
A.1.1. Breve revisión del equilibrio líquido-vapor	230
A.1.2. Idealizaciones	233
A.2. Deducción de la ecuación (1-17)	237
A.3. Deducción de la ecuación (1-18)	242
A.3.1. Entalpía del gas ideal	245
A.3.2. Entalpía del aire seco	246
A.3.3. Entalpía del vapor de agua	247

A.3.4. Entalpía de la mezcla	250
A.4. Deducción de la ecuación (1-19)	251
A.5. Deducción de la ecuación (1-21)	252
A.6. Deducción de la ecuación (1-29)	256
A.7. Deducción de la ecuación (1-23)	260
A.8. Deducción de la ecuación (1-27)	263
Apéndice B. La Carta Psicrométrica	
B.1. En el Sistema Internacional	267
B.2. En el Sistema Inglés	273
Lista de símbolos	279
Bibliografía	286

PROLOGO

El agua tiene una importancia vital para el hombre, por lo cual es necesario cuidarla y aprovecharla eficientemente.

Entre los numerosos usos que tiene dicho líquido, está el de servir como medio de enfriamiento en las plantas industriales; así, el agua se obtiene de una fuente natural (como un río o un lago) o artificial (como una presa) y se hace circular a través de una serie de tubos y equipos que requieren se les retire

cierta cantidad de calor. Cuando el líquido abandone este sistema, su temperatura se habrá incrementado y llevará consigo una carga térmica adicional.

Esta agua no debe desecharse, ni devolverse a su lugar de origen en las condiciones en que sale del proceso, puesto que ocasionaría una contaminación térmica. Puede en cambio, seguir utilizándose de la misma manera si se le disminuye la temperatura, quitándole la energía calórica que ganó anteriormente. Esto se consigue con una torre de enfriamiento; en ella, el agua se pone en contacto directo con aire atmosférico, y mediante un fenómeno de transferencia simultánea de materia y energía, el líquido cede una gran parte de su contenido térmico al gas.

Existen varias formas de clasificar una torre de enfriamiento, una de ellas se basa en la dirección que dentro del equipo sigue el flujo de aire. Si éste ingresa por la parte inferior de la torre y se mueve verticalmente, en sentido opuesto a la caída del agua, se afirma que la operación se realiza con *flujo en contracorriente*. Si por el contrario, el aire entra a la torre por uno o más lados y circula perpendicularmente respecto del curso que sigue el líquido, se dice que la operación se lleva a cabo con *flujo cruzado o transversal*.

El objetivo principal de este escrito es analizar las torres que trabajan de la última manera descrita, presentando asimismo, las bases más importantes sobre las que se apoya el diseño y operación de estos equipos.

El contenido de cada capítulo —que se presenta a continuación— está orientado a cumplir los objetivos mencionados.

I. Psicrometría. En las páginas de este capítulo se tratan los conceptos y las ecuaciones de la Psicrometría y su aplicación al sistema termodinámico aire-agua.

II. Análisis de las torres de enfriamiento de agua. En esta sección se analiza el fenómeno de la transferencia simultánea de masa y calor que ocurre dentro de las torres de enfriamiento. También se estudia el funcionamiento de estos equipos y se presentan las distintas formas de clasificarlos.

Además, se incluye un análisis comparativo entre las torres de flujo cruzado y las de flujo en contracorriente.

III. Diseño y operación de las torres de flujo cruzado.

En este capítulo, se trata el desarrollo de las ecuaciones empleadas para el diseño de los equipos estudiados. Asimismo, se presentan algunos de los métodos usados para calcular las dimensiones que debe tener una torre de este tipo para poder cumplir con un servicio específico.

También se expone la manera como debe evaluarse el rendimiento de estas torres y se incluye un análisis de las variables de diseño y de las variables de operación.

Además, se presenta una técnica para estimar el desempeño que tendrá una torre de flujo cruzado cuando se opere en unas condiciones dadas.

IV. El programa TFC. Como una parte adicional a este escrito, se desarrollaron dos programas para computadoras IBM-PC y compatibles, llamados TFC.EXE y TFC.A.EXE, cuyo fin es facilitar los cálculos correspondientes a las torres de flujo cruzado.

Este capítulo es el manual de ambos programas.

Apéndice A. Esta sección constituye un suplemento del capítulo I. En ella se estudian las bases de la

Termodinámica sobre las cuales se apoya el desarrollo de las ecuaciones psicrométricas y las simplificaciones que en éstas pueden hacerse cuando se usan para el cálculo de las propiedades del sistema aire-agua.

Apéndice B. Aquí se presentan dos versiones de la Carta Psicrométrica, una de ellas aparece con las unidades del Sistema Internacional y la otra con las del Sistema Inglés. Ambas están hechas para una presión de una atmósfera.

PSICROMETRIA

11. INTRODUCCIÓN.

La Psicrometría, en sentido estricto, es la medición de la humedad atmosférica por medio del psicrómetro (del griego ψυχρός: frío y μέτρον: medida), aunque actualmente el término se emplea para referirse, en general, a la determinación de las propiedades de las mezclas de aire y vapor de agua.

A continuación se presenta una revisión de los conceptos más importantes. El subíndice A se usará para señalar las propiedades del agua y el a para las del aire.

12. CONCEPTOS.

1.2.1. Temperatura de bulbo seco.

Llámasele así a la temperatura de una mezcla de aire y vapor de agua, determinada en la forma ordinaria por la inmersión de un termómetro en la mencionada mezcla. Se representa con el símbolo t_b , o simplemente con la letra t en las ecuaciones que aparecen a lo largo de este capítulo.

1.2.2. Humedad absoluta.

La humedad se define como la razón

$$\frac{\text{cantidad de agua}}{\text{cantidad de aire}}$$

donde las cantidades pueden expresarse en unidades de masa o en moles, de este modo se tienen las ecuaciones siguientes:

$$\text{Humedad absoluta molar: } \underline{y} = \frac{\text{moles de agua}}{\text{moles de aire}} \quad (1-1)$$

Humedad absoluta:
$$y = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de aire}} \quad (1-2)$$

La relación entre las ecuaciones (1-1) y (1-2) es

$$y = \underline{y} \frac{M_A}{M_B} \quad (1-3)$$

donde la letra M con el subíndice A indica la masa molecular del agua; y con el subíndice B, la del aire.

Represente el símbolo n_i el número de moles del componente i en la mezcla de aire y vapor de agua, entonces la humedad absoluta molar puede calcularse con la ecuación

$$\underline{y} = \frac{n_A}{n_B} \quad (1-4)$$

El número total de las moles presentes en el sistema es

$$n_T = n_A + n_B \quad (1-5)$$

por lo cual

$$n_B = n_T - n_A \quad (1-6)$$

Sustituyendo la n_B por su equivalencia en la expresión (1-4) resulta que

$$\underline{y} = \frac{n_A}{n_T - n_A} \quad (1-7)$$

Ahora bien, la fracción mol del vapor de agua en la mezcla se define mediante la razón

$$y_A = \frac{n_A}{n_T} \quad (1-8)$$

Si en la ecuación (1-7) se reemplaza la y_A por su igualdad y se simplifica el resultado, se encuentra que la humedad absoluta molar puede escribirse

$$\underline{y} = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad (1-9)$$

De acuerdo con lo expuesto en el apéndice A-1, en el equilibrio líquido-vapor del sistema aire-agua se cumple que

$$y_A = \frac{P_A^s}{P} \quad (A-20)$$

entonces

$$\underline{y}^s = \frac{P_A^s}{P - P_A^s} \quad (1-10)$$

y

$$y^s = \frac{P_A^s}{P - P_A^s} \frac{M_A}{M_B} \quad (1-11)$$

El superíndice s se usa para indicar que se trata de los valores de saturación (el sistema está en equilibrio), y la P simboliza la presión total del sistema.

1.2.3. Mezclas de aire y vapor de agua saturadas.

Cuando el sistema aire-agua ha alcanzado el equilibrio líquido-vapor, se afirma que la mezcla está saturada.

1.2.4. Saturación Porcentual.

Denominada también *humedad absoluta porcentual* o *porcentaje de saturación*, se define como la relación:

$$S = 100 \frac{y}{y^*} \quad (1-12)$$

donde la y simboliza la humedad absoluta presente en las condiciones de temperatura y presión de la mezcla y la y^* representa la humedad que tendrá el sistema cuando alcance el equilibrio a la misma temperatura y la misma presión.

1.2.5. Saturación relativa.

Se conoce también como *humedad relativa*, y se calcula con la ecuación

$$Sr = \frac{n_A}{n_A^*} \quad (1-13)$$

en la cual, la n_A es el número de moles de agua que contiene la mezcla, a la temperatura y la presión dadas,

y la n_A^* es el número de moles que estarían presentes si la mezcla hubiera alcanzado el equilibrio en esas condiciones de temperatura y presión.

La saturación relativa puede escribirse en términos de fracciones mol

$$S_r = \frac{y_A}{y_A^*} \quad (1-14)$$

lo cual —debido a la ecuación (A-20)— es equivalente a

$$S_r = \frac{P_A}{P_A^*} \quad (1-15)$$

donde la P_A representa la presión parcial del agua y la P_A^* su presión en el estado de equilibrio.

Es común que la saturación relativa se exprese como porcentaje, en este caso

$$S_{rp} = \frac{P_A}{P_A^*} * 100 \quad (1-16)$$

1.2.6. Volumen húmedo.

Es el espacio que ocupa una mezcla de aire y vapor de agua en unas condiciones dadas de temperatura y presión; se expresa en unidades de volumen por unidad de masa de aire seco.

De acuerdo con lo expuesto en el apéndice A-2, el volumen húmedo puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$v = 8.3137 \left[\frac{1}{M_B} + \frac{y}{M_A} \right] \frac{t}{P} \quad (1-17)$$

en la cual la t representa la temperatura (K) y la P la presión (Pa). El volumen se da en m^3/kg de aire seco.

1.2.7. Entalpía.

La entalpía de la mezcla de aire y vapor de agua se expresa en unidades de energía por unidad de masa de aire seco, y, como se demuestra en el apéndice A-3, se calcula sumando las entalpías de los componentes. Para el cómputo de cada una de éstas se seleccionan, por lo general, los siguientes estados de

referencia:

para el agua: líquido saturado a la temperatura t_{ao} (273.15 K) y la presión de vapor.

para el aire: gas seco a la temperatura t_{ao} (255.37 K) y a una presión de 101325 Pa.

La entalpía de la mezcla se calcula entonces con la ecuación

$$x = C_a(t - t_{ao}) + y[C_v(t - t_{ao}) + \lambda_o] \quad (1-18)$$

donde la C_a simboliza el calor específico promedio del aire (1004.832 J/kgK) y la C_v el del vapor de agua (1884.06 J/kgK). La letra λ con el subíndice o representa el calor latente de evaporación (2501613 J/kg), evaluado a la temperatura t_{ao} .

1.2.8. Calor húmedo.

Es el calor requerido para aumentar en un grado la temperatura de la masa unitaria de aire y su vapor de agua acompañante. Lo define la ecuación

$$c = C_a + yC_v \quad (1-19)$$

cuya deducción se trata en el apéndice A-3.

La entalpía de la mezcla puede expresarse en términos del calor húmedo, si se introduce la ecuación (1-19) en la (1-18) y se considera que $t_{a0} = t_{s0} = t_0 = 255.37$ K.

$$x = \epsilon(t - t_0) + y\lambda_0 \quad (1-20)$$

1.2.9. Temperatura de saturación adiabática.

Es la temperatura que alcanzaría una mezcla de aire y vapor de agua si se sometiera a un proceso de saturación adiabática. (Para las deducciones de las ecuaciones presentadas a continuación, referirse al apéndice A-4).

La expresión que relaciona la temperatura de saturación adiabática (t_{sa}) con la humedad presente en el aire es:

$$t - t_{sa} = \left[y_{sa} - y \right] \frac{\lambda_{sa}}{\epsilon} \quad (1-21)$$

Si se conocen los valores de las variables t y t_{sa} , la solución de esta ecuación con respecto a la

humedad es inmediata:

$$y = \frac{(y_{sa})(\lambda_{sa}) + C_a(t_{sa} - t)}{C_a(t - t_{sa}) + \lambda_{sa}} \quad (1-22)$$

1.2.10. Temperatura del punto de rocío.

Es la temperatura a la cual una mezcla de aire y vapor de agua se satura cuando se somete a un proceso de enfriamiento a presión constante.

Si la temperatura se disminuye más allá del punto de rocío, la mezcla cambiará su composición, pues el vapor de agua comenzará a condensarse; sin embargo, el estado de saturación prevalecerá.

Una mezcla con las características que representa el punto A (figura 1-1) alcanzará, mediante un enfriamiento a presión constante, aquellas representadas por el punto B, cuya temperatura es la del punto de rocío (t_w). Si el enfriamiento continúa hasta la temperatura t_2 , por ejemplo, la mezcla sufrirá una reducción en su contenido de vapor de agua (características indicadas por el punto C), pero aún estará saturada.

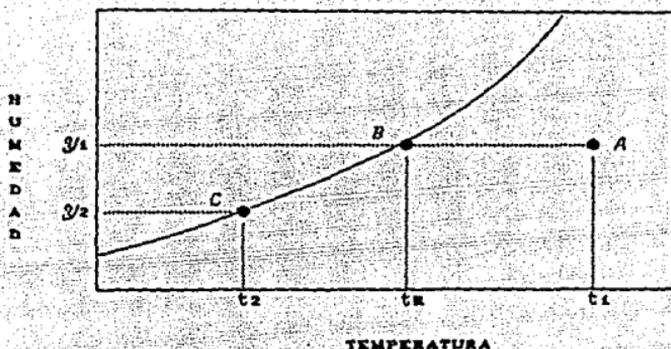


Fig. 1-1. Temperatura del punto de rocío.

1.2.11. Temperatura de bulbo húmedo.

Es la temperatura que obtiene —al llegar al estado estacionario— una pequeña cantidad de agua que se evapora en una gran cantidad de mezcla no saturada.

Conociendo la temperatura de bulbo húmedo (t_{bh}) puede calcularse la humedad.

Para medir esta temperatura se emplea un termómetro convencional, cuyo bulbo se cubre con algún material fibroso mojado con agua. El instrumento se coloca entonces dentro de una corriente de mezcla de

aire y vapor de agua, que debe circular rápidamente con el fin de minimizar la transferencia de calor por radiación.

De esta forma, si la mezcla no está saturada, el líquido del forro comenzará a evaporarse y a difundirse, transportando consigo el calor latente asociado. Este retiro de energía térmica provoca un descenso en la temperatura de la camisa del bulbo. En cuanto esta temperatura sea menor que la de la mezcla, comenzará a fluir calor hacia el forro, hasta que finalmente, en el estado estacionario, el flujo de calor que recibe la envoltura se ocupa en su totalidad para la evaporación del agua.

Cuando esto ocurre, la temperatura registrada por el termómetro permanece constante.

Para obtener la ecuación que relaciona la temperatura de bulbo húmedo con la humedad se empleará la teoría de la película. Primero se analizará brevemente el fenómeno de la transferencia simultánea de calor y masa. Las deducciones de las ecuaciones (1-24) y (1-27) se encuentran en los apéndices A-7 y A-8, respectivamente.

De acuerdo con la figura 1-2, el flux total de calor a través de la película consta de dos partes:

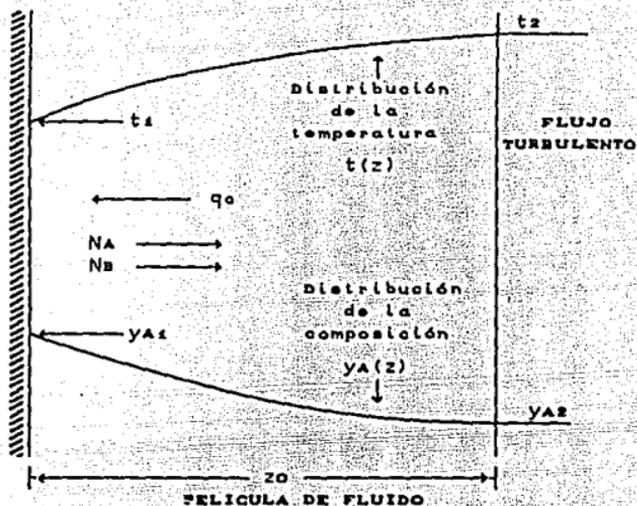


Fig. 1-2. *Transferencia simultánea de calor y masa.*

- a) flux de calor por conducción hacia la interfase:
 $k(dt/dz)$
- b) flux de calor debido a la difusión desde la interfase: $-[N_A C_A (t_i - t_o) + N_B C_B (t_i - t_o)]$. Aquí, la t_o es una temperatura de referencia —que se elegirá más adelante— usada para el cómputo de la entalpía.

En el estado estacionario, la distribución de la temperatura en la película se expresa mediante la ecuación diferencial

$$k \frac{d^2 t}{dz^2} - (N_A C_A + N_B C_B) \frac{dt}{dz} = 0 \quad (1-23)$$

cuya solución, de acuerdo con las condiciones de que $t = t_1$ en la interfase ($z = 0$) y $t = t_2$ en el límite de la película ($z = z_0$), es:

$$t(z) = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{e^{\frac{Co z}{z_0}} - 1}{e^{Co} - 1} \quad (1-24)$$

En esta ecuación, el símbolo Co representa el factor de corrección de Ackermann para la transferencia de masa [21], y es definido por la siguiente ecuación:

$$Co = \frac{N_A C_A + N_B C_B}{h} \quad (1-25)$$

donde

$$h = \frac{k}{z_0} \quad (1-26)$$

la k simboliza la conductividad térmica de la película y la h el coeficiente de la transferencia de calor por convección.

De la ecuación (1-24), se puede obtener la expresión para el cálculo del flux de calor por conducción a través de la interfase:

$$q_c = k't'(0) = h(t_2 - t_1) \frac{C_o}{e^{C_o} - 1} \quad (1-27)$$

Como se mencionó anteriormente, el flux total de energía térmica es igual a: $q_c + (N_A C_A + N_B C_B)(t_2 - t_0)$, pero, si se computan las entalpías empleando un estado de referencia definido por la temperatura $t_0 = t_1$, la expresión para el cálculo del flux total de calor a través de la película se reduce a:

$$q_T = h(t_2 - t_1) \frac{C_o}{e^{C_o} - 1} \quad (1-28)$$

Por otra parte, el flux de masa de un componente (A) a través de otro (B) no difundente se expresa

$$N_A = \frac{D_{AB} C}{z} \ln \frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \quad (1-29)$$

donde cada simbolo indica:

D_{AB} = coeficiente de difusividad del componente A en el

B.

C = número total de moles por unidad de volumen (concentración).

z = distancia en la dirección de la difusión.

y_{A1} = fracción mol del componente A al inicio de la trayectoria de la difusión (interfase).

y_{A2} = fracción mol del componente A al final de la trayectoria de la difusión (límite de la película).

Cuando se puede aplicar la ley de los gases ideales, se tiene la siguiente relación:

$$\frac{C_A}{C} = \frac{P_A}{P} = y_A \quad (1-30)$$

en la cual, la P_A y la C_A representan, respectivamente, la presión parcial y la concentración del componente A.

En estas condiciones, se tiene además que

$$C = \frac{n}{V} = \frac{P}{Rt} \quad (1-31)$$

Sustituyendo la C por su igualdad en la

ecuación (1-29) se llega al siguiente resultado:

$$N_A = \frac{D_{AB} P}{Rt z} \ln \frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \quad (1-32)$$

Sea $k = \frac{D_{AB}}{Rt z} \quad (1-33)$

entonces, la ecuación (1-32) puede escribirse

$$N_A = k' P \ln \frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \quad (1-34)$$

Aplicando esta expresión al estudio de la temperatura de bulbo húmedo puede calcularse la rapidez de la transferencia de calor por evaporación:

$$q_e = \lambda_{bh} k' P \ln \frac{1 - y_A}{1 - y_{Abh}} \quad (1-35)$$

En esta ecuación, la y_A representa la fracción mol de vapor de agua presente en el seno de la corriente gaseosa en la que se halla inmerso el termómetro, y la y_{Abh} la fracción mol del mismo

componente en la superficie del bulbo húmedo (interfase).

En el estado estacionario, el flujo de calor hacia el bulbo es igual al requerimiento de energía térmica para la evaporación, por lo cual, de las ecuaciones (1-28) y (1-35), se tiene que

$$h(t - t_{bh}) \frac{C_o}{e^{C_o} - 1} = \lambda_{bh} k^* P \ln \frac{1 - y_A}{1 - y_{Abh}} \quad (1-36)$$

Ahora bien, la analogía entre la transferencia de masa y la de calor se expresa mediante la ecuación

$$j_m = \frac{k^* P}{G} Sc^{2/3} = \beta j_h = \beta \frac{h}{C_{pG}} Pr^{2/3} \quad (1-37)$$

en la cual, el símbolo Sc representa el número de Schmidt, el símbolo Pr el de Prandtl, y la β un factor de corrección empleado por Sherwood, Pigford y Wilke [21]. Introduciendo la mencionada analogía en la expresión (1-36) se obtiene el siguiente resultado:

$$h(t - t_{bh}) \frac{C_o}{e^{C_o} - 1} = \lambda_{bh} \frac{\beta}{C_{pG}} Le^{2/3} P \ln \frac{1 - y_A}{1 - y_{Abh}} \quad (1-38)$$

El símbolo Le representa el número de Lewis (Pr/Sc), y el símbolo C_p' el calor específico molar de la mezcla en la interfase. Debido a que en el uso del termómetro de bulbo húmedo, los gradientes de la temperatura y la presión parcial son bajos, la ecuación (1-38) puede simplificarse.

$$\text{Si } C_o \rightarrow 0, \quad \frac{C_o}{C_o - 1} \rightarrow 1$$

y si

$$(y_{Abh} - y_A) \rightarrow 0, \quad \beta \rightarrow 1 \quad \text{y}$$

$$\ln \frac{1 - y_A}{1 - y_{Abh}} \approx (y_{Abh} - y_A)$$

por lo cual se tiene que

$$t - t_{bh} = \frac{\lambda_{bh}}{C_p'} Le^{2/3} (y_{Abh} - y_A) \quad (1-39)$$

Según Sherwood, Pigford y Wilke [21], los errores introducidos por estas aproximaciones son menores al 2 ó 3% para el sistema aire-vapor de agua en condiciones de operación típicas. También aclaran que al introducir los conceptos de la humedad y el calor húmedo

el error se minimiza. Cuando el contenido de vapor de agua en el aire es bajo, se cumple que

$$y_A \cong \underline{y}, \quad \text{y además,} \\ c_p \cong \underline{c}$$

entonces, la ecuación (1-39) se escribe

$$t - t_{bh} = \frac{\lambda_{bh}}{c_p} Le^{2/3} (\underline{y}_{bh} - \underline{y}) \quad (1-40)$$

y análogamente

$$t - t_{bh} = \frac{\lambda_{bh}}{c_p} Le^{2/3} (\underline{y}_{bh} - \underline{y}) \quad (1-41)$$

1.2.12. La relación psicrométrica.

El cociente $h/c_p y$ se conoce como la *relación psicrométrica*, y según la analogía entre la transferencia de masa y de calor, debe ser igual a $Le^{2/3}$. Para el caso del sistema aire-agua, numerosos investigadores han concluido que la relación psicrométrica es aproximadamente igual a la unidad, por lo que la ecuación (1-41) puede escribirse

$$t - t_{bh} = \frac{\lambda_{bh}}{c} (t_{bh} - t) \quad (1-42)$$

debido a este hecho, la temperatura de bulbo húmedo es esencialmente igual a la temperatura de saturación adiabática (comparar la ecuación (1-42) con la (1-21)). Debe recordarse que esto se aplica al sistema aire-agua. En otros sistemas gas-líquido generalmente no sucede lo mismo.

1.2.13. La carta psicrométrica.

La carta psicrométrica es una representación gráfica de todos los conceptos aquí expuestos; en ella, la temperatura es la variable independiente, y la humedad, la entalpía y el volumen húmedo aparecen como variables dependientes, teniendo cada una de ellas una escala diferente. Esta carta facilita la obtención de datos de las mezclas de aire y vapor de agua. Se construye para una presión barométrica dada, y por lo general, sólo se representa una medida del contenido de vapor de agua en el aire: la humedad absoluta o la saturación relativa. Aquí se empleará la primera.

tbase	Y_s	$Y_s(0.0)$	$Y_s(0.5)$	$Y_s(0.7)$...
275	0.004189	0.003770	0.003351	0.002932	
280	0.006002	0.005401	0.004801	0.004201	
285	0.008479	0.007631	0.006783	0.005935	
290	0.011828	0.010645	0.009462	0.008279	
295	0.016313	0.014681	0.013050	0.011419	
⋮					

Fig. 1-3. *Tabla de valores de la temperatura base vs. magnitudes de la humedad absoluta.*

1.2.13.1. Curvas que representan distintos porcentajes de humedades absolutas.

Con la ecuación (1-11) se calcula la humedad en el estado de saturación para un intervalo de temperaturas con un límite superior no muy cercano al punto de ebullición del agua, ya que a esta temperatura la humedad tiende a infinito y la representación gráfica se dificulta.

Estos cálculos producen una tabla de los valores de la temperatura base (t_{base}) contra las magnitudes de la humedad (y^a) (figura 1-3). Pueden obtenerse los valores de la variable y para mezclas no saturadas a partir de esta tabla, de acuerdo con los porcentajes de humedad que se desea que aparezcan en la carta.

1.2.13.2. Curvas que representan distintos procesos de saturación adiabática.

Se calculan con la ecuación (1-21)

$$t - t_{sa} = \left[y_{sa} - y \right] \frac{\lambda_{sa}}{g} \quad (1-21)$$

Un método para representar gráficamente esta expresión consiste en seleccionar un valor para la temperatura de saturación adiabática; con ella se determinan los valores de las variables y_{sa} y λ_{sa} (este último dato puede obtenerse de las tablas de vapor); a continuación se dan valores a la variable y y se calculan las temperaturas correspondientes. Si se repite el procedimiento para otras magnitudes de la temperatura de saturación adiabática pueden conseguirse nuevas curvas.

t_{base}	γ_a	$\lambda_{(b)}$	$\gamma_a(0.9)$	t	
275	0.004189	2497193.6	0.003770	276.0339	← curva 1
280	0.006002	2485331	0.005401	281.4696	← curva 2
285	0.008479	2473701	0.007631	287.0579	⋮
290	0.011828	2461605.8	0.010645	292.8409	⋮
295	0.016313	2449975.8	0.014681	298.8709	⋮
⋮					
↑	↑	↑	↑	↑	
t_{ea}	γ_{ea}	λ_{ea}	γ_2	t_2	

Fig. 1-4. Tabla de datos de los distintos procesos de saturación adiabática

Empleando la información de la tabla que aparece en la figura (1-3), los cálculos se facilitan. Para cada curva se asignará a la temperatura de saturación adiabática la magnitud de la temperatura base y los valores que se darán a la variable γ serán los de los porcentajes de humedad. La tabla se ampliará entonces de la manera que se muestra en la figura 1-4.

El primer punto de una curva de este tipo será (t_{ea}, γ_{ea}) ; el segundo (t_2, γ_2) , calculado con $0.9\gamma^s$; el tercero se computará con $0.8\gamma^s$ y así sucesivamente.

La utilidad de estas curvas radica en que

permiten la lectura de la humedad en la carta psicrométrica a partir de los valores de la temperatura de bulbo húmedo — puesto que $t_{bh} = t_{ea}$ — y la temperatura de bulbo seco (t_{bs}) para una mezcla dada de aire y vapor de agua. Primero debe localizarse el punto (t_{bh}, ϕ_{bh}) [(t_{ea}, ϕ_{ea})], luego se sigue la curva de saturación adiabática hasta que intersecte la recta $t = t_{bs}$; la ordenada correspondiente a este punto es la humedad del aire.

1.2.13.3. Curva de la entalpía de equilibrio y curva de la entalpía del aire seco.

La curva de la entalpía de equilibrio se traza con base en la ecuación (1-18), asignando valores a la temperatura y calculando los correspondientes de la variable α .

La curva de la entalpía del aire seco se dibuja a partir de la expresión

$$H_{oa} = C_a(t - t_{ao}) \quad (1-43)$$

que se obtiene de la igualdad (1-18) considerando que la humedad absoluta es igual a cero.

La entalpía de una mezcla en particular podrá calcularse usando los valores leídos en cada una de

estas curvas:

$$x = H_{aa} + (x^* - H_{aa}) (\text{porcentaje de saturación}) \quad (1-44)$$

Existe un camino más fácil para obtener el valor de la variable x , que se basa en el hecho de que todos los puntos (t, y) ubicados sobre una curva que representa un proceso de saturación adiabática tienen prácticamente la misma entalpía. Esto puede comprobarse si se analiza la ecuación (A-69), en ella se aprecia que la diferencia de entalpía que existe entre las condiciones de saturación adiabática y otras cualesquiera es sólo el producto $HL(y_{sa} - y)$. Así

$$x \approx x^*$$

Entonces, para evaluar la entalpía de una mezcla dada, sólo se requerirá conocer la temperatura de bulbo húmedo. Con este valor, se lee en la gráfica la magnitud de la entalpía de equilibrio correspondiente.

1.2.13.4. Curva del volumen de equilibrio y curva del volumen del aire seco

La curva del volumen húmedo en condiciones de equilibrio se traza empleando la ecuación (1-17), dando valores a la temperatura y calculando los correspondientes de la variable γ^* .

La curva del volumen del aire seco se obtiene con la expresión

$$V_{aa} = \frac{Rt}{P} \left[\frac{1}{M_a} \right] \quad (1-45)$$

obtenida de la ecuación (1-17) asignando a la humedad el valor de cero.

Para una mezcla en particular, el volumen húmedo podrá calcularse con los valores de las variables γ^* y V_{aa} , de la siguiente manera:

$$\gamma = V_{aa} + (\gamma^* - V_{aa}) (\text{porcentaje de saturación}) \quad (1-46)$$

La tabla de la figura 1-4 se completará si se añaden las columnas correspondientes a las variables H^* , H_{aa} , V_H^* y V_{aa} .

13. EL PSICRÓMETRO.

El psicrómetro es un instrumento que se emplea para determinar la humedad del aire. Esencialmente consta de dos termómetros; a uno de éstos se le forra el bulbo con un material fibroso humedecido con agua. El otro debe tener el bulbo seco.

Con el fin de evitar la transferencia de calor por radiación entre el medio y el bulbo húmedo, debe hacerse circular rápidamente, sobre el psicrómetro, la corriente gaseosa cuya humedad se desea determinar. El psicrómetro de aspersion de Assmann tiene un pequeño ventilador que realiza esta función. En otro tipo de psicrómetro comunmente empleado, ambos termómetros están montados en una tabla de madera provista de un mango giratorio que permite mover todo el conjunto rápidamente.

El psicrómetro proporciona las magnitudes de las variables t_{bh} y t_{bs} , con las cuales, aplicando la ecuación (1-38), se puede calcular la humedad.

14. CONCLUSIONES.

Todos los conceptos relativos a las mezclas de aire y vapor de agua expuestos en este capítulo son aplicables a otros sistemas gas-líquido. Sin embargo,

debe recordarse que la relación psicrométrica no es igual a la unidad en la mayoría de los casos y en consecuencia, la temperatura de bulbo húmedo será diferente de la temperatura de saturación adiabática.

II

ANALISIS DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

2.1. TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y MASA.

De acuerdo con la teoría de la película estática, cuando un fluido circula sobre una fase diferente, su velocidad tiende a cero en la superficie de contacto. Esto significa que el fluido contiguo al límite de la fase está en reposo o estancado, formando una película muy fina, sobre la cual el flujo es turbulento.

Si la película está fija puede afirmarse que a través de ella la transferencia de calor se lleva a cabo mediante el mecanismo de conducción, y la de masa por difusión molecular. Este último fenómeno, por

supuesto, provoca por sí mismo un transporte de energía térmica. Según sea el sentido de la difusión molecular, puede elevar o reducir la rapidez de la transferencia de calor.

La película tiene una longitud determinada, sin embargo, el modelo no sugiere ninguna base para su predicción, lo cual es necesario para el cálculo de las velocidades del transporte.

Otra de las fallas de la teoría expuesta es que sugiere que la transferencia de masa es linealmente proporcional al coeficiente de la difusión. En realidad, parece ser que la turbulencia desaparece gradualmente al alcanzarse la interfase, y que del mismo modo va disminuyendo la difusión de remolino (dominante en el seno del fluido) para dar paso a la difusión molecular. Esto conduce a la idea de que el transporte másico se da de acuerdo con una función del tipo x^n , donde $n = 0$ en el límite exterior de la película y $n = 1$ en la superficie de contacto [21].

Aun con las limitaciones expuestas, el modelo ha resultado notablemente útil en diversas aplicaciones, como es el caso de la transferencia simultánea de calor y masa en las torres de enfriamiento de agua. En estos equipos el líquido se pone en contacto con una mezcla no saturada de aire y vapor de agua en las siguientes condiciones (ver figura 2-1):

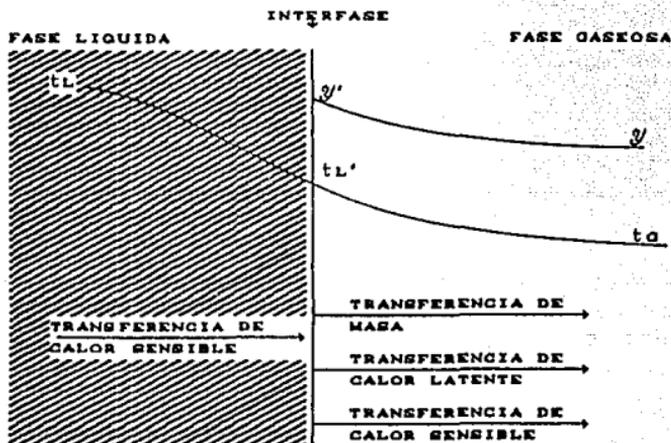


Fig. 2-1. *Transferencia simultánea de calor y masa.*
(Caso I).

La temperatura interna de la gota de agua es más alta que la de la interfase, lo cual provoca una transferencia de calor sensible hacia la superficie ($t_L > t_L'$). No ocurre un transporte de masa dentro de la gota, ya que no existe un gradiente de concentración con la interfase (se trata de un compuesto puro). Puesto que $t_L' > t_a$, habrá lugar a que se transfiera calor sensible a través de la película que rodea a la gota de agua. Por otra parte, la humedad de la interfase es mayor que la de la mezcla exterior, lo cual provocará que una parte del agua que forma la gota se evapore,

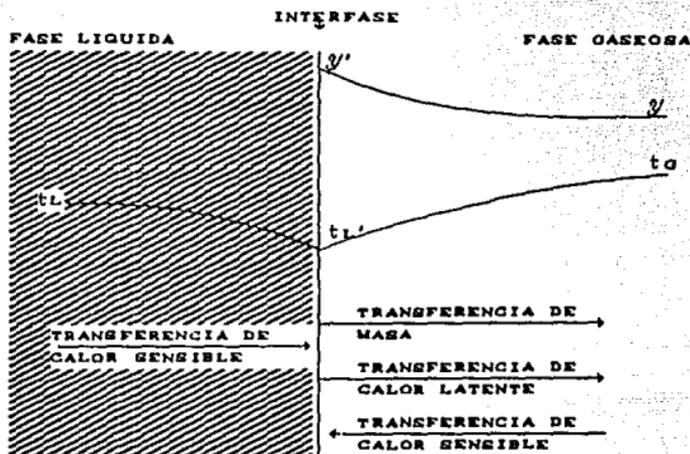


Fig. 2-2. *Transferencia simultánea de calor y masa.*
(Caso II).

llevando consigo el calor latente necesario para el proceso.

Hay ocasiones en que el calor latente y el calor sensible se transfieren a través de la película en sentidos opuestos. Esto sucede cuando la temperatura del agua que se ha de enfriar es menor que la de bulbo seco del aire, pero mayor que la de bulbo húmedo; también suele ocurrir este fenómeno en la parte inferior de las torres de enfriamiento.

Analizando la figura 2-2, se tiene que la transferencia de calor sensible dentro de la gota se da de la misma manera que en el caso anterior, puesto que

se cumple la desigualdad $t_L > t_L'$. Sin embargo, debido a que la temperatura de la mezcla exterior es mayor que la de la interfase, se transmitirá calor sensible de la primera hacia la segunda. Con todo, la condición de que $\psi' > \psi$ prevalece, por lo cual, tendrá lugar la evaporación de una porción de la gota de agua, provocando la transferencia de calor latente hacia la mezcla exterior. Este calor latente supera grandemente al calor sensible que fluye hacia la interfase, y por esta razón es comprensible el hecho de que el agua pueda enfriarse a una temperatura más baja que la de bulbo seco de la mezcla.

Según se vió en la sección 1.2.11, la mínima temperatura que puede alcanzar el agua es la de bulbo húmedo de la mezcla enfriadora; a esta temperatura, dicha mezcla estará saturada y no recibirá más vapor de agua; además, el flujo de calor sensible alcanzará el equilibrio. En realidad el agua no llega a la temperatura de bulbo húmedo en las torres de enfriamiento, teóricamente la podría conseguir en un equipo de dimensiones infinitas.

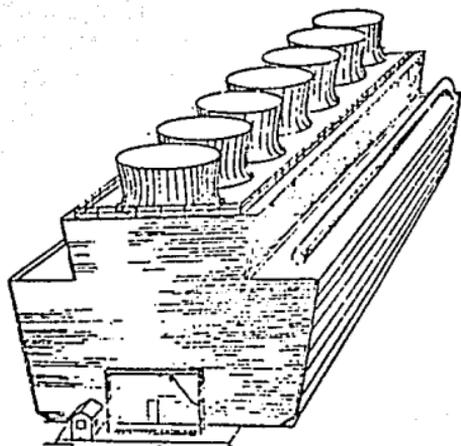


Fig. 2-3. Torre de enfriamiento de varias celdas.

2.2. GENERALIDADES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

En las torres de enfriamiento, el agua ingresa a través de la parte superior y se esparce por toda la sección transversal mediante un sistema de distribución; entonces cae por gravedad y se pone en contacto directo con la mezcla de enfriamiento (en lo sucesivo, se hará referencia a dicha mezcla denominándola simplemente *aire de enfriamiento*).

Con el fin de facilitar la formación de

grandes superficies de contacto entre el agua y el aire para la transferencia de masa y calor, las torres de enfriamiento están equipadas con una o más unidades de empaque llamadas *celdas*. El número de éstas dependerá de los flujos a manejar. En la figura 2-3 se puede apreciar una torre de enfriamiento con 14 celdas ordenadas en pares.

El tiempo de contacto entre el agua y el aire está determinado en gran medida por la altura de las celdas, y si esta no se calculó correctamente para el tipo de relleno empleado, no se obtendrá el rendimiento deseado.

Si el aire ingresa por la parte inferior de una celda y la atraviesa verticalmente, circulando en sentido contrario a la caída del agua, se dice que la operación se realiza con *flujo en contracorriente*; mientras que si ingresa por un lado y sale por el opuesto, moviéndose perpendicularmente con respecto al curso del líquido, se afirma que la operación se realiza con *flujo cruzado*.

Las torres de enfriamiento se diseñan y construyen en diversos tipos, cada uno presenta ventajas y desventajas frente a los demás. El modelo a seleccionar dependerá de muchos factores, entre otros, la temperatura a la cual se desea enfriar el agua, los recursos económicos disponibles y el lugar donde se

ubicará la torre.

Por lo general, estos equipos se clasifican de acuerdo con el medio empleado para el suministro del aire. En la siguiente sección se presentará una breve revisión de los tipos más comunes.

En la terminología empleada para el diseño y la operación de las torres de enfriamiento existen dos conceptos importantes: *el rango* y *el acercamiento*; este último también se conoce como *la aproximación*.

El rango es la diferencia entre la temperatura que tiene el agua a la entrada de la torre y la que alcanza a la salida de la misma. Normalmente se manejan rangos de 8°C a 20°C .

El acercamiento es la diferencia entre la temperatura del agua a la salida de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire atmosférico. Cuanto más pequeña sea esta diferencia, más difícil será el trabajo de enfriamiento y mayor el tamaño que requiere la torre. Generalmente se consideran acercamientos de 2.8°C a 8.5°C por razones económicas.

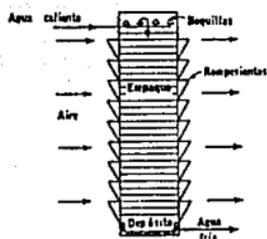


Fig. 2-4. Torre atmosférica.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

2.3.1. Torres atmosféricas.

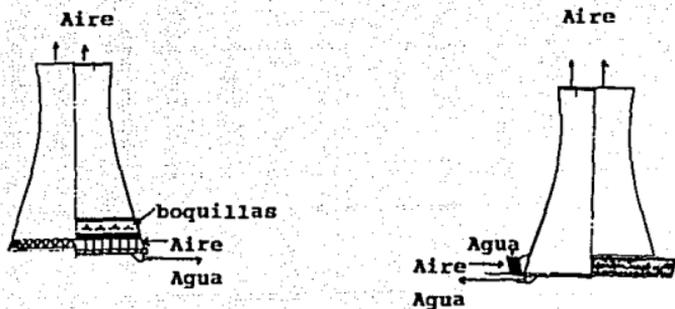
En este tipo de torres (figura 2-4) se aprovechan las corrientes naturales de aire, que penetran al equipo a través de unas persianas laterales, cuya función es impedir pérdidas excesivas de agua por arrastre.

Las torres atmosféricas deben orientarse de

acuerdo con la dirección del viento que predomina durante el año. Deben ser angostas para no provocar una gran caída de presión en la corriente de aire, y en consecuencia, serán más largas que las otras torres para una capacidad de enfriamiento determinada. Es necesario ubicarlas en lugares abiertos, donde no existan obstáculos para las corrientes atmosféricas.

En estas torres, el flujo de aire es perpendicular al de agua, por lo que se dice que operan con flujo cruzado. Para un desempeño adecuado se requieren vientos con velocidades de 7.5 a 10.5 k/h. En estas condiciones, la torre atmosférica puede ser la más económica. Si bien debido a su tamaño la inversión inicial es alta, se elimina el costo principal de operación de las torres con tiro mecánico: la energía consumida por el ventilador. Sin embargo existe el costo del bombeo del agua hasta la parte superior, que es relativamente alta.

Una de las principales desventajas que presentan las torres analizadas es su dependencia de las corrientes naturales para lograr una operación aceptable. Por otra parte, no consiguen enfriar el agua a temperaturas cercanas a la de bulbo húmedo del aire.



A. FLUJO EN CONTRACORRIENTE.

B. FLUJO CRUZADO.

Fig. 2-5. Torres de tiro natural.

2.3.2. Torres de tiro natural o hiperbólicas.

En una torre de tiro natural, se aprovecha la diferencia de densidades entre el aire atmosférico, relativamente frío, y el aire caliente en el interior del equipo para promover el flujo ascendente de la corriente de enfriamiento a través del empaque.

La torre debe ser alta, ya que la diferencia de presiones producida por el efecto de las distintas densidades es aproximadamente proporcional a la altura del equipo. Para favorecer el tiro natural también se

requiere una sección transversal grande en la parte inferior y una coraza en forma hiperbólica.

La diferencia de densidades que impulsa el flujo de aire depende, asimismo, de la temperatura que alcance éste en la región empacada, lo cual por supuesto, está en función de la temperatura del agua a la entrada y a la salida de la torre. El agua caliente da lugar a una corriente rápida de aire a través del empaque, pero conforme su temperatura se va reduciendo hacia la parte baja de la torre, la velocidad del aire también disminuye.

En las torres de este tipo, el empaque ocupa únicamente la parte inferior y tiene poca altura en comparación con la de la estructura, que en su mayor parte se emplea para promover el tiro natural.

Cabe señalar que la resistencia al flujo de aire debe reducirse lo más posible, para evitar grandes caídas de presión.

El costo inicial de una torre de este tipo es elevado, por su gran tamaño, y en cuanto al consumo de energía, sólo lo realiza para bombear el agua hasta la parte superior del relleno, cuya altura es normalmente menor que en una torre atmosférica.

Dado que el flujo de aire se produce por diferencia de densidades, estas torres trabajan mejor en lugares donde la atmósfera tiene una humedad

relativamente alta. Por supuesto que el agua a enfriar deberá tener una temperatura mayor que la de bulbo seco del aire, con el fin de que la densidad de éste disminuya dentro de la torre.

Si durante algún periodo del día la temperatura del aire se eleva notablemente con respecto a la del agua que se ha de enfriar, el rendimiento de la torre bajará, lo cual representa un inconveniente.

Otra desventaja que tienen las torres de tiro natural es su incapacidad para enfriar el agua a una temperatura cercana a la de bulbo húmedo del aire. Sin embargo, pueden representar una opción económica —puesto que se elimina el alto costo de operación del ventilador y el mantenimiento del equipo mecánico— cuando se manejan grandes volúmenes de agua y no se requiere un acercamiento muy pequeño. Estas torres pueden operar con flujo cruzado o en contracorriente (figura 2-5).

Actualmente su uso, al igual que el de las torres atmosféricas, está declinando en América, pero aún se continúan empleando en Europa y en el Medio Oriente.

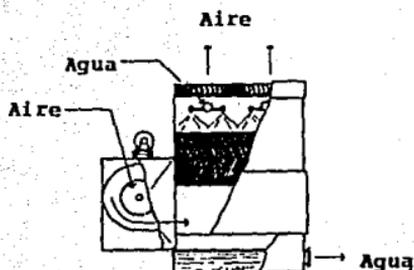
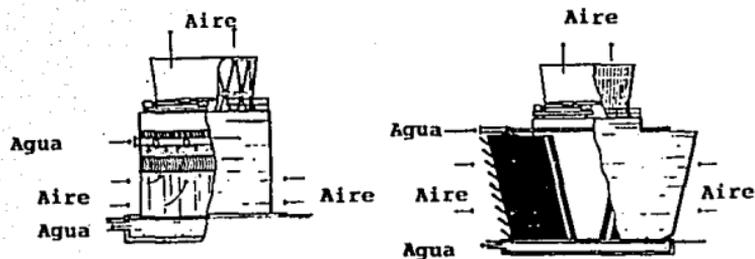


Fig. 2-6. Torre de tiro forzado.

2.3.3. Torres de tiro mecánico.

Las torres de tiro mecánico emplean ventiladores para abastecerse del aire de enfriamiento que circulará a través de ellas. De esta forma, su desempeño es más estable y depende de un número menor de variables psicrométricas que el de las torres atmosféricas y de tiro inducido.

La presencia de ventiladores provee, asimismo, de un medio para regular el flujo de aire cuando las condiciones de operación lo requieran.



A. FLUJO EN CONTRACORRIENTE.

B. FLUJO CRUZADO

Fig. 2-7. Torres de tiro inducido.

De acuerdo con la colocación del ventilador, las torres de este tipo pueden ser de *tiro forzado* (figura 2-6) o de *tiro inducido* (figura 2-7).

Si el ventilador está montado frente a la entrada del aire en la base de la torre, se dice que el tiro es forzado. Este arreglo tiene la ventaja de que todo el equipo mecánico se encuentra fuera de la torre, facilitando las labores de inspección y mantenimiento y reduciendo los problemas de corrosión, ya que el aire impulsado está en condiciones atmosféricas, menos agresivas que las del aire que sale de la torre. Por

otra parte, la desventaja es que durante el invierno el desempeño del ventilador puede verse afectado por la formación de hielo sobre las aspas.

Otro inconveniente que presenta este modelo es que la distribución del aire en el empaque es relativamente pobre, debido a las altas velocidades y gran turbulencia que alcanza este elemento a la entrada de la torre.

Después de su trayectoria a través del relleno, el aire sale por la sección superior a baja velocidad, lo cual ocasiona que una parte de él sea succionada nuevamente por el ventilador (recirculación parcial). Esto, desde luego, disminuye el rendimiento de la torre, ya que la corriente de entrada se contamina con aire cuya humedad y temperatura son mayores.

Estas torres operan con flujo en contracorriente.

En las torres de tiro inducido, el ventilador está montado sobre la sección superior, por donde se descarga el aire de enfriamiento.

El equipo mecánico, expuesto a corrientes con temperaturas relativamente altas, no corre el riesgo de que se forme hielo sobre sus partes, sin embargo, el peligro de corrosión es mayor que en las torres de tiro forzado.

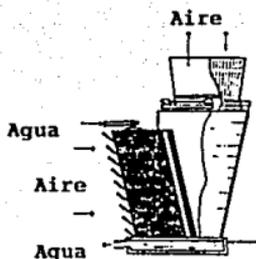


Fig. 2-8. Torre de una celda que opera con flujo cruzado.

Dada la posición del ventilador, el aire puede ingresar a la torre a través de una o más paredes y tendrá una distribución uniforme en el empaque. Por otra parte, hay muy poca o ninguna tendencia a que se formen zonas de baja presión frente a las aberturas por las cuales penetran las corrientes de enfriamiento, como ocurre cuando se emplea el tiro forzado. Este hecho, aunado al de que la descarga del aire se realiza a alta velocidad, reduce considerablemente el riesgo de que se presente la recirculación parcial.

Las torres de tiro inducido pueden operar con

flujo en contracorriente o cruzado, y las ventajas que ofrecen han hecho que actualmente se empleen más que las de tiro forzado.

Las torres que operan con flujo cruzado se subclasifican de acuerdo con el número de entradas para el aire con que cuentan. Se construyen con una entrada en lugares donde las corrientes naturales disponen de una sola trayectoria libre de obstáculos hacia la torre; o bien, donde el viento tiene una dirección predominante durante el año. Orientando la entrada del aire de modo que reciba directamente las corrientes naturales, la recirculación parcial puede eliminarse por completo (figura 2-8).

También se diseñan torres que operan con doble flujo cruzado (tienen dos entradas para el aire). Después de atravesar las regiones empacadas, ambas corrientes se juntan en un claro en el centro de la torre y salen por la parte superior (figura 2-7-b).

Pueden construirse torres con varias celdas, pero generalmente, éstas estarán dispuestas por pares, cada uno de los cuales empleará un sistema de tiro inducido (figura 2-3).

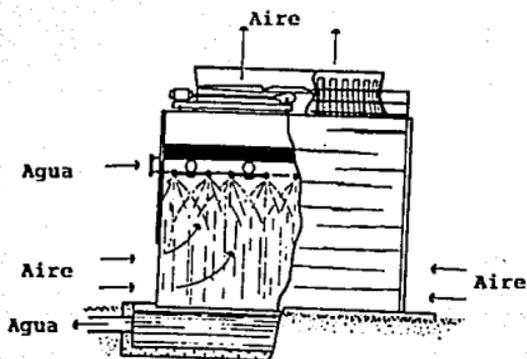


Fig. 2-9. Torre de rocío.

2.3.4. Torres de rocío.

Las torres de rocío (figura 2-9) no tienen empaque, de modo que para incrementar la superficie de contacto entre el aire y el agua, ésta se pulveriza haciéndola pasar por boquillas esparcidoras para después dejarla caer por gravedad. La operación puede hacerse con flujo cruzado o en contracorriente, y el aire puede abastecerse con ventiladores o aprovechando las corrientes atmosféricas.

El uso de estas torres se limita a aquellos

procesos en los cuales no se requiere enfriar el agua a una temperatura cercana a la de bulbo húmedo del aire. También se emplean cuando el agua tiene un alto grado de sustancias contaminantes que pueden dañar el material del empaque. Por supuesto que estas torres tienen un menor rendimiento que todas las demás.

24. TORRES QUE OPERAN CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE VS. TORRES QUE OPERAN CON FLUJO CRUZADO.

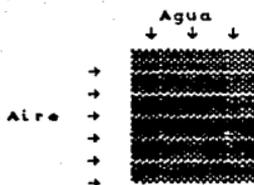
En esta sección se analizarán, comparativamente, las torres que operan con flujo en contracorriente y las torres que lo hacen con flujo cruzado.

Como se podrá apreciar, cada tipo de torre presenta ventajas y desventajas con respecto al otro; por lo que, para hacer una correcta elección, se deben considerar los cargos fijos, los costos de operación y el servicio requerido.

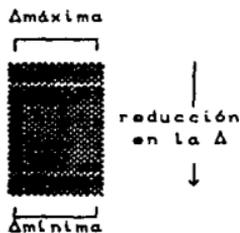
En general, puede afirmarse que una torre que opera con flujo en contracorriente ofrece un mejor servicio cuando se requieren amplios rangos de enfriamiento y pequeñas aproximaciones; pero también puede aseverarse que comúnmente, tendrá menores costos de operación una torre que trabaja con flujo cruzado.



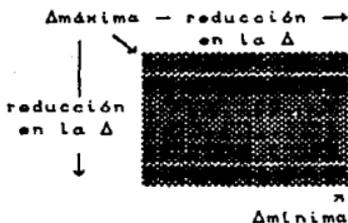
A. TORRE DE FLUJO EN CONTRACORRIENTE (REGION EMPACADA)



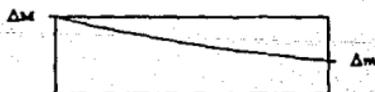
B. TORRE DE FLUJO CRUZADO (REGION EMPACADA)



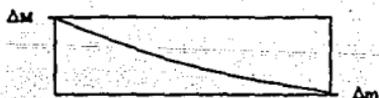
C. LA FUERZA IMPULSORA ES CONSTANTE A TODO LO ANCHO DEL EMPAQUE. SOLO DISMINUYE HACIA ABAJO.



D. LA FUERZA IMPULSORA DISMINUYE EN LAS DIRECCIONES DE LOS FLUJOS DE AGUA Y DE AIRE.



E. VARIACION ENTRE Δ_m Y Δ_m PARA LA TORRE DE FLUJO EN CONTRACORRIENTE.



F. VARIACION ENTRE Δ_m Y Δ_m PARA LA TORRE DE FLUJO CRUZADO.

Δ = fuerza impulsora.
 Δ_m = fuerza impulsora máxima.
 Δ_m = fuerza impulsora mínima.

Fig. 2-10. Fuerzas impulsoras.

La explicación para la primera aseerción es que cuando el trabajo se realiza con flujo en contracorriente, el potencial de la transferencia de masa y energía es constante a todo lo ancho de la torre—y por lo tanto se aprovecha más eficientemente— que cuando la operación se lleva a cabo con flujo cruzado. En este último caso, la fuerza impulsora del transporte de masa y energía disminuye continuamente en las direcciones de los flujos de agua y de aire, de tal manera que si éste se mueve hacia la derecha en una celda, dicha fuerza tendrá su máximo valor en la esquina superior izquierda y alcanzará el mínimo en la arista diagonalmente opuesta (figura 2-10).

En cuanto a la segunda afirmación, se tiene que, en general, las torres que operan con flujo en contracorriente son más altas que las que lo hacen con flujo cruzado, debido a que requieren grandes aberturas en la parte inferior para la entrada del aire, a lo cual se suma la longitud vertical del empaque (ver figura 2-7-a). Esto implica la necesidad de grandes cabezas de bombeo para llevar el agua hasta la parte superior. En cambio, la altura de una torre que trabaja con flujo cruzado es básicamente igual a la del empaque.

En cuanto a la pérdida de presión, es mayor cuando el aire tiene que moverse contra la caída del agua que cuando lo hace transversalmente con

respecto al curso del líquido, por lo cual, el ventilador requerirá mayor potencia en el primer caso.

Lo anteriormente expuesto coincide con las investigaciones de Molyneux [15], quien concluye que mientras más grande sea el rango y más difícil de lograr la aproximación especificada, más considerable será la ventaja que para cumplir con los requerimientos tendrá una torre que opere con flujo en contracorriente. Asimismo, señala que en condiciones de trabajo menos extremosas, las torres que operan con flujo cruzado aventajan a las otras, debido a sus menores costos de operación.

Por otra parte, la distribución del agua en el área transversal superior de una torre que trabaja con flujo en contracorriente se hace mediante ductos con boquillas rociadoras de alta presión. En el otro tipo de torre, existen depósitos con orificios provistos de boquillas distribuidoras a través de las cuales el líquido cae por gravedad. Estos depósitos están montados sobre las unidades de relleno, y es posible darles mantenimiento aun cuando la torre está trabajando, lo cual no es factible con los sistemas de distribución mencionados en primer término.

En cuanto al terreno, las torres que operan con flujo en contracorriente requieren generalmente una menor área para el mismo servicio.

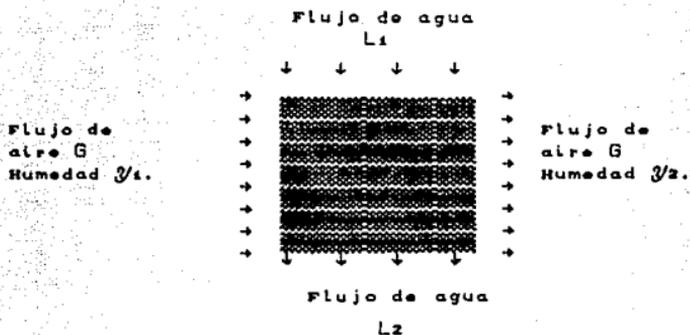
2.5. FUNCIONAMIENTO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

2.5.1. El agua.

El agua que circula a través de una torre de enfriamiento debe tratarse químicamente, para impedir que se depositen los sólidos e impurezas que contiene en las partes del sistema. La fijación de partículas afecta el desempeño del equipo e incrementa la resistencia al flujo de agua. Debido a la continua recirculación y aereación del líquido, es necesario también añadir compuestos que inhiban la corrosión y agentes que impidan el desarrollo de microorganismos.

Existen ciertas pérdidas de agua inherentes a la operación de una torre de enfriamiento, y deben ser repuestas continuamente con agua tratada de acuerdo con las especificaciones.

Una fracción del líquido circulante se evapora y se mezcla con la corriente de aire. El calor latente requerido para el cambio de fase es cedido por el líquido remanente y constituye la mayor parte de la energía térmica total que se transfiere hacia el aire. Esta pérdida de agua puede calcularse mediante un balance de masa hecho en cada celda de la torre (figura 2-11).



UNA PARTE DEL FLUJO DE AGUA SE EVAPORA Y SE MEZCLA CON EL AIRE. DE ESTE MODO SE CUMPLEN LAS SIGUIENTES RELACIONES: $L_2 < L_1$ Y $Y_2 > Y_1$.

Fig. 2-11. Balance de materia en una celda.

$$L_1 - L_2 = G(Y_2 - Y_1) \quad (2-1)$$

Otra cantidad de agua es arrastrada por el aire en forma de pequeñas gotas que llevan su cantidad correspondiente de sólidos disueltos. El fabricante debe proporcionar el porcentaje del líquido así perdido.

Debido a la constante recirculación y evaporación del agua, la concentración de partículas que esta contiene se incrementa continuamente. Esto resulta dañino para la torre, ya que un nivel de sólidos

disueltos superior al permisible de acuerdo con el tratamiento químico ocasiona que se depositen impurezas en las partes del equipo. Para impedir esto, es absolutamente imprescindible mantener una purga constante de agua, que garantice una concentración adecuada de partículas disueltas.

Con base en la figura 2-12, se tiene que un balance de sólidos se expresa mediante la igualdad

$$Y_P + Y_A = Y_r R \quad (2-2)$$

al dividir entre Y_r ambos lados de la ecuación se obtiene

$$\frac{Y}{Y_r} P + \frac{Y}{Y_r} A = R \quad (2-3)$$

sea

$$n = \frac{Y}{Y_r} \quad (2-4)$$

entonces

$$n P + n A = R \quad (2-5)$$

por lo cual

$$P + A = \frac{R}{\lambda} \quad (2-6)$$

el balance de agua puede expresarse

$$P + A = R - E \quad (2-7)$$

combinando las ecuaciones (2-6) y (2-7) resulta

$$\frac{R}{\lambda} = R - E \quad (2-8)$$

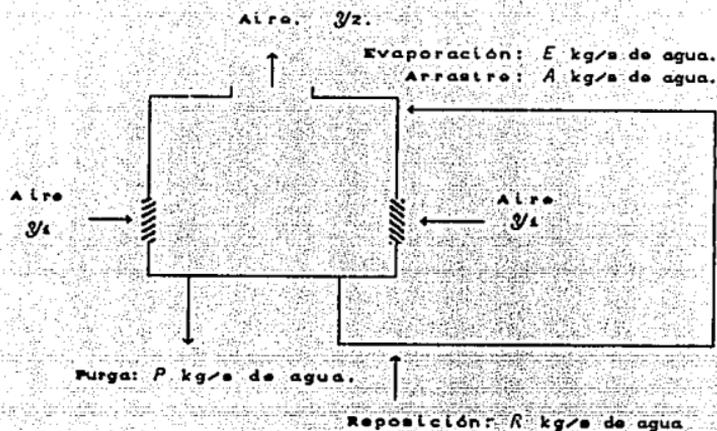
por lo cual

$$R = \frac{\lambda}{\lambda - 1} E \quad (2-9)$$

sustituyendo esta ecuación en la (2-6) se obtiene

$$P = \frac{E}{\lambda - 1} - A \quad (2-10)$$

Generalmente, las pérdidas por arrastre están en el rango del 0.1% al 0.2% del líquido circulante. El agua de reposición es



- y = kg sólidos disueltos / kg agua circulante.
 y_r = kg sólidos disueltos / kg agua de reposición.
 λ = $\frac{\text{kg sólidos en el agua circulante}}{\text{kg sólidos en el agua de reposición}}$

Fig. 2-12. Balance de sólidos.

$$R = P + E + A \quad (2-11)$$

2.5.2. El ventilador.

En las torres de enfriamiento se emplean generalmente ventiladores axiales con transmisión por banda o mediante engranes [11].

De acuerdo con los trabajos de Monroe [16], la manera más económica de controlar el flujo de aire es usando un ventilador con ángulo de paso ajustable o con velocidad variable. Normalmente se utilizan motores totalmente cerrados y enfriados con aire.

La potencia que necesita el ventilador para impulsar un gasto de aire dado puede calcularse con la ecuación

$$\text{BHP} = \frac{F P_c}{746 \eta} \quad (2-12)$$

en la cual, la F representa el gasto volumétrico de aire (en m^3/s), la P_c la presión estática total en la torre (en Pa) y la η la eficiencia del sistema motor-transmisión-ventilador.

La expresión adecuada para cuando la F se da en ft^3/min y la P_c en pulgadas de agua, es

$$\text{BHP} = \frac{F P_c}{6356 \eta} \quad (2-13)$$

En el cálculo de la presión estática total, deben considerarse las resistencias al flujo de aire que presentan el empaque, las persianas y los eliminadores de rocío. También existen caídas de presión por cambios

de dirección de las corrientes de enfriamiento. La resistencia ofrecida por cada uno de los elementos mencionados depende de las velocidades del aire y del agua. El fabricante de la torre puede proporcionar los datos necesarios para calcular la presión estática.

Si se desea acrecentar la capacidad de la torre es necesario incrementar el flujo de aire; sin embargo, se debe hacer previamente una evaluación económica de la situación; ya que cuando el ventilador opera en las condiciones de diseño y con una eficiencia constante, el flujo de aire sólo se incrementará en la proporción de la raíz cúbica del aumento de la potencia, según la ecuación

$$\frac{hp_2}{hp_1} = \left[\frac{F_2}{F_1} \right]^3 \quad (2-14)$$

donde el símbolo hp representa los caballos de potencia requeridos. Por otra parte, debido a que se cumple esta relación matemática, puede ahorrarse una gran cantidad de energía disminuyendo la velocidad del ventilador. Si ésta se reduce a la mitad, se tiene que

$$hp_2 = hp_1(0.5)^3 = hp_1(1/8)$$

sin embargo, al utilizar este método de ahorro de

energía se deben verificar los cambios en el desempeño de la torre de enfriamiento, sobre todo si ésta opera con flujo cruzado [25]. Uno de los efectos contraproducentes puede ser la reducción del volumen activo del empaque empleado.

2.5.3. El empaque y el eliminador de rocío.

Anteriormente, el empaque de las torres de enfriamiento se fabricaba con madera y se estructuraba en pisos a todo lo alto. Dichos pisos estaban formados por tablas que se encontraban separadas para permitir el paso del agua; Así, ésta caía golpeando continuamente cada etapa, lo cual favorecía la formación de películas de líquido en los pisos y de gotas que salpicaban constantemente.

Sin embargo, en los últimos años se ha desarrollado un nuevo tipo de empaque [1,2,3] llamado *relleno celular* y fabricado con PVC. Las gotas de agua son extendidas formando finas películas mientras el líquido cae a través de la celda. Esto facilita grandemente la transferencia de masa y de calor hacia el aire de enfriamiento.

La presión estática por unidad de volumen es mayor en el empaque celular que en el convencional de

pisos de madera. No obstante, dada la alta eficiencia del primero, requiere tener una altura considerablemente menor para cumplir el mismo servicio y en consecuencia, la caída total de presión que provoca es inferior.

Los eliminadores de rocío se utilizan para disminuir las pérdidas de agua por arrastre. La finalidad principal de esto es evitar contaminar la atmósfera, ya que las gotas de agua expulsadas contienen impurezas disueltas. También se hace para retener el tratamiento químico dado al agua y disminuir este costo de operación; aun cuando conviene recordar que de acuerdo con la ecuación (2-10), al disminuir las pérdidas por arrastre, debe incrementarse la purga para mantener una concentración baja de sólidos disueltos.

Los eliminadores de rocío también solían fabricarse con madera. Actualmente se hacen con PVC y tienen mejores diseños, que permiten disminuir considerablemente las pérdidas por arrastre y ofrecen aun así, una menor resistencia al flujo de aire [1]. Esto por supuesto, favorece el desempeño de la torre de enfriamiento. Un nivel aceptable de pérdidas por arrastre estará en el rango de 0.1% a 0.2% del líquido circulante.

III

DISEÑO Y OPERACION DE LAS TORRES DE FLUJO CRUZADO

3.1 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO.

Para el desarrollo de las ecuaciones aplicables al diseño de las torres de enfriamiento que operan con flujo cruzado, se harán las siguientes asunciones:

1. El agua y el aire circulan en regímenes permanentes y presentan perfiles de velocidades rectos (flujos tapón).

2. No hay transferencia de masa ni de calor en la dirección z (perpendicular a la hoja en la figura 3-1).

señalarse que si el empaque no está mojado completamente con el líquido, la superficie para la transferencia de masa —que es la interfase aire-agua— será menor que aquélla para la transferencia de calor, puesto que ésta, además de llevarse a cabo a través del área de contacto líquido-gas, también puede suceder entre el empaque y los fluidos.

La mencionada área interfacial es definida por la relación

$$A = aV \quad (3-1)$$

en la que la V representa el volumen del empaque y la a la superficie de contacto por unidad de espacio relleno.

Representen las letras L y G las masas velocidades de agua y de aire, respectivamente. De acuerdo con la figura 3-1, los flujos mássicos totales son

$$L_T = LXZ \quad (3-2)$$

$$G_T = GYZ \quad (3-3)$$

El elemento diferencial señalado en el diagrama tiene un volumen igual a dV , que puede expresarse

$$dV = Zdx dy \quad (3-4)$$

Un balance de materia para esta región demuestra que

$$-Zdx \left(\frac{\partial L}{\partial y} \right)_x dy = ZdyG \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_y dx \quad (3-5)$$

esta ecuación se reduce a

$$- \left(\frac{\partial L}{\partial y} \right)_x = G \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_y \quad (3-6)$$

Para el balance de energía se tiene la siguiente expresión:

$$GZdy \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y dx = -CAL Zdx \left(\frac{\partial (tLL)}{\partial y} \right)_x dy \quad (3-7)$$

que se simplifica para dar

$$G \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y = -CAL \left(\frac{\partial (tLL)}{\partial y} \right)_x \quad (3-8)$$

Desarrollando el lado derecho se tiene

$$G \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y = - \left[LCAL \left(\frac{\partial tL}{\partial y} \right)_x + CAL \left(\frac{\partial L}{\partial y} \right)_x (tL - t_0) \right] \quad (3-9)$$

La masa del agua disminuye ligeramente al atravesar la región diferencial, debido a que parte de ella se evapora y se mezcla con el aire. Esta reducción en la cantidad de agua es muy pequeña, y para fines prácticos, puede considerarse que la L es constante; así, la ecuación (3-9) se simplifica dando el siguiente resultado:

$$G \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y = - LCAL \left(\frac{\partial tL}{\partial y} \right)_x \quad (3-10)$$

De acuerdo con la teoría de la película, la rapidez de la transferencia de masa a través de la capa de aire se expresa

$$ZdyG \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_y dx = kv (y' - y) dA \quad (3-11)$$

y la rapidez de la transferencia de calor sensible se define

$$ZdyG \left(\frac{\partial t_a}{\partial x} \right)_y dx = h_o (t' - t_0) dA \quad (3-12)$$

Ahora bien, de la ecuación (3-1) se tiene que

$$dA = adV \quad (3-13)$$

sustituyendo la definición de la diferencial dV en la expresión anterior se obtiene

$$dA = aZdx dy \quad (3-14)$$

al reemplazar la diferencial dA por su igualdad en las ecuaciones (3-11) y (3-12) se llega a las siguientes relaciones:

$$ZdyG \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_y dx = kva (y' - y) Zdx dy \quad (3-15)$$

$$ZdyG \left(\frac{\partial ta}{\partial x} \right)_y dx = ha (t' - ta) Zdx dy \quad (3-16)$$

que se reducen a estas otras

$$G \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_y dx = kva (y' - y) \quad (3-17)$$

$$G \left(\frac{\partial t_0}{\partial x} \right)_y dx = h_{oa} (t' - t_0) \quad (3-18)$$

La velocidad total de la transferencia de calor (latente + sensible) a través de la película es entonces

$$G \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y = h_{oa} (t' - t_0) + \lambda k_{va} (y' - y) \quad (3-19)$$

y equivale a la rapidez de la transferencia de calor desde el seno del líquido hacia la interfase:

$$- LCAL \left(\frac{\partial t_L}{\partial y} \right)_x = hLa (t_L - t') \quad (3-20)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3-19) y (3-20) en la (3-10) se tiene que

$$hLa (t_L - t') = h_{oa} (t' - t_0) + \lambda k_{va} (y' - y) \quad (3-21)$$

La expresión (3-19) puede ordenarse de la siguiente manera:

$$G \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y = k_{va} \left[\frac{h_{oa}}{k_{va} G} (t' - t_0) + \lambda (y' - y) \right] \quad (3-22)$$

Para el sistema aire-agua, la relación $h_{oa}/k_{va}Z = 1$, por lo que

$$G \left(\frac{\partial \mathcal{R}}{\partial x} \right)_y = k_{va} [(\mathcal{R}t' + \lambda y') - (\mathcal{R}t_0 + \lambda y)] \quad (3-23)$$

según la ecuación (1-18), la expresión (3-23) puede escribirse

$$G \left(\frac{\partial \mathcal{R}}{\partial x} \right)_y = -k_{va} (\mathcal{R}' - \mathcal{R}) \quad (3-24)$$

al sustituir este resultado en la ecuación (3-10) se encuentra que

$$-LCAL \left(\frac{\partial t_L}{\partial y} \right)_x = -k_{va} (\mathcal{R}' - \mathcal{R}) \quad (3-25)$$

por lo cual

$$LCAL \left(\frac{\partial t_L}{\partial y} \right)_x = k_{va} (\mathcal{R}' - \mathcal{R}) \quad (3-26)$$

Combinando las ecuaciones (3-20) y (3-26) resulta que

$$-\frac{hLa}{kya} = \frac{x' - x}{t' - t_L} \quad (3-27)$$

Integrando las ecuaciones (3-24) y (3-26) pueden conocerse los valores de la temperatura del agua y de la entalpía del aire en cualquier punto (x,y). Dada la dificultad para calcular las propiedades de la interfase, se emplea un coeficiente global de la transferencia de masa: K_a , para lo cual se asume que en la interfase el aire está saturado a la temperatura del agua. De esta manera las ecuaciones (3-24) y (3-26) se transforman en

$$G \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y = K_a (x^* - x) \quad (3-28)$$

$$LCAL \left(\frac{\partial t_L}{\partial y} \right)_x = K_a (x - x^*) \quad (3-29)$$

Con referencia a la figura 3-2, se aprecia que puede expresarse el potencial total de la transferencia de masa y energía como la suma de las fuerzas impulsoras independientes a través de las corrientes de líquido y de gas:

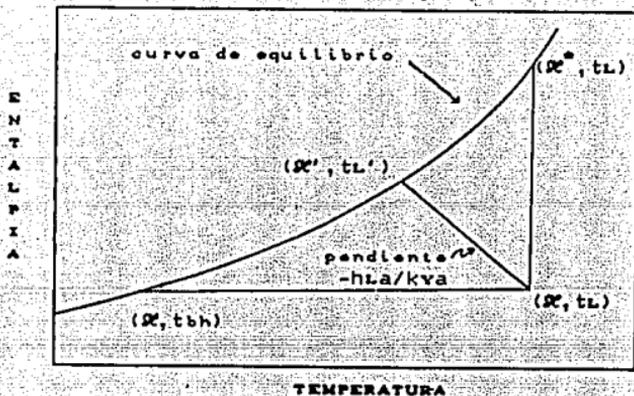


Fig. 3-2. Fuerza impulsora del transporte de materia y energía.

$$\theta_c^* - \theta_c' = (\theta_c - \theta_c') + (\theta_c^* - \theta_c') \quad (3-30)$$

sea la letra m la pendiente de la recta que pasa por los puntos (t', θ_c') y (t_L, θ_c^*) :

$$m = \frac{\theta_c^* - \theta_c'}{t_L - t'} \quad (3-31)$$

por lo que

$$t_L - t' = m(\theta_c^* - \theta_c') \quad (3-32)$$

De acuerdo con las ecuaciones (3-20), (3-25) y (3-29), se tiene que

$$-LCAL = hLa(t_L - t') = kva(\mathcal{X}' - \mathcal{X}) = Ka(\mathcal{X}^* - \mathcal{X}) \quad (3-33)$$

sustituyendo la m por su definición en la ecuación (3-33) se llega a

$$-LCAL = mhLa(\mathcal{X}^* - \mathcal{X}) = kva(\mathcal{X}' - \mathcal{X}) = Ka(\mathcal{X}^* - \mathcal{X}) \quad (3-34)$$

Despejando de esta expresión los gradientes de la transferencia de masa y energía para cada coeficiente y sustituyendolos en la ecuación (3-30), se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{1}{Ka} = \frac{1}{kva} + \frac{1}{hLa} \frac{\mathcal{X}^* - \mathcal{X}'}{t_L - t'} \quad (3-35)$$

Si la resistencia a la transferencia de calor que presenta la fase líquida es muy pequeña comparada con la oposición al transporte de masa que ofrece la fase gaseosa, la relación hLa/kva tiende a infinito, ya que el denominador será muy grande respecto del numerador. Los trabajos experimentales [6,21,23] demuestran que en las torres de enfriamiento se cumple aceptablemente esta condición, así

$$\frac{1}{K_a} \cong \frac{1}{k_{va}} \quad (3-36)$$

Como se aprecia en el diagrama de la figura 3-2, esto equivale a considerar que en la interfase, el aire se encuentra saturado a la temperatura del seno del agua.

Ahora bien, de las ecuaciones (2-2) y (2-3) se pueden despejar los valores de las variables L y G

$$L = \frac{L_T}{Z_X} \quad (3-37)$$

$$G = \frac{G_T}{Z_Y} \quad (3-38)$$

Al sustituir las mencionadas variables por sus igualdades en las ecuaciones (3-37) y (3-28) respectivamente, se obtienen las expresiones

$$\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial X} \right)_Y = \frac{K_a Z_Y}{G_T} (\mathcal{L}^* - \mathcal{L}) \quad (3-39)$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial Y} \right)_X = C_{AL} \frac{K_a Z_X}{L_T} (\mathcal{L} - \mathcal{L}^*) \quad (3-40)$$

Ambos lados de la ecuación (3-39) pueden

multiplicarse por X, y ambos lados de la expresión (3-40) pueden multiplicarse por Y, para dar

$$\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\left(\frac{\partial x}{X} \right)} \right)_y = \frac{KaV}{G\tau} (\mathcal{L}^* - \mathcal{L}) \quad (3-41)$$

$$CAL \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\left(\frac{\partial y}{Y} \right)} \right)_x = \frac{KaV}{L\tau} (\mathcal{L} - \mathcal{L}^*) \quad (3-42)$$

definiendo las variables dimensionales

$$x = \frac{x}{X} \quad y = \frac{y}{Y}$$

y sustituyéndolas en las expresiones (3-41) y (3-42) se llega a las relaciones

$$\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} \right)_y = \frac{KaV}{G\tau} (\mathcal{L}^* - \mathcal{L}) \quad (3-43)$$

$$\text{CAL} \left(\frac{\partial t_L}{\partial y} \right)_x = \frac{K_a V}{L_T} (x - x^*) \quad (3-44)$$

que son las que se aplicarán al diseño de los equipos estudiados. En lo que resta del presente capítulo, el símbolo t representará la temperatura del agua, en lugar del símbolo t_L que se usó hasta ahora.

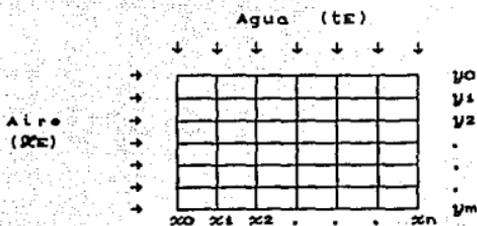
El grupo adimensional $K_a V / L_T$ (o $K_a V / G_T$) se conoce como *característica de la torre o coeficiente de desempeño*. En lo sucesivo se hará referencia a él, en cualquiera de sus formas, con el símbolo ξ .

La relación entre ambas formas del factor ξ es la siguiente:

$$\frac{K_a V}{G_T} = \frac{K_a V}{L_T} \frac{L_T}{G_T} \quad (3-45)$$

Si se representa una celda de la torre como una malla (figura 3-3), la integración de las expresiones (3-43) y (3-44) dará los valores de la temperatura del agua y de la entalpía del aire en cada punto (x, y) .

En el plano y_0 ($y = 0$) la ecuación (3-43) puede escribirse



Cada punto (x, y) tiene un valor de la entalpia del aire y de la temperatura del agua. Esta matriz da origen al diagrama de comportamiento de la torre.

Fig. 3-3. Representación del relleno como una malla o matriz.

$$\frac{dX}{dx} = - \frac{KaV}{G_T} (X^* - X) \quad (3-46)$$

y su integración es sencilla, ya que la temperatura del agua es constante —y por lo tanto la X^* también lo es— desde $x = 0$ hasta $x = 1$. Así, reordenando resulta

$$\frac{d\alpha}{\alpha^* - \alpha} = \frac{KaV}{G_T} d\alpha \quad (3-47)$$

La solución por etapas se presenta a continuación:

$$- \int \frac{d\alpha}{\alpha - \alpha^*} = \int \frac{KaV}{G_T} d\alpha \quad (3-48)$$

$$- \ln(\alpha - \alpha^*) = \frac{KaV}{G_T} \alpha + I \quad (3-49)$$

donde la I es la constante de integración

$$\alpha - \alpha^* = \exp \left[-\frac{KaV}{G_T} \alpha - I \right] \quad (3-50)$$

$$\alpha = \exp \left[-\frac{KaV}{G_T} \alpha - I \right] + \alpha^* \quad (3-51)$$

Represente el símbolo α_x la entalpia del aire a la entrada de la torre, entonces, como condición inicial se tiene que

$$\alpha(0) = \alpha_x$$

Sustituyendo la condición inicial en la ecuación (3-51) el resultado es

$$x_c = \exp(-I) + x^* \quad (3-52)$$

$$x_c - x^* = \exp(-I) \quad (3-53)$$

$$\ln(x_c - x^*) = -I \quad (3-54)$$

por lo cual

$$-I = \ln(x_c - x^*) \quad (3-55)$$

reemplazando la I por su equivalencia en la ecuación (3-51) se llega a

$$x = \exp \left[-\frac{KaV}{G_T} x + \ln(x_c - x^*) \right] + x^* \quad (3-56)$$

reordenando

$$x = \exp \left[-\frac{KaV}{G_T} x \right] \exp (\ln (x_c - x^*)) + x^* \quad (3-57)$$

entonces

$$\alpha = \exp \left[-\frac{KaV}{G\tau} x \right] (\alpha x - \alpha^*) + \alpha^* \quad (3-58)$$

Esta expresión proporciona el valor de la entalpía del aire en cualquier posición x del plano de entrada del agua ($y = 0$ y $t = t_x$). Para cualquier otro valor de la variable y , la ecuación (3-58) no puede usarse, puesto que la temperatura del agua será entonces una función tanto de la x como de la y , y no sólo de la primera.

En el plano de ingreso del aire ($x = 0$), la entalpía de este elemento es constante para cualquier valor de la y , y se representa por el símbolo αx . Así, la expresión (3-44) puede escribirse

$$\text{CAL } \frac{dt}{dy} = \frac{KaV}{L\tau} (\alpha x - \alpha^*) \quad (3-59)$$

sin embargo, no es posible integrar esta ecuación analíticamente, ya que la α^* es una función complicada de la temperatura (igualdad (1-18)).

Algunos investigadores [7,18] han propuesto métodos para la solución de las ecuaciones (3-43) y (3-44) con el fin de obtener los valores de la t y la α en cualquier punto (x, y) . Inazume y Kageyama [7] sugieren un procedimiento fundamentado en la técnica de las diferencias finitas. El desarrollo que aquí se presenta está basado en el trabajo de estos autores.

De las expresiones (3-43) y (3-44) se tiene que

$$(\mathcal{X}^* - \mathcal{X}) = \left(\frac{\partial \mathcal{X}}{\partial x} \right)_y \frac{G_T}{KaV} \quad (3-60)$$

$$(\mathcal{X}^* - \mathcal{X}) = - \left(\frac{\partial tL}{\partial y} \right)_x \frac{CAL \cdot LT}{KaV} \quad (3-61)$$

por lo cual

$$\left(\frac{\partial \mathcal{X}}{\partial x} \right)_y \frac{G_T}{KaV} = - \left(\frac{\partial tL}{\partial y} \right)_x \frac{CAL \cdot LT}{KaV} \quad (3-62)$$

entonces

$$\left(\frac{\partial \mathcal{X}}{\partial x} \right)_y G_T = - \left(\frac{\partial tL}{\partial y} \right)_x CAL \cdot LT \quad (3-63)$$

Ahora bien, si las ecuaciones (3-43) y (3-44) se escriben empleando las aproximaciones de las diferencias finitas se tiene que

$$\left[\frac{\Delta \mathcal{X}}{\Delta x} \right]_y = \frac{KaV}{G_T} (\mathcal{X}^* - \mathcal{X}) \quad (3-64)$$

$$\left[\frac{\Delta t}{\Delta y} \right]_x = \frac{KaV}{LTCAL} (x^* - x^0) \quad (3-65)$$

donde los incrementos Δx y Δy se calculan con las relaciones siguientes:

$$\Delta x = \frac{1}{N}, \quad N = \text{intervalos en el eje X} \quad (3-66)$$

$$\Delta y = \frac{1}{M}, \quad M = \text{intervalos en el eje Y} \quad (3-67)$$

De la igualdad (3-64) se despeja el incremento Δx

$$\Delta x = \frac{KaV}{G\tau} (x^* - x^0) \Delta x \quad (3-68)$$

según la ecuación (3-43), la expresión (3-68) puede escribirse

$$\Delta x = \left[\frac{\partial x}{\partial x} \right]_y \Delta x \quad (3-69)$$

Por la relación (3-65) se conoce que

$$\Delta t = \frac{K\alpha V}{C_{ALLT}} (\alpha - \alpha^m) \Delta y \quad (3-70)$$

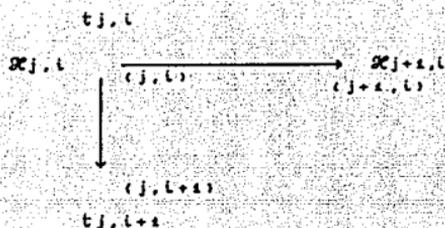
Por la expresión (3-44) se sabe que el incremento Δt también puede definirse de la siguiente manera:

$$\Delta t = \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_x \Delta y \quad (3-71)$$

de la ecuación (3-63) se tiene que

$$\left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_x = - \frac{G_T}{C_{ALLT}} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} \right)_y \quad (3-72)$$

Al introducir esta igualdad en la ecuación (3-71) el resultado es



A PARTIR DEL VALOR DE LA $(\partial \mathcal{L} / \partial x)$ Y EN EL PUNTO (j, l) ASÍ COMO DE LOS CORRESPONDIENTES A LAS $t_{j,l}$ Y $x_{j,l}$ SE CALCULAN LAS MAGNITUDES DE LAS $x_{j+1,l}$ Y $t_{j,l+1}$.

Fig. 3-4. Cálculo de las $x_{j+1,l}$ y $t_{j,l+1}$.

$$\Delta t = - \frac{G_T}{C^2 \Delta L T} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} \right)_y \Delta y \quad (3-73)$$

Si la j indica la coordenada del punto (ver figura 3-3) en el eje X y la l señala su posición en el eje Y , las ecuaciones (3-69) y (3-73) se escriben

$$x_{j+1,i} = x_{j,i} + \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y \Delta y \quad (3-74)$$

$$t_{j,i+1} = t_{j,i} - \frac{Gr}{C_{ALLT}} \left(\frac{\partial x}{\partial x} \right)_y \Delta y \quad (3-75)$$

donde la $(\partial x / \partial x)_y$ está evaluada en las coordenadas (j, i) (ver figura 3-4).

Con estas dos últimas ecuaciones, se pueden calcular los valores de la t y la x en cualquier punto (x, y) , siguiendo los pasos que se ennumeran a continuación:

1. Seleccione usted el número de intervalos en el eje X y en el eje Y: N y M.
2. Calcule las magnitudes de los incrementos Δx y Δy con las ecuaciones (3-66) y (3-67).
3. Asigne a los puntos de las fronteras los valores conocidos de la temperatura del agua y la entalpía del aire:

$$x_{0,i} = x_c \quad i = 0 \dots M$$

$$t_{j,0} = t_c \quad j = 0 \dots N$$

4. Con la ecuación (3-58) compute los valores de la entalpía del aire en el plano de entrada del agua.

$$x_{j,0} = \exp \left[-\frac{KaV}{G_T} x \right] (x_c - x^*) + x^*$$

$$j = 1 \dots N; \quad x = j\Delta x.$$

5. Calcule el perfil de la temperatura del agua en el plano μ , usando la ecuación (3-75)

$$t_{j,i} = t_{j,0} - \frac{G_T}{CaLl_T} \left[\frac{\partial x}{\partial x} \right]_y \Delta y$$

para lo cual la $(\partial x / \partial x)_y$ se evaluará con la expresión (3-43) en las coordenadas $(j,0)$; desde $j = 0$ hasta $j = N$.

6. Calcule la $(\partial x / \partial x)_y$ en los puntos (j,i) y a partir de las relaciones (3-74) y (3-75) compute las $x_{j+1,i}$ y $t_{j+1,i}$, para

$$j = 0 \dots N-1$$

$$e \quad i = 1 \dots M-1$$

7. Evalúe la $(\partial x / \partial x)_y$ en las coordenadas (N,i) y usando la ecuación (3-75) obtenga las $t_{N,i+1}$ desde $i = 1$ hasta $i = M-1$.

8. Calcule la $(\partial \bar{h} / \partial x)$ en los puntos (j, M) y mediante la expresión (3-74) compute las $\bar{h}_{j+1, L}$, desde $j = 1$ hasta $j = N-1$.

9. La temperatura promedio del agua que sale de la torre se determina con la ecuación

$$t_{\pi} = \left[\sum_{j=0}^N t_{j, M} \right] \Delta x \quad (3-76)$$

10. La entalpía promedio del aire que abandona la torre se calcula con la expresión

$$\bar{h}_{\pi} = \left[\sum_{l=0}^M \bar{h}_{N, l} \right] \Delta y \quad (3-77)$$

EJEMPLO 3-1: Calcule los valores promedio de la temperatura del agua y la entalpía del aire a la salida de una torre que opera con flujo cruzado y en las condiciones siguientes:

$$P = 101325 \text{ Pa.}$$

$$t_{\pi} = 316.5 \text{ K.}$$

$$\bar{h}_{\pi} = 102344 \text{ J/kg.}$$

$$L_T/G_T = 1.9375.$$

Unos estudios previos han demostrado que, en

estas circunstancias, el factor KaV/Lr es igual a 1.2.

SOLUCIÓN:

1. Se selecciona el número de intervalos en el eje X y en el eje Y:

$$N = 20,$$

$$M = 20.$$

2. Se calculan los valores de los incrementos Δx y Δy :

$$\Delta x = \frac{1}{20} = 0.05$$

$$\Delta y = \frac{1}{20} = 0.05$$

3. Se asignan los valores conocidos de la temperatura y la entalpía a los puntos de las fronteras:

$$x_{0,i} = 101344 \text{ J/kg}, \quad i = 0 \dots M$$

$$t_{j,0} = 316.5 \text{ K}, \quad j = 0 \dots N$$

4. Con la ecuación (3-58), se computan los valores de la entalpía del aire en el plano de entrada del agua, para lo cual es necesario calcular primero el grupo KaV/Gr (expresión 3-45):

$$\frac{KaV}{G_T} = \left(\frac{KaV}{L_T} \right) \left(\frac{L_T}{G_T} \right) = (1.2)(1.9375) = 2.325$$

y con la igualdad (1-18) se encuentra el valor de la α^* a la temperatura del agua de entrada (316.5 K):

$$\alpha^* = 215604 \text{ J/kg.}$$

Los valores de las variables KaV/G_T y α^* se sustituyen en la expresión (3-58) y se procede al cálculo de las $\alpha_{j,0}$, desde $j = 1$ hasta $j = N$:

$$j = 1; \alpha = j\Delta\alpha = (1)(0.05) = 0.05$$

$$\begin{aligned} \alpha_{1,0} &= \left[e^{[-(2.325)(0.05)]} \right] \left[102344 - 215604 \right] + 215604 \\ &= 114773.92986 \text{ J/kg.} \end{aligned}$$

$$j = 2, \alpha = j\Delta\alpha = (2)(0.05) = 0.1$$

$$\begin{aligned} \alpha_{2,0} &= \left[e^{[-(2.325)(0.1)]} \right] \left[102344 - 215604 \right] + 215604 \\ &= 125839.70764 \text{ J/kg.} \end{aligned}$$

se continúa de la misma manera hasta que la j sea igual a la N .

5. Se calcula el perfil de la temperatura del agua en el plano μ , usando la ecuación (3-75). Primero debe evaluarse la derivada parcial de la entalpía del aire con respecto a la variable α usando la igualdad

(3-43) — en las coordenadas (j,0).

j = 0:

$t_{0,0} = 316.5$ K, la entalpia de equilibrio calculada con esta temperatura es: $x_{0,0}^* = 215604$ J/kg, y $x_{0,0} = 102344$ J/kg; por lo tanto

$$\left(\frac{\partial x}{\partial x}\right)_y = (2.325)(215604 - 102344) = 263330$$

$$\begin{aligned}t_{0,1} &= 316.5 - (1.2327E-04)(263330)(0.05) \\ &= 314.87 \text{ K}\end{aligned}$$

j = 1:

$t_{1,0} = 316.5$ K, $x_{1,0}^* = 215604$ J/kg, $x_{1,0} = 114773.92$ J/kg; entonces

$$\left(\frac{\partial x}{\partial x}\right)_y = (2.325)(215604 - 114773.92) = 234430$$

$$\begin{aligned}t_{1,1} &= 316.15 - (1.2327E-04)(234430)(0.05) \\ &= 315.05 \text{ K}\end{aligned}$$

y así sucesivamente hasta que se cumpla la igualdad $j = N$.

6. Se calcula la $(\partial x / \partial x)_y$ en los puntos (j,i) para computar las $x_{j+1,i}$ y $t_{j,i+1}$, desde $j = 0$ hasta $j = N-1$ y desde $i = 1$ hasta $i = M-1$:

$j = 0, i = 1:$

$t_{0,1} = 314.8769 \text{ K}, \quad \rho_{0,1}^* = 200119.6031 \text{ J/kg}, \quad \rho_{0,1} = 102344 \text{ J/kg}.$ De este modo, se tiene que

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_y = (2.325) (200119.6 - 102344) = 227328.3$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (3-74) se consiguen los valores de la $\rho_{1,1}$ y la $t_{0,2}$:

$$\begin{aligned} \rho_{1,1} &= 102344 + (227328.3) (0.05) \\ &= 113710.36 \text{ J/kg.} \end{aligned}$$

y de la misma manera

$$\begin{aligned} t_{0,2} &= 314.87 - (1.2327\text{E-}04) (227328.3) (0.05) \\ &= 313.47 \text{ K.} \end{aligned}$$

$j = 1, i = 1$

$t_{1,1} = 315.05 \text{ K}, \quad \rho_{1,1}^* = 201758.88 \text{ J/kg}, \quad \rho_{1,1} = 113710.36 \text{ J/kg};$ por lo tanto

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_y = (2.325) (201758.8 - 113710.36) = 204712.8 \text{ J/kg}$$

Así

$$\alpha_{z,1} = 113710.36 + 204712.8(0.05) = 123945.95 \text{ J/kg}$$

y

$$t_{1,2} = 315.05 - (1.2327E-4)(204712.8)(0.05) = 313.7932 \text{ K}$$

Se prosigue de la misma manera hasta que la j sea igual a la N , entonces se incrementa la magnitud de la i y la j vuelve a valer cero:

$$j = 0, i = 2:$$

$$t_{0,2} = 313.4757 \text{ K}, \alpha_{o,2}^* = 187709.85 \text{ J/kg}, \alpha_{o,2} = 102344 \text{ J/kg. Entonces}$$

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_y = (2.325)(187712.5 - 102344) = 198481.8$$

$$\alpha_{1,2} = 102344 + (198481.8)(0.05) = 112268.04 \text{ J/kg}$$

y

$$t_{0,3} = 313.47 - (1.2327E-4)(198481.8)(0.05) = 312.25 \text{ K}$$

$$j = 1, i = 2:$$

$$t_{1,3} = 313.79 \text{ K}, \alpha_{1,3}^* = 190449.7 \text{ J/kg}, \alpha_{1,3} = 112268.04 \text{ J/kg. De esta manera}$$

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_y = (2.325)(190449.7 - 112268) = 181772.4$$

$$\alpha_{2,2} = 112268 + (181772.4)(0.05) = 121356.6 \text{ J/kg}$$

y

$$t_{1,1} = 313.79 - (1.2327E-4)(181772.4)(0.05) = 312.67 \text{ K}$$

Se continúa de la misma manera hasta que la i sea igual a la M .

7. Se evalúa la $(\partial \rho / \partial x)_y$ en las coordenadas (i, N) y con este dato se obtienen las $t_{N,i+1}$, desde $i = 1$ hasta $i = M-1$:

$$i = 1:$$

$$t_{20,1} = 314.34 \text{ K}; \quad \rho_{20,1}^* = 214034.23 \text{ J/kg}; \quad \rho_{20,1} = 202257.8 \text{ J/kg.}$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_y = (2.325)(214034.2 - 202257.8) = 27380$$

$$t_{20,2} = 316.34 - (1.2327E-4)(27380)(0.05) = 316.17$$

$$i = 2:$$

$$t_{20,2} = 316.17 \text{ K}; \quad \rho_{20,2}^* = 212378.7 \text{ J/kg}; \quad \rho_{20,2} = 198726.56 \text{ J/kg.}$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_y = (2.325)(212378.7 - 198726.5) = 31741.2$$

$$t_{20,3} = 316.17 - (1.2327E-4)(31741.2)(0.05) = 315.97$$

se repite el cálculo hasta que la i sea igual a la M .

8. Se calcula la $(\partial \rho / \partial x)_y$ en los puntos (j, M) y con este valor se computan las $\rho_{j+1,i}$ desde $j = 1$ hasta

$$j = N-1.$$

$$j = 1:$$

$$t_{1,20} = 303.68 \text{ K}; \quad \dot{Q}_{1,20}^* = 120740 \text{ J/kg}; \quad \dot{Q}_{1,20} = 104140.3 \text{ J/kg}.$$

$$\left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial x} \right)_y = (2.325) (120740 - 104140.3) = 38594.28$$

$$\dot{Q}_{2,20} = 104140.3 + 38594.28(0.05) = 106071.67$$

$$j = 2:$$

$$t_{2,20} = 304.2 \text{ K}; \quad \dot{Q}_{2,20}^* = 123680.9 \text{ J/kg}; \quad \dot{Q}_{2,20} = 106071.6 \text{ J/kg}.$$

$$\left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial x} \right)_y = (2.325) (123680.9 - 106071.6) = 40941.5$$

$$\dot{Q}_{3,20} = 106071.6 + 40941.5(0.05) = 108118.7$$

y así sucesivamente, hasta que la j valga lo mismo que la N .

9. Se calcula la temperatura promedio del agua de salida:

$$t_{\pi} = t_s = (6152.11)(0.05) = 307.605 \text{ K}$$

10. Se calcula la entalpía promedio del aire que abandona la torre:

$$H_{\pi} = H_s = (3486990)(0.05) = 174349.5 \text{ J/kg}$$

j	0				1			
	t	α^*	α	δ	t	α^*	α	δ
0	1	1	2	4	1	1	3	6
1	5	5	2	12	7	7	13	14
2	13	13	2	18	15	15	19	20
3	19	19	2	28	21	21	29	30

2				3			
t	α^*	α	δ	t	α^*	α	δ
1	1	3	8	1	1	3	10
9	9	15	16	11	11	17	24
17	17	21	22	25	25	23	26
23	23	31	32	27		33	

$$N = M = 3$$

Fig. 3-5. Tabla para cálculos de las $\alpha_{j,t}$ y las $t_{j,t}$.

Para llevar un buen control sobre los datos que se van calculando, es conveniente ordenarlos en una tabla como la que aparece en la figura 3-5. En ella, los números que aparecen en los casilleros indican el orden en que deben llenarse, de acuerdo con los pasos sugeridos con anterioridad.

En las siguientes páginas se presenta una tabla con los valores de las $t_{j,t}$ y las $\alpha_{j,t}$ en todos los puntos (x,y) de la torre del ejemplo 3-1.

	T	00	H	T	01	H
00J	316.5		102344	316.5		114773.92986
01J	314.87690627		102344	315.05503653		113710.36487
02J	313.47571421		102344	313.79324094		112268.04854
03J	312.25232414		102344	312.67283913		111086.8199
04J	311.17455038		102344	311.67127472		110102.46369
05J	310.21812343		102344	310.77088667		109270.50198
06J	309.36425681		102344	309.95757947		108559.07418
07J	308.59809166		102344	309.21991787		107944.71415
08J	307.90766194		102344	308.54849312		107409.72891
09J	307.28318268		102344	307.93546838		106940.50867
10J	306.71654669		102344	307.3742455		106526.40169
11J	306.20095986		102344	306.85921624		106158.9443
12J	305.73067145		102344	306.38557342		105831.32111
13J	305.30077089		102344	305.94916528		105537.97856
14J	304.90703222		102344	305.54638176		105274.34306
15J	304.54579329		102344	305.17406467		105036.61201
16J	304.21386074		102344	304.82943575		104821.59642
17J	303.90843429		102344	304.51003872		104626.60085
18J	303.62704598		102344	304.21369202		104449.33074
19J	303.3675107		102344	303.93844992		104287.81996
20J	303.12788571		102344	303.68257044		104140.37365

T 02 H T 03 H

001	316.5	125839.70764	316.5	135691.04543
011	315.21361747	123945.95609	315.35479457	133162.7255
021	314.07741744	121356.66399	314.33176463	129677.75399
031	313.05163256	119211.43526	313.39291461	126757.21577
041	312.1214242	117406.34401	312.52951492	124275.87046
051	311.27458125	115867.98901	311.73380035	122143.51941
061	310.50096335	114542.92978	310.99893452	120293.39783
071	309.79207267	113391.2613	310.3189206	118674.93989
081	309.1407256	112382.53963	309.68849708	117249.09269
091	308.5407998	111493.10663	309.10304932	115985.18154
101	307.98703791	110704.28037	308.55850096	114858.75475
111	307.47489383	110001.09934	308.05125688	113850.06608
121	307.0004113	109371.43128	307.57812715	112942.98385
131	306.56012708	108805.32822	307.13627299	112124.19218
141	306.15099312	108294.55142	306.72315926	111382.59658
151	305.77031342	107832.21596	306.33651431	110708.87494
161	305.41569242	107412.52112	305.97429586	110095.13402
171	305.08499251	107030.54311	305.63466209	109534.64334
181	304.7762988	106682.07399	305.31594699	109021.6268
191	304.48788972	106363.49509	305.0166393	108551.09795
201	304.21821232	106071.67651	304.73536447	108118.72836

	T	04	H	T	05	H
00J	316.5		144461.22484	316.5		152268.90014
01J	315.48047785		141461.46763	315.59236772		148932.96877
02J	314.55942629		137293.63487	314.76321076		144261.57421
03J	313.70045147		133761.04938	313.97761614		140257.59607
04J	312.89958772		130730.64736	313.23526528		136789.74225
05J	312.15265097		128104.69589	312.53481526		133759.64308
06J	311.45553565		125809.61977	311.87438958		131091.94331
07J	310.80435562		123788.87197	311.25186528		128727.83619
08J	310.19550332		121998.21724	310.66504128		126620.69557
09J	309.62566591		120402.51694	310.11173612		124733.04013
10J	309.09181936		118973.4807	309.58984326		123034.37248
11J	308.5912117		117688.05898	309.09736043		121499.6093
12J	308.12134168		116527.27168	308.63240346		120107.92018
13J	307.67993616		115475.33972	308.19321052		118841.85534
14J	307.26492793		114519.03142	307.77814079		117686.68099
15J	306.87443498		113647.16387	307.38566984		116629.86658
16J	306.5067414		112850.21772	307.01438328		115660.68467
17J	306.16028024		112120.03632	306.66296965		114769.89546
18J	305.83361805		111449.58828	306.33021296		113949.49564
19J	305.52544122		110832.77834	306.01498545		113192.51682
20J	305.23454375		110264.29536	305.71624056		112492.8623

	T	06	H	T	07	H
00J	316.5		159219.70363	316.5		165407.67473
01J	315.69197797		155659.02782	315.78065626		161713.36553
02J	314.94562767		150634.2589	315.1089205		156460.20226
03J	314.22743274		146279.49055	314.45261528		151857.50516
04J	313.53980131		142471.74025	313.81612306		147794.77334
05J	312.8836028		139116.96666	313.20199534		144185.69985
06J	312.25875319		136141.81376	312.61156308		140961.66421
07J	311.66458467		133488.1085	312.04534203		138067.31157
08J	311.10008203		131109.06546	311.50330526		135457.43943
09J	310.56403492		128966.59591	310.98506818		133094.74396
10J	310.05513622		127029.35626	310.49001513		130948.15214
11J	309.57204548		125271.30537	310.01738635		128991.56503
12J	309.11342935		123670.62034	309.56633792		127202.89636
13J	308.67798696		122208.86987	309.13598299		125563.32732
14J	308.2644652		120870.37596	308.72542008		124056.72228
15J	307.8716674		119641.71529	308.33375228		122669.16598
16J	307.4984575		118511.32572	307.96010009		121388.59355
17J	307.14376144		117469.19274	307.60360982		120204.49225
18J	306.80656657		116506.59755	307.26345877		119107.65917
19J	306.48591992		115615.91296	306.9388583		118090.003
20J	306.18092572		114790.43688	306.62905523		117144.38076

	T	08	H	T	09	H
00J	316.5		170916.53229	316.5		175820.80724
01J	315.85960235		167162.43568	315.9298843		172066.15033
02J	315.25509544		161784.10101	315.38594696		166647.15077
03J	314.65560152		157020.68225	314.83858288		161796.44335
04J	314.06686813		152776.53138	314.29441642		157434.26053
05J	313.49268516		148975.24208	313.75810809		153495.29336
06J	312.93547448		145554.80688	313.23289444		149925.3274
07J	312.39669725		142464.2732	312.72097452		146678.89409
08J	311.87713858		139661.33975	312.22378913		143717.54795
09J	311.3771083		137110.5772	311.74222407		141008.55884
10J	310.89658343		134782.08136	311.27675905		138523.89536
11J	310.43531018		132650.43608	310.82757729		136239.42093
12J	309.99287699		130693.90325	310.3946466		134134.24992
13J	309.56876722		128893.78283	309.97777952		132190.22672
14J	309.1623971		127233.9021	309.57667809		130391.50102
15J	308.77314315		125700.20451	309.19096731		128724.17881
16J	308.4003618		124280.41593	308.82021998		127176.03425
17J	308.04340358		122963.77201	308.46397541		125736.27004
18J	307.70162305		121740.79384	308.12175321		124395.31754
19J	307.37438584		120603.10229	307.79306365		123144.66889
20J	307.06107345		119543.2635	307.47741524		121976.73568

T 10 H T 11 H

001	316.5	180186.85092	316.5	184073.7328
011	315.992453	176478.52922	316.04815495	180448.2821
021	315.50308052	171087.3272	315.60793274	175139.63849
031	315.00353062	166210.68082	315.15221908	170287.83659
041	314.50091801	161784.75345	314.6883175	165844.33463
051	314.00047192	157755.78709	314.22178104	161766.8236
061	313.50601018	154077.98339	313.75681347	158018.10802
071	313.02029013	150712.02472	313.29657607	154565.35107
081	312.54527017	147623.96761	312.84342373	151379.49924
091	312.08230587	144784.37618	312.39908692	148434.80889
101	311.63229768	142167.62407	311.96481249	145708.44075
111	311.19580244	139751.32222	311.5414727	143180.1064
121	310.77311803	137515.84446	311.12964979	140831.75824
131	310.36434776	135443.9314	310.72970181	138647.3173
141	309.9694494	133520.35799	310.34181383	136612.4346
151	309.58827272	131731.65331	309.96603792	134714.28222
161	309.22058825	130065.86351	309.6023244	132941.37066
171	308.86610923	128512.35086	309.25054627	131283.38944
181	308.52450862	127061.62261	308.91051839	129731.06792
191	308.19543194	125705.18506	308.58201251	128276.05398
201	307.8785073	124435.41864	308.26476899	126910.80806

T 12 H T 13 H

00J	316.5	187534.03962	316.5	190614.58688
01J	316.09774375	184019.33163	316.14189032	187231.28343
02J	315.70178943	178836.3535	315.78580152	182207.20939
03J	315.28624615	174050.97146	315.40705146	177521.82741
04J	314.85837534	169628.84336	315.01268664	173153.61637
05J	314.42385788	165538.60571	314.60836152	169081.37778
06J	313.98712159	161751.51923	314.19859553	165284.43497
07J	313.55160033	158241.28889	313.78698428	161742.88619
08J	313.11993987	154983.92612	313.37637309	158437.8102
09J	312.69416127	151957.61047	312.96899917	155351.40101
10J	312.27579072	149142.54142	312.56660774	152467.0368
11J	311.86596255	146520.78294	312.17054657	149769.29692
12J	311.46550101	144076.10623	311.78184275	147243.94125
13J	311.07498519	141793.83549	311.40126492	144877.86429
14J	310.69480061	139660.7006	311.0293737	142659.03363
15J	310.3251802	137664.69906	310.66656251	140576.41983
16J	309.96623695	135794.96847	310.31309053	138619.92273
17J	309.61798986	134041.67004	309.96910953	136780.29774
18J	309.2803847	132395.88302	309.63468545	135049.08426
19J	308.95331052	130849.5096	309.30981596	133418.53758
20J	308.63661282	129395.18966	308.99444467	131881.56522

T 14 H T 15 H

001	316.5	193357.05219	316.5	195798.53914
011	316.18119191	190119.84904	316.21618026	192717.2268
021	315.86099938	185279.60147	315.92830552	188078.75772
031	315.51593255	180720.88522	315.61405928	183667.41852
041	315.15269777	176433.47145	315.27972101	179482.6931
051	314.77680406	172405.36877	314.93056497	175520.73999
061	314.39275573	168623.39454	314.57099584	171775.18619
071	314.00421766	165073.73337	314.20467161	168237.88075
081	313.61415644	161742.3969	313.83461367	164899.52832
091	313.22496011	158615.57011	313.46330409	161750.18887
101	312.83853904	155679.85529	313.09277047	158779.6555
111	312.45641024	152922.43317	312.72465913	155977.73042
121	312.07976755	150331.16004	312.36029756	153334.41973
131	311.7095398	147894.61792	312.0007475	150840.06555
141	311.34643886	145602.13087	311.64684956	148485.43088
151	310.99099918	143443.75798	311.29926087	146261.74939
161	310.64361044	141410.27079	310.95848645	144160.74984
171	310.30454431	139493.1208	310.6249055	142174.66231
181	309.97397647	137684.40121	310.29879333	140296.21183
191	309.65200473	135976.80587	309.98033953	138518.60344
201	309.33866387	134363.58731	309.66966324	136835.50183

	T	16	H	T	17	H
00J	316.5		197972.07934	316.5		199907.07921
01J	316.24732873		195052.44513	316.27505874		197151.67197
02J	315.98854591		190627.89963	316.04246017		192948.39112
03J	315.70248662		186379.54546	315.78216617		188874.27876
04J	315.39494762		182315.02076	315.49945945		184943.64009
05J	315.07090378		178437.53781	315.1989713		181165.65144
06J	314.73459475		174746.78083	314.88472722		177545.27186
07J	314.38960992		171239.76301	314.56019895		174084.13015
08J	314.0389697		167911.56382	314.22835978		170781.30757
09J	313.68520118		164755.92978	313.89173994		167633.99381
10J	313.33040697		161765.74711	313.55248014		164638.01916
11J	312.97632676		158933.40409	313.21238138		161788.27658
12J	312.6243915		156251.06291	312.87295054		159079.05047
13J	312.27577048		153710.85907	312.5354412		156504.26853
14J	311.93141208		151305.04428	312.20088984		154057.69192
15J	311.59207862		149026.08593	311.87014744		151733.05643
16J	311.25837601		146866.73343	311.54390707		149524.1752
17J	310.93077908		144820.05983	311.22272764		147425.01183
18J	310.60965283		142879.48514	310.90705433		145429.73053
19J	310.29527056		141038.78621	310.59723614		143532.729
20J	309.98782902		139292.09701	310.2935408		141728.65815

	T	18	H	T	19	H
00J	316.5		201629.71795	316.5		203163.30161
01J	316.29974545		199038.49407	316.32172286		200734.16885
02J	316.09071063		195059.87655	316.13389036		196980.40896
03J	315.85395641		191167.57448	315.91863192		193274.37978
04J	315.59423936		187381.17743	315.68018047		189639.69752
05J	315.31581961		183714.77588	315.42241098		186094.37975
06J	315.02247323		180177.8208	315.14882632		182651.60856
07J	314.7175163		176775.98466	314.86255844		179320.5245
08J	314.40383738		173511.94239	314.56638126		176106.96939
09J	314.08393464		170386.04387	314.26273156		173014.14409
10J	313.7599548		167396.8748	313.95373458		170043.17179
11J	313.43373174		164541.71414	313.64123214		167193.5694
12J	313.10682348		161816.90089	313.32681113		164463.63525
13J	312.7805465		159218.12412	313.01183139		161850.76371
14J	312.45600706		156740.64945	312.69745205		159351.69745
15J	312.13412933		154379.49382	312.3846559		156962.72783
16J	311.81568038		152129.55867	312.07427156		154679.85225
17J	311.50129217		149985.73003	311.7669935		152498.89676
18J	311.19148079		147942.9525	311.46339972		150415.61033
19J	310.88666315		145996.28279	311.16396751		148425.73658
20J	310.5871715		144140.92736	310.86908725		146525.06748

00J	316.5	204528.57851
01J	316.3412883	202257.85196
02J	316.17253051	198726.56933
03J	315.97689159	195208.68002
04J	315.75809458	191730.70428
05J	315.51962586	188313.67804
06J	315.264701	184973.79214
07J	314.99624754	181723.09151
08J	314.71690158	178570.15304
09J	314.42901453	175520.70438
10J	314.13466697	172578.16815
11J	313.83568685	169744.12904
12J	313.53367015	167018.72725
13J	313.23000237	164400.98534
14J	312.92587991	161889.07642
15J	312.62233059	159480.54227
16J	312.32023286	157172.46887
17J	312.02033357	154961.62673
18J	311.72326404	152844.5819
19J	311.42955457	150817.78316
20J	311.13964741	148877.62981

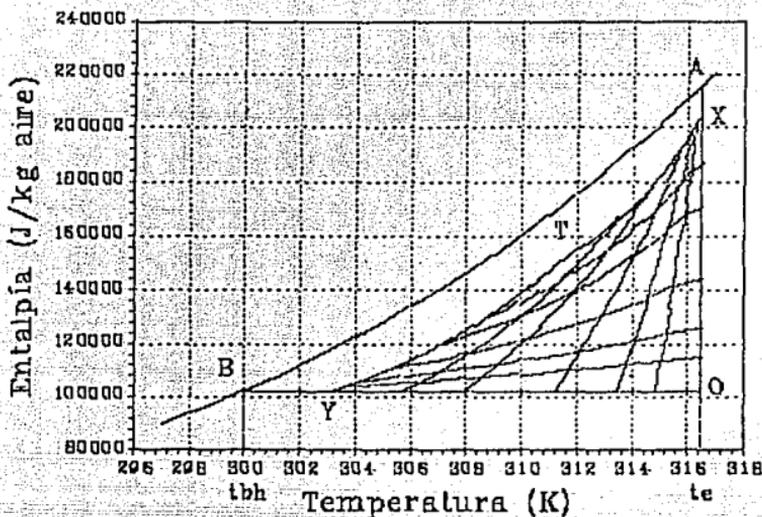


Fig. 3-6. Diagrama de comportamiento.

Los valores de las $x_{j,i}$ y las $t_{j,i}$ —calculados mediante el procedimiento descrito— pueden representarse en una gráfica de entalpía-temperatura que incluya la curva de equilibrio: $x^* = f(t)$ (ecuación (1-18) para obtener el diagrama de comportamiento de la torre.

Según se aprecia en la figura (3-6), no existe una línea de operación como en el caso de las torres que operan con flujo en contracorriente, sino que aparecen varias curvas mostrando las variaciones de la temperatura del agua y la entalpía del aire a través de

la celda.

La parte superior de la torre está representada en la carta por la línea OX, ubicada en la abscisa x_0 . El plano de ingreso del aire está señalado por la recta OY, trazada en la ordenada $0x_0$.

Para cada coordenada en el eje OX existirá una curva trazada con los valores que va teniendo la temperatura del agua, desde que ésta ingresa hasta que sale del equipo. Estas curvas inician en el plano OX y terminan en la curva TY (parte inferior de la torre).

Para cada valor dado de la y habrá una curva que represente los valores de la entalpía del aire, desde la entrada de éste a la torre hasta su salida de la misma. Dichas curvas empiezan en la recta OY y finalizan en la curva TX (plano de salida del aire).

La parte de la masa total de agua que cae a lo largo del plano OY es la que alcanza la menor temperatura, puesto que en cada punto (x_0, y) contacta aire en las condiciones atmosféricas.

De la misma manera, la porción de la masa total de aire que se mueve en el plano OX logra la mayor entalpía, ya que en cada coordenada (x, y_0) se pone en contacto con agua a la temperatura de entrada.

Para valores de la x distintos de la x_0 , el líquido caerá a través de aire cada vez más frío; y para coordenadas de la y diferentes de la y_0 , el gas

transparará agua con temperatura progresivamente mayor.

En una celda de altura infinita, el agua se enfriaría hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada. Las curvas de la temperatura del líquido se extenderían en este caso hasta el punto B, y aparecerían curvas de la entalpía del gas desde el límite DX hasta la curva de equilibrio.

Análogamente, en una celda de anchura infinita, la temperatura de bulbo húmedo del aire se elevaría hasta igualar la temperatura del agua de entrada. Las curvas de la entalpía del gas se prolongarían entonces hasta el punto A; y habría curvas de la temperatura del líquido desde el límite OY hasta la curva de saturación.

3.2 EL COEFICIENTE REQUERIDO Y LAS VARIABLES DE DISEÑO.

Para diseñar una torre de enfriamiento es necesario conocer los valores de las siguientes variables:

- Presión barométrica.
- Temperatura del agua a la entrada de la torre.
- Temperatura del agua a la salida de la torre.
- Temperatura de bulbo húmedo del aire en las condiciones atmosféricas.

■ Flujo de agua.

En las ecuaciones (3-43) y (3-44) participan todas estas variables, pero en lugar del flujo de agua se emplea la relación L_r/G_r .

Mediante las expresiones mencionadas se puede reducir el conjunto de datos a un solo valor numérico: el del grupo adimensional ξ , conocido también como NUT (número de unidades de transferencia), y que es una medida del grado de dificultad del trabajo requerido, ya que una unidad de transferencia corresponde físicamente al tamaño de equipo necesario para que los transportes de masa y energía alcancen el equilibrio.

Entonces, cuando se está diseñando una torre de enfriamiento para unas condiciones de trabajo dadas, el factor ξ se denomina *coeficiente requerido*.

La primera variable de diseño a analizar será la relación de los flujos másicos totales. Existen varios valores de la relación L_r/G_r que concuerdan con el grupo especificado de temperaturas: t_x , t_s y t_{bh} . Esto se aprecia muy claramente en el diagrama de comportamiento de una torre que trabaja con flujo en contracorriente (ver figura 3-7). Lo mismo ocurre cuando la operación se realiza con flujo cruzado, aun cuando el hecho no puede verse tan fácilmente en una gráfica entalpía-temperatura.

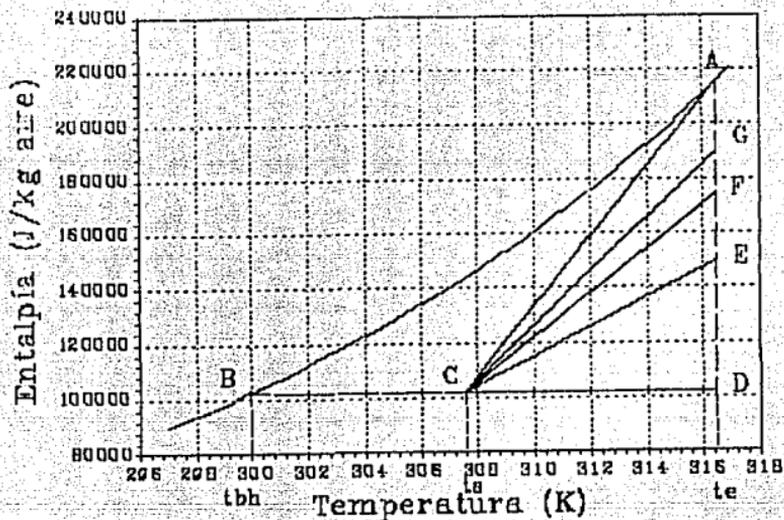


Fig. 3-7. Diagrama de comportamiento de una torre que opera con flujo en contracorriente.

La recta CD de la figura (3-7) representa la situación imaginaria de un flujo de gas infinito y una razón L_t/G_t igual a cero. En este caso, se tiene un potencial de la transferencia máximo y un coeficiente requerido mínimo. A medida que el gasto de aire decrece, la relación L_t/G_t aumenta y lo mismo ocurre con la pendiente de la línea de operación. Esto ocasiona que la fuerza impulsora disminuya y que por lo tanto el valor del grupo ξ se incremente.

La relación L_t/G_t máxima permisible está representada por la línea de operación que intersecta o

se hace tangente a la curva de equilibrio (recta CA). En ese punto, el potencial de la transferencia se nulifica.

En las torres que operan con flujo cruzado (ver figura 3-8), un incremento en el gasto de aire —y la consecuente reducción en el valor de la razón L_t/G_t — ocasiona que disminuya en la distancia OX el área de traslapamiento de las curvas de la entalpía del gas con las curvas de la temperatura del líquido. En el caso hipotético de que la variable L_t/G_t sea igual a cero, sólo aparecerá la recta OY. Por otra parte, la relación L_t/G_t máxima permisible será la misma que en las torres que operan con flujo en contracorriente.

Si la línea de operación de una torre que trabaja con flujo en contracorriente intersecta a la curva de equilibrio, significa que al emplear el mismo valor de la variable L_t/G_t en una torre que funcione con flujo transversal se obtendrá un diagrama de comportamiento como el de la figura (3-8). Según se aprecia, el perfil de la entalpía del aire que circula en el plano OX intersecta a la curva de equilibrio. Los otros perfiles de la entalpía del gas terminan en puntos cercanos a dicha curva.

También puede verse que en un elemento diferencial, el incremento de la entalpía del aire tiende a ser mayor que la disminución de la temperatura del agua. Esto es fácilmente comprobable si se analiza

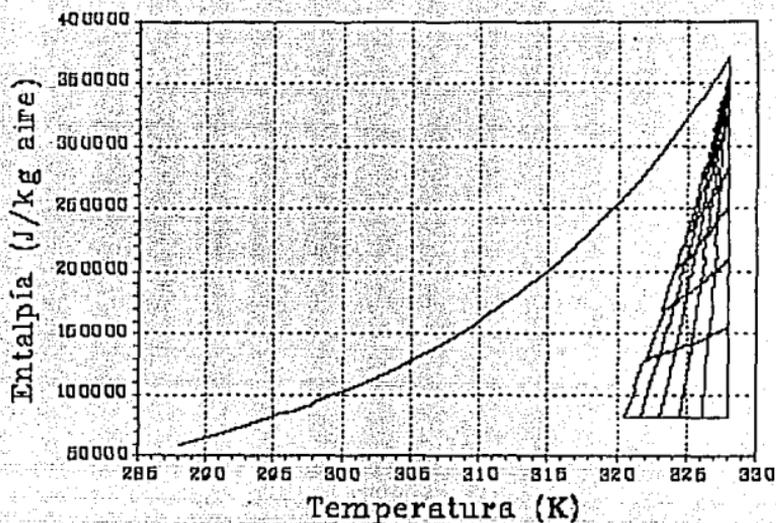


Fig. 3-B. Relación L_t/G_t máxima permisible.
Caso I.

la ecuación (3-63)

$$\left(\frac{\partial R}{\partial x}\right)_y G_T = -\left(\frac{\partial t_L}{\partial y}\right)_x \text{CAL } L_T \quad (3-63)$$

Expresándola empleando las aproximaciones de las diferencias finitas se obtiene

$$\frac{\Delta t}{\Delta y} = - \frac{G_T}{C_{ALLT}} \frac{\Delta x}{\Delta z} \quad (3-78)$$

Si se cumple la igualdad $\Delta x = \Delta y$ resulta que

$$- \frac{L_T C_{AL}}{G_T} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3-79)$$

Entonces, para una región diferencial, la razón entre los incrementos de la entalpía y la temperatura es proporcional a la relación de los flujos si $\Delta x = \Delta y$.

Asimismo, en la figura 3-8, se observa que la masa de agua que cae por el plano de salida del aire se enfría muy poco, y la curva que representa las temperaturas que va teniendo en su paso por la torre se confunde con la curva de la entalpía del gas que circula por la parte más baja del relleno.

Para analizar el caso correspondiente al de una relación L_T/G_T que si se empleara en una torre que trabaja con flujo en contracorriente provocaría que la línea de operación se hiciera tangente a la curva de equilibrio, se tiene la gráfica de desempeño que se muestra en la figura 3-9. Aquí puede notarse que los puntos X y Y se extienden hasta la curva de equilibrio,

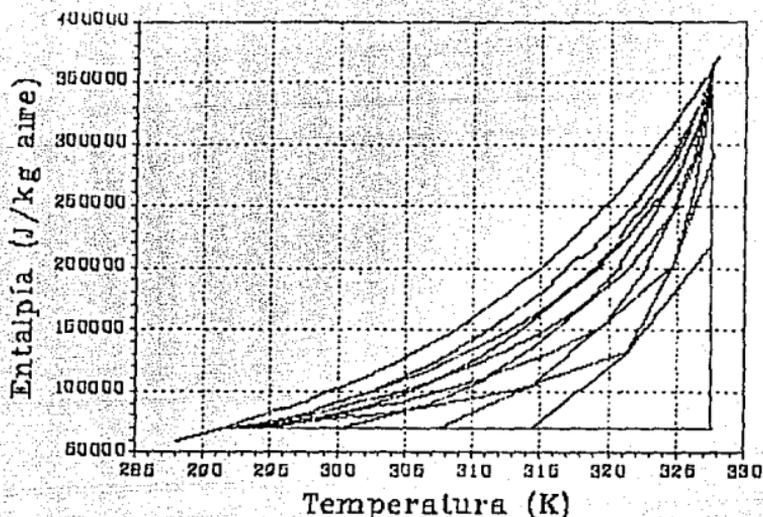


Fig. 3-9. *Relacion Lt/GT máxima permisible.*

Caso II.

y que los perfiles de la entalpia y la temperatura tienden a acercarse hacia la mencionada curva conforme se avanza en las coordenadas x y y .

El aire alcanzará la entalpia de equilibrio a la temperatura del agua de entrada antes de haber atravesado todo el empaque, salvo en las partes bajas de la torre. Esto significa que en su mayor parte el plano Ox —en el cual empiezan los perfiles de la temperatura— toca a la curva de saturación.

De la misma manera, el agua se enfriará hasta la temperatura de bulbo húmedo del aire de ingreso antes

de abandonar el relleno, excepto en las regiones de la torre cercanas al plano de salida del gas. Así, la mayoría de las curvas de la entalpía comienzan en la curva de equilibrio, puesto que una gran parte del plano OY contacta a dicha curva.

En conclusión, el resultado de emplear el gasto de aire mínimo es que en algún punto de la torre, el potencial de la transferencia de entalpía se nulifica, y desde ahí, el resto del empaque ya no tiene ningún objeto. Por esta razón, ha de usarse una relación L_T/G_T menor a la máxima permisible.

Dado que para una torre que trabaja con flujo cruzado no es tan fácil calcular la razón L_T/G_T límite, es conveniente evaluarla para una torre que opere con flujo en contracorriente, recordando que en ambos casos será la misma. De aquí se procederá a seleccionar un valor de la variable L_T/G_T menor al máximo y que sea congruente con el servicio requerido. A partir de la relación L_T/G_T puede calcularse la magnitud de la variable G_T sabiendo cuanta agua se desea enfriar.

Es recomendable hacer una serie de cálculos para obtener una curva que relacione el coeficiente requerido con la razón de los flujos para el grupo de temperaturas especificado (t_x , t_s y t_{bh}); de esta forma, pueden compararse los distintos resultados y se facilita la elección final de la relación L_T/G_T (ver figura

L_T/G_T	ξ

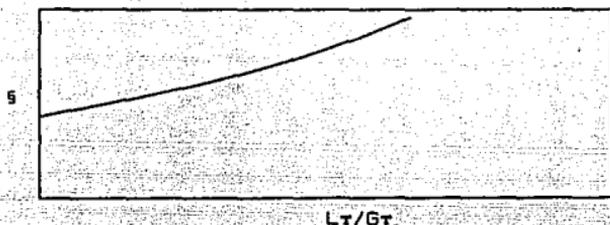


Fig. 3-10. Coeficiente requerido (KaV/L_T o KaV/G_T) vs. L_T/G_T .

3-10).

Las dos siguientes variables de diseño a analizar son la temperatura de bulbo húmedo del aire de enfriamiento y la temperatura a la cual se desea que salga el agua de la torre. Es conveniente recordar que:

$$\text{Aproximación (o acercamiento)} = t_s - t_{bh}.$$

La correcta especificación de la aproximación es de suma importancia en el cálculo de las torres, ya que entre menor sea la diferencia entre las temperaturas

ts y t_{bh}, más difícil de realizar será el trabajo de enfriamiento y mayor el tamaño del equipo necesario.

La explicación para esto es que la fuerza impulsora de la transferencia de entalpia disminuirá considerablemente cuando la temperatura del agua se acerque demasiado a la de bulbo húmedo del aire, lo cual se traduce en un valor alto del coeficiente requerido. Los valores recomendados para la aproximación caen dentro de los límites de 2.8°C a 8°C (5°F a 15°F).

También es muy importante la selección de la temperatura de bulbo húmedo [11]. Debe ser lo suficientemente alta para incluir el 95% de los valores máximos registrados durante los periodos críticos de operación de la torre. No obstante, si se usa un valor muy grande en los cálculos, el resultado será un equipo caro; y si por el contrario, se especifica un valor muy bajo, el desempeño de la torre se verá afectado cuando la temperatura de bulbo húmedo sea mayor que la empleada en el diseño.

La presión barométrica del lugar en el que va a trabajar la torre también debe tenerse en cuenta para los cálculos, puesto que $\psi = f(t, P)$ de acuerdo con la ecuación (1-11). Así, en localidades con una altitud considerable sobre el nivel del mar, el contenido de vapor de agua en la atmósfera será mayor que en sitios con poca elevación, evaluando ambos casos a la misma

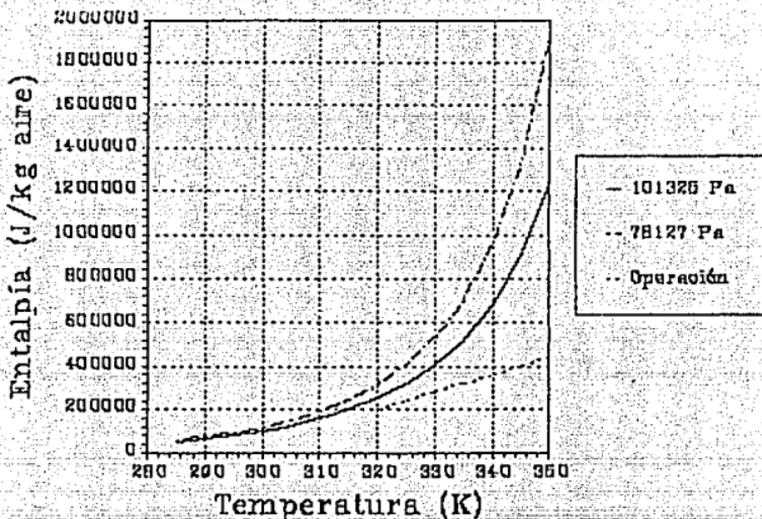


Fig. 3-11. Influencia de la Presión.

temperatura. Por lo tanto, la curva de equilibrio se desplazará hacia arriba (ver figura 3-11) conforme disminuye la presión. De esta forma, para un servicio específico, se requerirán menos unidades de transferencia en lugares altos que en sitios bajos.

3.3. LOS FACTORES DE SEGURIDAD.

En el diseño de las torres de enfriamiento, al igual que en el de otros equipos, se suelen emplear

factores de seguridad para garantizar que el dispositivo cumplirá con el servicio requerido, y para incrementar la flexibilidad en su operación. Sin embargo, si esto no se hace correctamente, puede resultar contraproducente.

Por ejemplo, puede disminuirse la aproximación, ya sea considerando una t_s menor a la requerida o una t_{bh} mayor. Esto tiene un riesgo inherente, y es que la reducción en el acercamiento no varía en forma lineal con el incremento en la dificultad del trabajo a realizar, ni, en consecuencia, con el tamaño y el costo del equipo requerido.

La merma porcentual en la fuerza impulsora del transporte de materia y energía es más grande para una aproximación baja que para una alta. Por ejemplo, una reducción en el acercamiento de 11.1°C a 10.6°C resultará en un incremento del 5% en el costo del equipo, en tanto que disminuir el acercamiento de 2.8°C a 2.2°C se traducirá en un aumento de cerca del 20% [25].

Otra forma de introducir un factor de seguridad es considerar un flujo de agua mayor al que realmente se va a utilizar, ya que el costo y el tamaño del equipo son funciones aproximadamente lineales de esta variable. No obstante, debe tenerse presente que si la masa de agua es apreciablemente menor que la especificada en el diseño, el rendimiento de la torre

disminuirá notoriamente, debido a que la distribución del líquido será pobre y el empaque no se mojará completamente.

También suele incrementarse el rango, aumentando, para los cálculos, el valor de la temperatura del agua a la entrada del equipo. Debido a que a altas temperaturas existe un potencial de la transferencia grande, es fácil para la torre aceptar una carga adicional en esta forma, y aun así, tener un desempeño satisfactorio. En la mayoría de los casos, una elevación considerable en el valor de la t_x implica sólo una pequeña inversión extra.

Según las investigaciones de Willa y Campbell [25], el segundo método de los analizados es el más adecuado para introducir un factor de seguridad, ya que el tamaño del equipo depende en forma aproximadamente lineal del flujo de agua a manejar. Si bien no es el más económico, proporciona la mayor flexibilidad de operación para necesidades futuras.

3.4. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA REGION EMPACADA.

Las dimensiones que debe tener la región empacada para que la torre pueda proporcionar el servicio especificado se calculan con base en el número

requerido de unidades de transferencia (§r).

El coeficiente global del transporte de masa (Ka) depende de los flujos de agua y de aire que se han de manejar, así como del tipo de relleno empleado. Para calcular su valor es necesario disponer de datos experimentales; con los cuales —aplicando el método de los "Mínimos cuadrados" [12,14]— puede encontrarse una ecuación que exprese la magnitud del factor Ka como una función de las masas velocidades del líquido y del gas:

$$K_a = a_0 L^{a_1} G^{a_2} \quad (3-80)$$

Asimismo, para cada tipo de empaque, existen rangos específicos de los valores que deben utilizarse de las variables L y G. El fabricante puede proporcionar esta información.

A partir del grupo §r es posible calcular el volumen del relleno necesario, pues se conocen los flujos máxicos totales de líquido y de gas y el factor Ka se evalúa con la ecuación (3-80), habiendo seleccionado las masas velocidades a emplear.

Dado que

$$L_T = L X Z \quad (3-2)$$

y
$$G_T = G Y Z \quad (3-3)$$

se tiene que

$$XZ = \frac{LT}{L}$$

(3-81)

y

$$YZ = \frac{GT}{G}$$

(3-82)

El volumen total se da por la ecuación

$$V = XYZ$$

(3-83)

entonces, puesto que se conocen los productos XZ y YZ pueden calcularse los valores de las variables X , Y y Z .

$$X = \frac{V}{YZ}$$

(3-84)

$$Y = \frac{V}{XZ}$$

(3-85)

$$Z = \frac{V}{XY}$$

(3-86)

Algunos autores han publicado correlaciones experimentales para calcular el coeficiente de la transferencia de masa. Sin embargo, la mayoría de los trabajos se han hecho empleando torres que operan con flujo en contracorriente, y existen pocos datos para las

se tiene que

$$XZ = \frac{L_T}{L} \quad (3-81)$$

$$y \quad YZ = \frac{G_T}{G} \quad (3-82)$$

El volumen total se da por la ecuación

$$V = XYZ \quad (3-83)$$

entonces, puesto que se conocen los productos XZ y YZ pueden calcularse los valores de las variables X, Y y Z

$$X = \frac{V}{YZ} \quad (3-84)$$

$$Y = \frac{V}{XZ} \quad (3-85)$$

$$Z = \frac{V}{XY} \quad (3-86)$$

Algunos autores han publicado correlaciones experimentales para calcular el coeficiente de la transferencia de masa. Sin embargo, la mayoría de los trabajos se han hecho empleando torres que operan con flujo en contracorriente, y existen pocos datos para las

torres que funcionan con flujo cruzado, como los reportados por Molyneux [15].

Hay otro método para calcular las dimensiones de la zona empacada, y se basa en las longitudes de las unidades de transferencia: LUT_L , correspondiente a la fase líquida, y LUT_G , correspondiente a la fase gaseosa:

$$Y = (NUT_L) (LUT_L) \quad (3-87)$$

$$X = (NUT_G) (LUT_G) \quad (3-88)$$

Introduciendo las ecuaciones (3-2), (3-3) y (3-83) en los grupos adimensionales KaV/L_T y KaV/G_T se obtiene

$$\frac{KaV}{L_T} = \frac{KaY}{L} \quad (3-89)$$

$$\frac{KaV}{G_T} = \frac{KaX}{G} \quad (3-90)$$

Sustituyendo las variables KaV/L_T y KaV/G_T por sus igualdades en las expresiones (3-87) y (3-88) respectivamente, se llega a las relaciones

$$Y = \frac{KaY}{L} LUT_L \quad (3-91)$$

$$X = \frac{KaX}{G} LUT_G \quad (3-92)$$

de las cuales se obtienen las igualdades siguientes:

$$LUT_L = \frac{L}{Ka} \quad (3-93)$$

$$LUT_G = \frac{G}{Ka} \quad (3-94)$$

De nueva cuenta es imprescindible disponer de datos experimentales, puesto que la LUT_G y la LUT_L son funciones de las masas velocidades y de la clase de relleno. Al igual que para el coeficiente Ka , también pueden obtenerse ecuaciones del tipo

$$LUT_L = b_0 L^{b_1} G^{b_2} \quad (3-95)$$

$$LUT_G = c_0 L^{c_1} G^{c_2} \quad (3-96)$$

Así, para calcular las medidas del empaque

con este método, debe conocerse el valor del factor ρ_r . Posteriormente se procederá a evaluar la longitud de la unidad de transferencia (LUTL o LUTo) para las masas y velocidades seleccionadas, y con la ecuación (3-87) se calculará el valor de la variable Y o con la (3-88) se computará la magnitud de la variable X. Por otra parte se tiene que

$$\frac{L_T}{G_T} = \frac{LXZ}{GY} \quad (3-97)$$

por lo cual

$$Y = \frac{G_T}{L_T} \frac{LX}{G} \quad (3-98)$$

$$X = \frac{L_T}{G_T} \frac{GY}{L} \quad (3-99)$$

La profundidad del relleno (Z) puede calcularse con

$$Z = \frac{L_T}{LX} \quad (3-100)$$

o con $Z = \frac{G_T}{GY} \quad (3-101)$

Cualquiera de los dos métodos expuestos

proporcionará las dimensiones del espacio relleno necesario. Si se desea construir una torre de doble flujo, se especificarán dos celdas, cada una con una profundidad igual a $Z/2$.

EJEMPLO 3.2: La empresa Tormex, S.A. ha fabricado un nuevo tipo de empaque, del cual se espera que tenga un rendimiento más alto que los hasta ahora usados. Para probar el nuevo relleno, se equipa con él una torre construida especialmente para hacer experimentos, cuyo mantenimiento se hace periódicamente, de manera que todas las partes del sistema están siempre en perfectas condiciones. Las medidas de la región empacada son las siguientes: $X = 7$ m; $Y = 5$ m; $Z = 16$ m.

Un cliente desea comprar una torre para enfriar 960.28 Ton/h de agua, desde 316.5 K hasta 305.5 K. La temperatura de bulbo húmedo promedio del lugar es de 300 K y la presión barométrica es de 1 atmósfera.

La Empresa decidió vender la torre con el nuevo empaque, por lo cual los ingenieros se pusieron a hacer los experimentos necesarios para asegurarse de la superioridad del relleno y obtener las dimensiones del equipo solicitado. Los resultados que encontraron fueron los que se presentan a continuación:

1. El empaque efectivamente tiene un mayor rendimiento que los que se habían estado usando; y las

masas velocidades del líquido y del gas deben estar dentro de los siguientes rangos:

L: de 8500 a 11000 kg/hm².

G: de 7500 a 10000 kg/hm².

2. Tabla de los datos experimentales obtenidos:

Lt	Gt	Lt/Gt	KaV/Lt
kg/h	kg/h		
1000000	700000	1.428571	0.956606
1010000	705000	1.432624	0.954576
1020000	710000	1.436619	0.952584
1030000	715000	1.440559	0.950630
1040000	720000	1.444444	0.948711
1050000	725000	1.448275	0.946828
1060000	730000	1.452054	0.944980
1070000	735000	1.455782	0.943165
1080000	740000	1.459459	0.941382
1090000	745000	1.463087	0.939631

3. De acuerdo con el servicio especificado por el cliente, se decidió introducir un factor de seguridad incrementando en un 7% el flujo de agua a enfriar; en estas condiciones, el coeficiente requerido (KaV/Lt) tiene un valor de 1.5. Además, se determinó que una relación de los flujos de 1.2 es la que se usará en

el diseño.

Ayude usted a los ingenieros de Tormex realizando las siguientes actividades:

a) Complete la tabla anterior calculando los valores de las masas velocidades de agua y aire (L y G), así como la magnitud del factor K_a , para cada fila.

b) Encuentre los coeficientes de regresión de la ecuación (3-80) a partir de los datos experimentales.

c) Decida los valores de la L y la G que deben usarse en el diseño de la torre que solicitó el cliente.

d) Obtenga las dimensiones de la región empacada de la mencionada torre.

e) Encuentre los valores de las longitudes $LUTL$ y $LUTa$ para cada fila de la tabla de datos.

f) Halle los coeficientes de regresión de la igualdad (3-95).

g) Calcule nuevamente las medidas del empaque a emplear usando el método de la longitud de la unidad de transferencia correspondiente a la fase líquida.

h) Obtenga los coeficientes de regresión de la igualdad (3-96).

i) Compruebe con el método de la longitud de la unidad de transferencia relativa a la fase gaseosa que las dimensiones del relleno son correctas.

SOLUCIÓN:

a) De la ecuación (3-81) se despeja la variable L:

$$L = \frac{Lr}{XZ}$$

donde $XZ = (7 \text{ m})(16 \text{ m}) = 112 \text{ m}^2$.

y de la relación (3-82) se despeja la variable G

$$G = \frac{Gr}{YZ}$$

donde $YZ = (5 \text{ m})(16 \text{ m}) = 80 \text{ m}^2$.

Aplicando estas igualdades es fácil completar la tabla de datos. Por otra parte, el coeficiente K_a se computa a partir del grupo K_aV/Lr , conociendo el volumen del relleno y el flujo másico total de agua. Así, de acuerdo con la expresión (3-83) se tiene que

$$V = XYZ = (5 \text{ m})(7 \text{ m})(16 \text{ m}) = 560 \text{ m}^3$$

En la primera fila, el valor de la variable Lr es de 1000000 kg/h, y el del factor K_aV/Lr es de 1.428571; por lo cual

$$K_a = (1.428571)(1000000)/560 = 0.956606$$

Este cálculo se repite para cada fila,

empleando los valores de la variable Lr correspondientes a cada una de ellas. La tabla queda entonces de la siguiente manera:

L	G	Ka
kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ³
8928.571	8750	1708.226
9017.857	8812.5	1721.647
9107.142	8875	1735.065
9196.428	8937.5	1748.480
9285.714	9000	1761.893
9375	9062.5	1775.304
9464.285	9125	1788.712
9553.571	9187.5	1802.118
9642.857	9250	1815.522
9732.142	9312.5	1828.924

b) Para encontrar los coeficientes de regresión de la ecuación (3-80) se emplea el método de los mínimos cuadrados [12,14], usando como variables independientes el $\ln(L)$ y el $\ln(G)$, y como variable dependiente el $\ln(Ka)$:

$\ln(L)$	$\ln(G)$	$\ln(Ka)$
9.097011	9.076808	7.443211

9.106962	9.083926	7.451036
9.116814	9.090993	7.458800
9.126570	9.098011	7.466502
9.136232	9.104979	7.474144
9.145801	9.111900	7.481727
9.155280	9.118773	7.489251
9.164670	9.125599	7.496718
9.173972	9.132378	7.504128
9.183189	9.139112	7.511483

La regresión lineal con estos datos puede hacerse fácilmente con un programa de hoja electrónica de cálculo. Para encontrar los coeficientes que se presentan en seguida se utilizó el LOTUS 123:

$$a_0' = -1.63865;$$

$$a_1 = 0.25;$$

$$a_2 = 0.75.$$

De esta manera, la ecuación que expresa la magnitud del factor K_a como una función de las variables L y G es

$$\ln(K_a) = -1.63865 + 0.25\ln(L) + 0.75\ln(G)$$

si se despeja la K_a se obtiene

$$K_a = e^{(-1.63865)} L^{0.25} G^{0.75}$$

$$a_0 = e^{a_0'} = e^{(-1.49805)} = 0.194241$$

por lo que

$$K_a = 0.194241 L^{0.25} G^{0.75}$$

c) Para la torre que solicitó el cliente se emplearán las siguientes masas velocidades:

$$L = 9000 \text{ kg/hm}^2$$

$$G = 8000 \text{ kg/hm}^2$$

que se encuentran dentro de los rangos que pueden manejarse con el nuevo tipo de relleno.

d) Cálculo de las dimensiones de la región empacada de la torre que va a venderse:

1. Se calcula el valor del factor K_a para las masas velocidades seleccionadas:

$$K_a = 0.194241 (9000)^{0.25} (8000)^{0.75} = 1600.37 \text{ kg/hm}^3$$

2. Se computa el volumen de la torre a partir del grupo $K_a V/L$:

$$V = (1.5) (1027500) / 1600.37 = 963.057 \text{ m}^3$$

3. Con las ecuaciones (3-81) y (3-82) se

calculan, respectivamente, las superficies XZ y YZ. El valor de la variable G_T se computa con la relación de los flujos L_T/G_T , sabiendo cuanto agua se desea enfriar; así $G_T = 1027500 \text{ kg/h}/1.2 = 856250 \text{ kg/k}$.

$$XZ = \frac{L_T}{L} = \frac{1027500 \text{ kg/h}}{9000 \text{ kg/hm}^2} = 114.16 \text{ m}$$

$$YZ = \frac{G_T}{G} = \frac{856250 \text{ kg/h}}{8000 \text{ kg/hm}^2} = 107.031 \text{ m}$$

4. Con las ecuaciones (3-84), (3-85) y (3-86) se calculan, respectivamente, los valores de la X, Y y Z:

$$X = \frac{V}{YZ} = \frac{963.057}{107.03} = 8.99 \text{ m}$$

$$Y = \frac{V}{XZ} = \frac{963.057}{114.16} = 8.44 \text{ m}$$

$$\text{entonces } XY = (8.99 \text{ m})(8.44 \text{ m}) = 75.9 \text{ m}^2$$

$$Z = \frac{V}{XY} = \frac{963.057}{75.90} = 12.68 \text{ m}$$

e) Para calcular las longitudes de las unidades de transferencia relativas a la fase líquida se usa la ecuación (3-93), y para las correspondientes a la fase gaseosa se emplea la expresión (3-94). Así se encuentran los siguientes valores:

LUT1	LUTg
m	m
5.226806	5.122270
5.237923	5.118644
5.248876	5.115081
5.259668	5.111580
5.270303	5.108140
5.280784	5.104758
5.291115	5.101434
5.301299	5.098165
5.311338	5.094951
5.321237	5.091789

f) Para calcular los coeficientes de regresión de la ecuación (3-95) se usan como variables independientes el $\ln(L)$ y el $\ln(G)$, y como variable dependiente el $\ln(LUTL)$. Para la ecuación (3-96) se emplean las mismas variables independientes y el $\ln(LUTg)$ se utiliza como variable dependiente. Así, se añaden dos columnas más a la tabla:

$\ln(LUT1)$	$\ln(LUTg)$
1.653800	1.633597
1.655925	1.632889
1.658014	1.632193

1.660068	1.631508
1.662087	1.630835
1.664074	1.630173
1.666029	1.629521
1.667951	1.628880
1.669843	1.628250
1.671705	1.627629

Usando nuevamente el LOTUS, se encuentran los siguientes coeficientes para la ecuación (3-95):

$$b_0' = 1.638648, \text{ por lo que } b_0 = e^{(1.638648)} = 5.1482;$$

$$b_1 = 0.75'$$

$$b_2 = -0.75.$$

Al despejar la variable LUTL de la ecuación resultante se obtiene la siguiente igualdad:

$$LUTL = 5.1482L^{0.75}G^{-0.75}$$

g) Con esta ecuación y los valores seleccionados de la L y la G se calcula el valor de la variable LUTL para la torre solicitada:

$$LUTL = 5.1482(9000)^{0.75}(8000)^{-0.75} = 5.6232 \text{ m}$$

Se sabe que la variable NUTL (KaV/Lr) vale 1.5; entonces sustituyendo los datos conocidos en la

ecuación (3-87) se calcula la altura del relleno (Y):

$$Y = (5.62)(1.5) = 8.43 \text{ m}$$

y con la ecuación (3-99) se calcula la magnitud de la X:

$$X = \frac{Lr}{Gr} \frac{GY}{L} = \frac{1027500}{856250} \frac{(8000)(8.43)}{9000} = 8.99 \text{ m.}$$

La profundidad del empaque se computa con la igualdad (3-100):

$$Z = \frac{Lr}{LX} = \frac{1027500}{(9000)(8.99)} = 12.68 \text{ m.}$$

h) Los coeficientes de regresión de la igualdad (3-96) son:

$$co' = 1.638648, \text{ por lo cual } co = 5.1482.$$

$$ci = -0.25;$$

$$ci = 0.25.$$

De esta forma, se tiene la siguiente ecuación:

$$LUTo = 5.1482L^{-0.25}G^{0.25}$$

i) La longitud de la unidad de transferencia relativa a la fase gaseosa para la torre a construir es, en las condiciones estipuladas, la siguiente:

$$LUTo = 5.1482(9000)^{-0.25}(8000)^{0.25} = 4.998$$

El valor de la variable NUTo se calcula con la relación (3-45):

$$NUTo = NUTL(LT/GT) = 1.5(1.2) = 1.8$$

Ahora, con la información disponible, se computa la anchura del relleno empleando la igualdad (3-88):

$$X = (4.99)(1.8) = 8.99 \text{ m}$$

y con la ecuación (3-98) se determina la altura del empaque:

$$Y = \frac{GT}{LT} \frac{LX}{G} = \frac{856250}{1027500} \frac{(9000)(8.99)}{8000} = 8.43 \text{ m}$$

la distancia Z se calcula con la expresión (3-101):

$$Z = \frac{GT}{GY} = \frac{856250}{(8000)(8.43)} = 12.68 \text{ m.}$$

Entonces se construirá la torre con las siguientes medidas del empaque:

$$X = 9 \text{ m.}$$

$$Y = 9 \text{ m.}$$

y como se desea que haya dos celdas, cada una tendrá una profundidad de Z/2, es decir:

$$Z = 6.5 \text{ m en cada bloque de empaque.}$$

L_T/G_T	$K_a V/L_T$

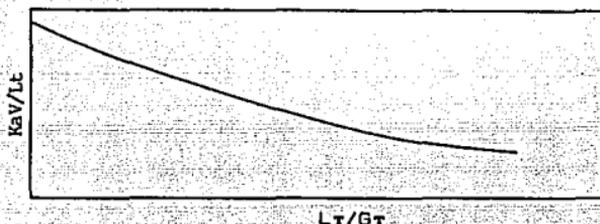


Fig. 3-12. El coeficiente disponible como una función de la variable L_T/G_T .

3.5. EL COEFICIENTE DISPONIBLE Y LAS VARIABLES DE OPERACIÓN.

Cuando el grupo adimensional ξ se calcula a partir de un grupo de datos experimentales se denomina *coeficiente disponible* (ξ_0), y es el número de unidades de transferencia que encierra la torre para las condiciones de operación dadas. La información que se requiere para computar el valor del factor ξ_0 es la siguiente:

- Presión barométrica.

■ Temperatura del agua y entalpía del aire a la entrada de la torre.

■ Temperatura del agua y entalpía del aire a la salida de la torre.

■ Relación de los flujos másicos totales.

Si dada la presión barométrica, la temperatura del agua a la entrada del equipo y la entalpía del aire de enfriamiento, se experimenta variando la razón de los flujos —modificando el gasto de agua o el de aire—, se obtendrán valores de la temperatura del agua y de la entalpía del aire, a la salida de la torre, diferentes en cada caso, y se podrá calcular el coeficiente disponible correspondiente.

En esta forma se conseguirá una tabla de los valores de la relación L_T/G_T (variable independiente) contra las magnitudes del factor $\xi\delta$ (variable dependiente), cuya gráfica será como la de la figura 3-12.

De las otras variables de operación, la que tiene la mayor influencia en la magnitud del coeficiente disponible es la temperatura del agua que ingresa a la torre: conforme ésta aumenta, la magnitud grupo $\xi\delta$ disminuye. Esto quiere decir que si se modifica la temperatura del agua a enfriar, se requerirán nuevos experimentos para conseguir la tabla respectiva de los valores de la variable L_T/G_T contra las magnitudes del factor ξ .

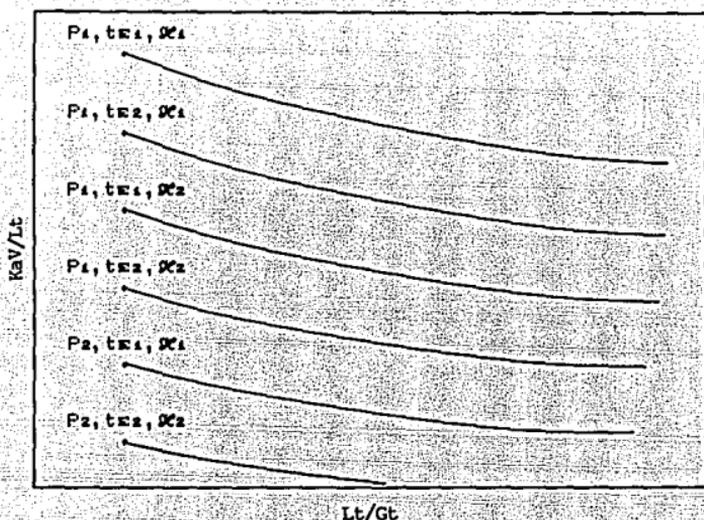


Fig. 3-13. Curvas para distintos valores de las variables P , t_E y X_E .

La presión barométrica del lugar donde se ubica la torre también influye en el valor grupo ξ_0 : cuando aquella disminuye, éste también lo hace. Entonces si el equipo es movido a un sitio con una altura sobre el nivel del mar notablemente diferente de la del primero, se deben hacer nuevos experimentos para obtener la gráfica correspondiente de los valores de la razón de los flujos contra las magnitudes del grupo ξ_0 .

Aun cuando el efecto de la temperatura de bulbo húmedo en el factor de desempeño es menor, si se desea una mayor exactitud, pueden obtenerse las gráficas

de los valores de la variable L_T/G_T contra los valores del grupo ξ correspondientes a cada temperatura de bulbo húmedo con que se opere la torre (ver figura 3-13).

Es posible obtener una ecuación que exprese el valor del coeficiente disponible como una función de la razón L_T/G_T . Para hacer esto, generalmente se emplea el método de los "mínimos cuadrados". Con el fin de obtener una expresión que se ajuste lo más fielmente posible a los datos experimentales, es común emplear transformaciones lineales, una de las más usadas es la siguiente:

$$\ln \xi_0 = a_0 + a_1 \ln \left(\frac{L_T}{G_T} \right) \quad (3-102)$$

donde a_0 y a_1 son los coeficientes de regresión.

Despejando el factor de desempeño resulta que

$$\xi_0 = e^{a_0} \left(\frac{L_T}{G_T} \right)^{a_1} \quad (3-103)$$

Si el grupo ξ_0 está en su forma KaV/L_T , puede fácilmente obtenerse la ecuación correspondiente a la forma KaV/G_T , multiplicando ambos lados de la ecuación (3-103) por L_T/G_T

L_T/G_T	KaV/G_T

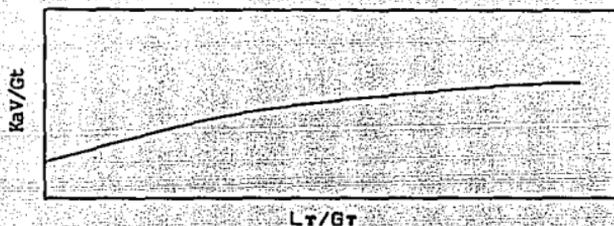


Fig. 3-14. El coeficiente disponible como una función de la variable L_T/G_T .

$$\frac{KaV}{L_T} = e^{a_0} \left(\frac{L_T}{G_T} \right)^{a_1} \quad (3-104)$$

entonces

$$\frac{KaV}{G_T} = e^{a_0} \left(\frac{L_T}{G_T} \right)^{a_1 + 1} \quad (3-105)$$

Cuando la regresión lineal se aplica a los datos de $\ln(KaV/L_T)$ contra $\ln(L_T/G_T)$, la a_1 cae por lo

general en el intervalo $[-0.35, -1.1]$, y el valor promedio está entre -0.55 y -0.65 [15].

Pueden emplearse otras transformaciones lineales para realizar la regresión. La mejor será aquella para la cual el valor absoluto del coeficiente de correlación se acerque más a la unidad [12,14].

Como puede verse en el diagrama de la figura 3-12, el número de unidades de transferencia relativas a la fase líquida ($KaV/L\tau$) disminuye al incrementarse el valor de la razón $L\tau/G\tau$. Por otra parte, el número de unidades de transferencia correspondientes a la fase gaseosa ($KaV/G\tau$) es directamente proporcional a la relación de los flujos (ver figura 3-14).

Es más común el uso del factor ξ_0 en la forma $KaV/L\tau$ (NUTL), ya que de acuerdo con la ecuación (3-44) el enfriamiento del agua es proporcional a este valor.

Por otra parte, según la ecuación (3-43), la ganancia de entalpía del aire es proporcional a la magnitud del grupo $KaV/G\tau$.

Entonces, dado que el fin primordial de la torre es reducir la temperatura del agua y el calentamiento del aire es sólo una consecuencia, el factor $KaV/L\tau$ será el que exprese la capacidad de enfriamiento del equipo.

3.6. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO

La carga térmica que recibe una torre se calcula con la ecuación

$$Q = L_t C_{AL} \Delta t \quad (3-106)$$

donde la Δt representa el rango ($t_x - t_s$).

La carga térmica es independiente de la torre, ya que sólo depende del proceso al cual ésta sirve. La cantidad de agua circulante depende de las bombas que la impulsan a través de dicho proceso y de la resistencia al flujo que presenta el sistema; por lo tanto también es independiente de la torre. Por deducción matemática, y según la ecuación (3-106), el rango no depende de la torre, y el desempeño de ésta no debe evaluarse con base en aquél.

El rendimiento de una torre de enfriamiento debe evaluarse basándose en el nivel de temperatura al cual es removida la carga térmica. En otras palabras, la medida de la eficiencia es la aproximación.

Con respecto a la temperatura del agua que sale de la torre es necesario señalar que es una función de la temperatura de bulbo húmedo del aire. Si ésta última aumenta, lo mismo ocurrirá con la primera; o si

la última disminuye la primera también lo hará. Esto sin embargo, no es una relación lineal y depende de los flujos de aire y de agua a manejar.

3.6. ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO

Si se dispone de la ecuación $\xi_0 = f(L_T/G_T)$ para un conjunto dado de presión, temperatura del agua que debe enfriarse y entalpía del aire a la entrada de la torre, es sencillo estimar el desempeño del sistema para distintos flujos de líquido y de gas.

De esta forma, si se desea saber cual será el rendimiento del equipo cuando se opere con cierta razón L_T/G_T , debe procederse, en primer lugar, a calcular el valor del coeficiente disponible con la ecuación mencionada. A continuación, mediante la técnica descrita en la sección 3.1, se calculan la temperatura del agua y la entalpía del aire a la salida de la torre.

También es posible comparar el valor del coeficiente de desempeño obtenido experimentalmente con aquel empleado en el diseño. Si después de un tiempo el equipo deja de cumplir con el servicio para el cual fue construido, puede existir algún deterioro en las partes del sistema. En este caso conviene experimentar con cada celda de la torre por separado, para averiguar cuál de

ellas está fallando. De esta manera se tendrán ecuaciones que relacionen los valores del grupo ξ_0 con las magnitudes de la relación L_T/G_T para cada bloque de relleno.

Si todas las celdas tienen el mismo rendimiento, el factor ξ_0 será igual en cada una de ellas, y en consecuencia, en toda la torre. Esto sucede así porque —como se explica en el desarrollo de la técnica de integración de las ecuaciones (3-43) y (3-44)— se asumió que no había transferencia de materia ni de energía en la dirección Z. Así, la magnitud del grupo ξ_0 es independiente de la profundidad del relleno.

Esto puede apreciarse en el esquema 3-15. Si la celda A se corta en dos partes iguales se tendrán los bloques B y C. Suponiendo que el flujo de agua que circulaba a través de la celda A se reparte equitativamente entre los bloques B y C, y lo mismo se hace con el gasto de aire, se tendrá que el valor del coeficiente de desempeño será el mismo para las unidades A, B y C, puesto que la relación L_T/G_T tiene el mismo valor en cada caso:

$$(\xi_0)_A = (\xi_0)_B = (\xi_0)_C$$

Por supuesto, deben cumplirse también las siguientes condiciones:

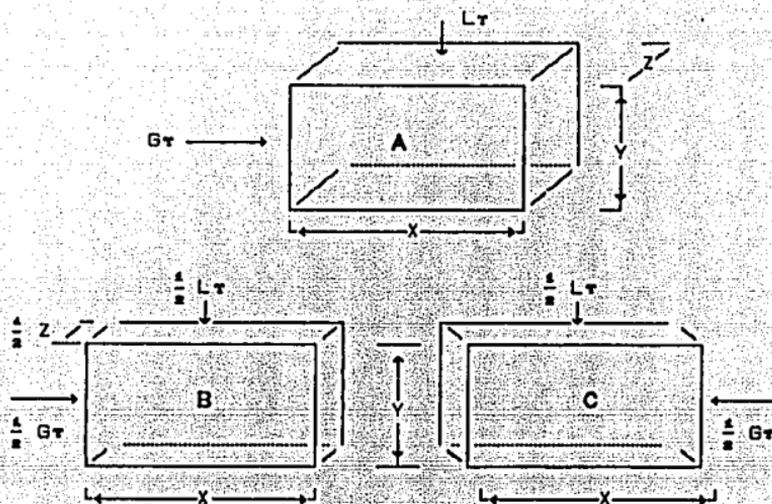


Fig. 3-15. División de una celda en dos más pequeñas.

$$(t_E)_A = (t_E)_B = (t_E)_C \quad (1)$$

$$(t_S)_A = (t_S)_B = (t_S)_C \quad (2)$$

$$(\rho_{C_1})_A = (\rho_{C_1})_B = (\rho_{C_1})_C \quad (3)$$

$$(\rho_{C_2})_A = (\rho_{C_2})_B = (\rho_{C_2})_C \quad (4)$$

Los requisitos (1) y (3) se cumplen en una torre de enfriamiento, puesto que el agua y el aire entran en las mismas condiciones a cada una de las celdas. Entonces, para que se observen las condiciones (2) y (4), todas las unidades de relleno deben tener el

mismo rendimiento. Esto por lo general ocurrirá así, a menos que alguna de ellas haya sufrido algún daño o deterioro.

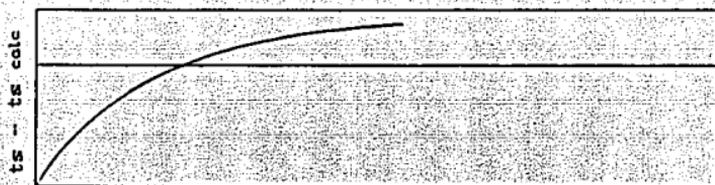
Normalmente el equipo será probado en su totalidad, y los valores experimentales obtenidos serán globales y no de cada bloque de empaque.

3.8. METODO DE CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DESEMPEÑO.

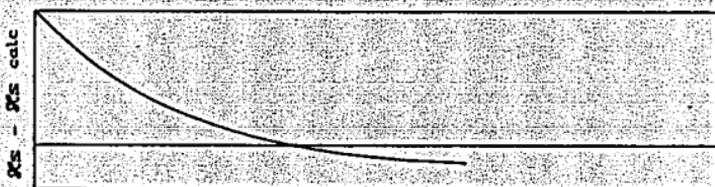
En las secciones anteriores se expuso el hecho de que un conjunto de datos (teóricos o experimentales) puede reducirse al valor numérico del coeficiente ξ . En esta parte se presentará el procedimiento necesario para hacer dicho cómputo.

El método de cálculo es iterativo, puesto que las ecuaciones (3-43) y (3-44) no tienen soluciones exactas. Entonces, se trata de encontrar una magnitud del factor ξ que concuerde con la información disponible, suponiendo un primer valor y corrigiéndolo sucesivamente.

Esto hace evidente la necesidad de una función matemática cuya raíz sea precisamente el valor buscado. Existen dos ecuaciones que cumplen con este requisito, y son



$KaV/L\tau$



$KaV/L\tau$



$KaV/G\tau$



$KaV/G\tau$

Fig. 3-16. Gráficas de las funciones (3-107) y (3-108).

$$t_s - t_{scale} = f(\xi) \quad (3-107)$$

$$X_s - X_{scale} = f(\xi) \quad (3-108)$$

En los diagramas de la figura 3-16 se presentan las gráficas de estas expresiones.

Para resolver alguna de las ecuaciones presentadas se empleará el método *Régula-Falsi*, que requiere de dos valores iniciales de la variable independiente que acoten la raíz. Entonces, el primer problema a afrontar será encontrar dos cantidades del factor ξ que cumplan con el requisito que exige la técnica de cálculo.

El valor del coeficiente ξ —ya sea disponible o requerido— de una torre que opera con flujo en contracorriente es generalmente menor que el de una que opera con flujo cruzado. De este modo, la cota inferior será el valor del grupo ξ calculado para una torre del primer tipo. La cota superior será un múltiplo de la magnitud así encontrada.

$$c_s = f c_i \quad (3-109)$$

un valor recomendable del factor f es 1.5.

Para una torre que funciona con flujo en coantracorriente se tienen las siguientes relaciones:

[6,8,11,19,21,23]

$$\frac{KaV}{CAL L_T} = \int_{t_x}^{t_s} \frac{dt}{x^* - x} \quad (3-110)$$

$$\frac{KaV}{G_T} = \int_{x_c}^{x_s} \frac{dx}{x^* - x} \quad (3-111)$$

que pueden integrarse gráficamente o empleando alguna técnica numérica. Aquí se usará el método de Simpson de $1/3$ [12] que define el área bajo la curva como

$$A = \frac{\Delta}{3} \left[y_0 + y_n + 2 \sum \text{ordenadas de índice par} + 4 \sum \text{ordenadas de índice impar} \right] \quad (3-112)$$

donde la letra Δ representa el incremento en la variable independiente.

Antes de proceder a realizar el método

Régula-Falsi, debe verificarse que los valores de las cotas, inferior y superior, efectivamente acoten la raíz. Si esto es así, se cumplirá la condición de que

$$[f(c_i)] [f(c_s)] < 0$$

En caso contrario deben buscarse nuevos valores. Como se mencionó anteriormente, por lo general el grupo ξ de una torre que funciona con flujo en contracorriente es menor que el de una que opera con flujo cruzado, entonces, si la raíz no se encuentra en el intervalo $[c_i, c_s]$ es probable que necesite emplearse una magnitud del factor f mayor que 1.5 en la ecuación (3-109).

Resumiendo el procedimiento descrito e incluyendo el método de convergencia Régula-Falsi, se tienen los pasos que se ennumeran a continuación:

1. Conocer las magnitudes de las variables siguientes: P , t_k , t_s , α_k , α_s y L_T/G_T .
2. Asignar un valor a la tolerancia o error permisible en los cálculos, por ejemplo 0.001.
3. Calcular la magnitud del factor ξ para una torre que opera en las condiciones dadas y con flujo en contracorriente: será la cota inferior c_i .
4. Calcular la cota superior como $c_s = 1.5c_i$
5. Si el valor absoluto de la función evaluada

con la cota inferior ($|f(c_i)|$) es menor que la tolerancia o si lo es el valor absoluto de la función calculada con la cota superior ($|f(c_s)|$), se encontró la raíz buscada. (Aquella para la cual el valor absoluto de la función es menor que la tolerancia). Si no, continuar con el paso siguiente.

6. Verificar que la raíz esté en el intervalo $[c_i, c_s]$, para esto debe cumplirse que $[f(c_i)][f(c_s)] < 0$.

7. A partir de los valores de las cotas calcular el nuevo valor del factor ξ usando la ecuación

$$\xi_{\text{nuevo}} = \frac{[f(c_s)]c_i - [f(c_i)]c_s}{f(c_s) - f(c_i)} \quad (3-113)$$

8. Si el valor absoluto de la función evaluada con la magnitud del coeficiente ξ_{nuevo} ($f(\xi_{\text{nuevo}})$) es menor que la tolerancia, se encontró la raíz. Si no, continuar con la siguiente etapa.

9. Si el producto $[f(c_s)][f(c_i)]$ es mayor que cero, asignar a la cota inferior el valor del factor ξ_{nuevo} , y a la función evaluada con la cota inferior $[f(c_i)]$ la magnitud de la función calculada con el factor ξ_{nuevo} $[f(\xi_{\text{nuevo}})]$. En caso contrario asignar a

la cota superior el valor del coeficiente ξ_{nuevo} y a la función evaluada con la cota superior $[f(cs)]$ la magnitud de la función computada con el factor ξ_{nuevo} $[f(\xi_{\text{nuevo}})]$.

10. Volver al paso 7.

Cuando se están haciendo cálculos para obtener una tabla de los valores de las variables L_T/G_T y ξ —ya sea que se trate de coeficientes requeridos o disponibles— debe usarse la misma función de convergencia en todos los cálculos. (la ecuación (3-107) o la (3-108)) También deben mantenerse constantes los valores de los incrementos Δx y Δy , así como la tolerancia. Esto tiene que hacerse con el fin de que todas las magnitudes del factor ξ tengan la misma exactitud.

EJEMPLO 3-3: Compruebe usted que el grupo KaV/L_T de la torre del ejemplo 3-1 efectivamente vale 1.2.

SOLUCIÓN:

1. Datos necesarios:

$$P = 101325 \text{ Pa.}$$

$$t_x = 316.5 \text{ K.}$$

$$\rho_x = 102344 \text{ J/kg.}$$

$$L_T/G_T = 1.9375.$$

$$t_s = 307.6 \text{ K.}$$

$$\alpha_s = 174349.5 \text{ J/kg.}$$

2. Para realizar el cálculo se usará la igualdad (3-107), y se tolerará, para esta función, un valor máximo de 0.001

3. Ahora debe computarse el factor ξ para una torre que opera con flujo en contracorriente y en las mismas condiciones:

de la ecuación (3-110) se tiene que

$$\frac{KaV}{L_T} = \text{CAL} \int_{t_c}^{t_s} \frac{dt}{\alpha^s - \alpha}$$

entonces se procede a evaluar la integral con el método de Simpson de 1/3 (ecuación (3-112)). Esta técnica exige que exista un número par de subintervalos en el intervalo de integración de la variable independiente, por lo cual, en este caso, se seleccionan 4

$$\Delta = (316.5 - 307.6)/4 = 2.225$$

Ahora debe obtenerse la ecuación de la línea

de operación de la torre que opera con flujo en contracorriente. La pendiente es

$$m = \frac{x_s - x_k}{t_s - t_k} = \frac{174349.5 - 102344}{316.5 - 307.6} = 8090.5$$

De acuerdo con la información disponible, debe hallarse la ecuación de una recta que pasa por un punto y tiene una pendiente dada. Así

$$x - x_k = m(t - t_k)$$

$$x - 102344 = 8090.5(t - 307.6)$$

$$x = 8090.5t - 307.6(8090.5) + 102344$$

$$x = 8090.5t - 2386293.8$$

Con esta ecuación se calculan las entalpías correspondientes a las temperaturas de los subintervalos. La información puede ordenarse del modo que se presenta a continuación:

t	x^s	x	$\frac{1}{x^s - x}$
316.5	215603.94	174349.5	2.4239E-5
314.275	194685.46	156348.12	2.6084E-5
312.05	175928.17	138346.75	2.6608E-5
309.825	159078.73	120345.37	2.5817E-5
307.6	143917.16	102344	2.4053E-5

Según la técnica de Simpson de 1/3, los elementos de la última columna se suman de la siguiente manera: $2.4239E-5 + (2.6084E-5)(4) + (2.6608E-5)(2) + (2.5817E-5)(4) + 2.4053E-5 = 3.09118E-4$. Así

$$\frac{KaV}{L^2} = (4186.8)(3.09118E-4) = 0.9589$$

Este es el valor que se asignará a la cota inferior.

4. la cota superior será:

$$cs = (1.5)(0.9589) = 1.4383$$

Las magnitudes de la función (3-107), para cada valor que vaya teniendo el factor ξ , se calcularán con la técnica descrita en el ejemplo 3-1. Aquí sólo se reportarán los resultados obtenidos en cada caso.

5.

$t_{\text{calc}} = 308.184$ K para $\xi = ci = 0.9589$; por lo tanto

$$f(0.9589) = 307.6 - 308.184 = -0.5841.$$

El valor absoluto de este resultado no es menor que la tolerancia, entonces se procede a calcular la función con el valor de la cota superior:

$t_{scale} = 307.16$ K para $\xi = c_s = 1.4383$, así

$$f(1.4383) = 307.6 - 307.16 = 0.4335.$$

El valor absoluto de este resultado tampoco es menor que la tolerancia, de forma que se requiere continuar con el siguiente paso:

6. Se verifica que la raíz se halle en el intervalo $[c_i, c_s]$:

$$[f(c_i)][f(c_s)] = (-0.5841)(0.4335) = -0.2532$$

Este producto es menor que cero, entonces el intervalo $[c_i, c_s]$ contiene la raíz.

7. A continuación se calcula el factor ξ_{nuevo} con la ecuación (3-113):

$$\xi_{nuevo} = \frac{(0.4335)(0.9589) - (-0.5841)(1.4383)}{0.4335 - (-0.5841)} = 1.234$$

En seguida se presenta una tabla con los resultados obtenidos, en la cual se puede apreciar la técnica de convergencia descrita anteriormente:

ci	cs	f(ci)	f(cs)
0.9589	1.4383	-0.5841	0.4335
0.9589	1.2341	-0.5841	0.0637
0.9589	1.2070	-0.5841	0.0087
0.9589	1.2033	-0.5841	0.0011

Con los valores de la última fila se calcula la magnitud del factor ξ_{nuevo} , el resultado es: $\xi_{nuevo} = 1.202$. La función (3-107) calculada con esta cantidad es igual a $1.5867E-4$. Este valor es menor que la tolerancia, entonces la raíz se encontró y

$$\frac{K_{AV}}{L_T} = 1.2$$

En la tabla se aprecia que la magnitud de la cota inferior permanece constante. Esto sucede así porque en cada fila el producto $[f(ci)][f(cs)]$ es menor que cero, y el valor del factor ξ_{nuevo} se asigna en estos casos a la cota superior.

IV

EL PROGRAMA TFC

4.1 INTRODUCCIÓN.

Hacer manualmente los cálculos tratados en el capítulo III resulta tedioso y muy lento; por estas razones, es conveniente auxiliarse con una computadora. Así, cuando se esté diseñando una torre, podrán evaluarse, en relativamente poco tiempo, los coeficientes requeridos para distintos servicios. Con estos datos será posible encontrar una ecuación matemática que exprese la magnitud del factor g_r como una función de la razón L_t/G_r , lo cual será una valiosa ayuda en la elección del valor de la relación de los flujos con que se calculará la torre.

De la misma manera podrán computarse los coeficientes disponibles para diferentes condiciones de operación. Con esta información se tendrá un banco de datos de trabajo de la torre y a partir de ellos será posible obtener expresiones del tipo $\phi = f(LI/Gt)$.

Con este propósito se ha desarrollado un programa para computadoras IBM-PC y compatibles, llamado TFC (Torres de Flujo Cruzado) y que cuenta con las opciones necesarias para facilitar las actividades descritas. Asimismo, también se ha hecho un programa de accesorios, denominado TFCA, cuya finalidad principal es construir los diagramas de comportamiento de las torres que operan con flujo cruzado a partir de los datos calculados por TFC.

Se presentará a continuación una descripción de ambos programas y se incluirá el instructivo para manejarlos.

4.2. EL PAQUETE COMPUTACIONAL.

4.2.1. Conocimientos de computación que requiere tener el usuario.

Los conceptos del MS-DOS que debe conocer el usuario son los siguientes:

- Unidades de disco.
- Directorios.
- Archivos.
- Trayectorias

4.2.2. Los archivos del paquete computacional.

El paquete computacional consta de dos programas: el principal (TFC.EXE) y el de accesorios (TFCA.EXE); de 5 archivos con extensión .SOP, que dan soporte al Sistema de Ayuda de cada programa; y de 10 archivos auxiliares, cuya extensión es .INF y que contienen información sobre el manejo de los programas mencionados.

Todo el sistema debe encontrarse en el mismo subdirectorio, que puede tener cualquier nombre y que debe seleccionarse como subdirectorio de trabajo antes de correr cualquiera de los programas.

4.3. EL FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA TFC.

4.3.1. El monitor.

En la parte inferior del monitor (ver figura

3. Porcentaje de memoria libre. Esto es muy útil cuando se están manejando bases de datos. El número total de registros dependerá de la capacidad de la máquina.

4. Modalidad del Sistema Escritor: Inserción o Sobreescritura (esto sólo puede cambiarse cuando se esté introduciendo algún dato o letrero).

Abajo de la línea de estado aparece la línea de la Carta Principal, que contiene los tres mandatos básicos del programa.

En la cuarta línea se despliega un mensaje que explica brevemente la función del mandato sobre el que se encuentra colocada la *barra selectora*.

4.3.2. El Sistema de Cartas.

TFC está estructurado en un Sistema de Cartas; que consiste en presentar, en la pantalla de la computadora, una lista de las opciones disponibles en cada momento, de acuerdo con la actividad que se está ejecutando. Existen tres mandatos, instrucciones u órdenes principales, y son los siguientes:

ARCHIVOS

DATOS

CÁLCULOS

Cada uno de ellos tiene diversos

submandatos.

4.3.2.1. El mandato seleccionado.

Es aquél sobre el que se encuentra posicionada la barra selectora —el nombre del mandato aparecerá resaltado en la pantalla de la computadora—, y que se ejecutará si se presiona la tecla [↵]. Por ejemplo, en la figura 4-1, el mandato seleccionado es ARCHIVOS.

4.3.2.2. Para seleccionar una orden de la Carta Principal.

Deberá recorrerse la barra selectora hasta que se encuentre sobre el mandato deseado. Esto se consigue con las teclas de las flechas horizontales: [←] y [→]; además, la tecla [Home] selecciona a la primera instrucción (ARCHIVOS) y [End] a la última (CÁLCULOS).

4.3.2.3. Para que un mandato sea ejecutado.

Deberá presionarse la tecla [↵] una vez que la barra selectora haya sido colocada sobre el nombre correspondiente.

A) Base Actual	A-J
B) Coeficiente ξ	KaV/Lt
C) Abrir la Base A-I	
D) Abrir la Base A-II	
E) Abrir la Base B (simulaciones)	
F) Revisión de los datos (I)	
G) Revisión de los datos (II)	
H) Tabla de resultados	
I) Regresión lineal	
J) Sistema de Unidades	

Fl-Ayuda \uparrow \leftarrow \rightarrow Movimiento barra selectora \leftarrow Acciona [Esc]-Carta Principal
 Carta C: 100.0% Ins
 Archivos **Datos** Cálculos
 Selecciona la base de datos a emplear

Fig. 4-3. Carta de opciones de la orden DATOS.

Principal son las iniciales de los nombres. Si se oprime la tecla correspondiente a la letra mayúscula se seleccionará y ejecutará —en un solo paso— la orden correspondiente, sin importar sobre cuál de ellas esté colocada la barra selectora.

En el caso de los submandatos, la letra mayúscula puede ser o no la inicial del nombre, y en la carta de DATOS las opciones aparecen señaladas por las letras de la A a la J, cuyas teclas son las que seleccionan y activan simultáneamente cada submandato (ver figura 4-3).

4.3.2.5. Para cancelar un mandato

Se usará la tecla [Esc]. Si se accionó alguno de los tres mandatos básicos y se presiona la mencionada tecla, desaparecerá el recuadro de submandatos y se regresará a la Carta Principal.

4.3.2.6. El manejo de los submandatos.

Como ya se señaló, los submandatos pueden seleccionarse y accionarse simultáneamente con la técnica de la letra mayúscula. También es posible el uso de la barra selectora y la tecla [←]. En este caso, la mencionada barra se moverá con las teclas de las flechas verticales: [↑] y [↓], así como con las de cambio de página: [PgUp] para escoger el primer submandato y [PgDn] para el último.

4.3.2.7. Para pasar de una carta de submandatos a otra.

Es posible pasar de una carta de submandatos a otra sin necesidad de volver a la Carta Principal. Esto se consigue fácilmente con las siguientes teclas:

[→]: Para pasar a la carta ubicada a la derecha de la actual, o a la de ARCHIVOS si la actual es la de

CÁLCULOS.

[←]: Para ingresar a la carta situada a la izquierda de la actual, o a la de CÁLCULOS si la actual es la de ARCHIVOS.

[HOME]: Para entrar a la carta de ARCHIVOS.

[END]: Para ingresar a la carta de CÁLCULOS.

Existe otra forma de pasar de una carta a otra y consiste en usar alguna de las combinaciones de teclas que se presentan a continuación:

[Alt-A]: Para la carta de ARCHIVOS.

[Alt-D]: Para la carta de DATOS.

[Alt-C]: Para la carta de CÁLCULOS.

Primero debe presionarse la tecla [Alt], y sin soltarla, debe oprimirse la tecla correspondiente a la inicial del mandato buscado.

4.3.2.8. Submandatos para especificar.

Sirven para que el usuario pueda indicarle al programa la forma como debe proceder, o de que manera debe manejar la información disponible. Junto a los nombres de estos mandatos aparecen letreros que indican la especificación hecha. Se clasifican en dos tipos:

DATOS	CALCULOS LISTA A-I	CALCULOS LISTAS A-II Y B
Base Actual Coeficiente	Coeficiente Propiedad Verificación	Pausa Verificación

Tabla 4-1. *Submandatos cíclicos.*

ciclicos y de opciones múltiples.

Los primeros cuentan con un número determinado de posibilidades. Al ser accionados, van cambiando de una opción a otra hasta volver a la primera, por lo que es sencillo modificar las especificaciones que con ellos pueden hacerse.

Por ejemplo el submandato *Base Actual*, de la carta de DATOS, tiene tres opciones: A-I, A-II y B. Si se presiona la tecla [←] cuando la barra selectora se halle sobre el nombre de esta instrucción, se verá que el letrero que aparece al lado cambia cíclicamente.

En el caso de los submandatos de opciones múltiples, el usuario debe teclear la especificación que desea hacer. Como ejemplo se tiene la orden *Registro inicial*, de la carta de CALCULOS. Cuando se acciona,

CALCULOS LISTA A-I	CALCULOS LISTAS A-II Y B
Tolerancia	Intervalos en X
Intervalos en X	Intervalos en Y
Intervalos en Y	Registro inicial
Registro inicial	

Tabla 4-2. Submandatos de opciones múltiples.

aparece un recuadro en la parte inferior de la pantalla, dentro del cual, el usuario introducirá el número del registro a partir del que TFC procesará la información.

Si uno de estos submandatos se acciona por error, la tecla [Esc] lo cancelará. Si se desea modificar alguna especificación hecha con anterioridad, bastará con activarlo nuevamente.

4.3.2.9. Submandatos para ejecutar.

Estos submandatos, al ser accionados, ocasionan que TFC realice alguna actividad determinada. Se clasifican en dos tipos: los que *requieren confirmación* por parte del usuario, y los *inmediatos*.

Antes de ejecutar una orden del primer tipo,

ARCHIVOS	DATOS	CÁLCULOS
Leer	Abrir la Base A-I	Efectuar los cálculos
Grabar	Abrir la Base A-II	
Escribir	Abrir la Base B	
C. Directorio	Revisión de datos I	
	Revisión de datos II	
	Tabla de resultados	

Tabla 4-3. *Instrucciones inmediatas.*

el programa solicita que le sea confirmada. Existen dos mandatos de este tipo, ambos pertenecen a la carta de ARCHIVOS y son: *Borrar y Salida*. Como podrá verse, la necesidad de confirmar estas instrucciones evita que, por ejemplo, se pierda la información de las bases si se acciona por error el primer submandato mencionado.

Las instrucciones inmediatas se obedecen en cuanto el usuario las activa. Si esto se hizo equivocadamente, basta con recurrir a la tecla [Esc] para que la orden se revierta; salvo en el caso de la instrucción *Efectuar los cálculos*, de la carta de CÁLCULOS, que se cancela con la combinación de teclas [Ctrl-Break].

Por ejemplo, si se acciona el submandato *Revisión de los datos I*, de la carta de DATOS, se verá que instantáneamente aparecerá, en la pantalla de la computadora, la información introducida por el usuario para ser revisada. Al presionarse [Esc], TFC volverá a la carta de DATOS, de donde partió la orden.

4.3.2.10. Instrucciones con mandatos terciarios.

Los submandatos *Regresión lineal* y *Sistema de Unidades* —de la carta de DATOS— tienen sus propias órdenes, que ofrecen al usuario diversas opciones de gran utilidad.

Una carta de mandatos terciarios aparece dentro de un recuadro cuando un submandato de los mencionados es activado. El usuario podrá emplear cualquiera de las opciones que se presentan, y para volver al submandato correspondiente, basta con que se presione la tecla [Esc].

Los mandatos terciarios son del tipo especificativo (ver tabla 4-5).

Si, por ejemplo, se desea señalar que la temperatura se proporcionará en grados Celcius, debe ingresarse a la carta de DATOS, luego activarse el submandato *Sistema de Unidades*, y de las opciones que éste ofrece, elegir la que se refiere a la temperatura;

Regresión lineal	Sistema de Unidades
Tipo de transformación	Presión
Información	Temperatura
Entrada de coeficientes	Entalpía
Realizar la regresión	Flujos

Tabla 4-4. Mandatos terciarios

entonces hay que oprimir la tecla [C] (que sirve para escoger los grados Celsius). Automáticamente el programa volverá a la carta del submandato *Sistema de Unidades*. Si ya no se desea hacer ningún cambio, con la tecla [Esc] se regresará a la carta de DATOS (ver figura 4-4).

La instrucción *Pausa*, de la carta de CÁLCULOS, también tiene mandatos terciarios. Estos se analizarán en la sección 4.5.5.1.

4.3.2.11. Las teclas principales.

Existen ciertas teclas que tienen siempre la misma función, independientemente del proceso en el que

Tipo de transformación	{	$y = a_0 + a_1x$ $y = a_0 + a_1 \ln x$ $\ln y = a_0 + a_1x$ $\ln y = a_0 + a_1 \ln x$ $y = a_0 + a_1(1/x)$ $(1/y) = a_0 + a_1x$ $(1/y) = a_0 + a_1(1/x)$
Presión	{	Pascales Atmosferas Torr (mmHg) lb/pulg ²
		Temperatura { Kelvin Celsius Farenheit Rankine
Entalpia	{	J/kg Cal/g Btu/lb
		Flujos { kg/s lb/min Ton/h

Tabla 4-5. Opciones de los mandatos terciarios

se encuentre el programa. Estas teclas son:

- [F1] Para obtener ayuda o información sobre TFC.
- [Alt-F1] Para obtener información del mandato sobre el que se encuentra la barra selectora.
- [F9] Para grabar en el disco la información actual.
- [Esc] Para cancelar la actividad actual.

4.3.3. El Sistema Escritor.

El Sistema Escritor es el medio de

	Inserción/Sobreescritura
[←], [→]	Movimiento del cursor.
[Backspace]:	Borra el carácter a la izquierda del cursor.
[Del]:	Borra el carácter bajo el cursor.
[Ctrl-Backspace]:	Borra desde el carácter a la izquierda del cursor hasta el inicio de la línea.
[Ctrl-Del]:	Borra desde el carácter bajo el cursor hasta el fin de la línea.
[Ctrl-B]:	Borra toda la línea.
[↵]	Acepta la escritura.

4.3.4. El Sistema de ayuda.

En la última línea de la pantalla, se despliega un mensaje que explica brevemente la función del mandato sobre el que se encuentra la barra selectora.

Además, el programa dispone de un Sistema de Información estructurado en manuales o instructivos, que se encuentran almacenados en los archivos con extensión .INF. Si en cualquier momento se presiona la tecla (F1), aparecerá en la pantalla la lista de manuales. El usuario podrá seleccionar cualquiera de ellos de la misma manera que selecciona y activa los mandatos del

Coeficiente δ	kaV/Lt
Función	ts - tscalc
Tolerancia	0.001
intervalo	
intervalo	Generalidades
Verificac	Escritura
Registro	Teclas especiales
i Efectua	Archivos
	Datos
	Cálculos

←-Presenta el tema seleccionado [Esc]- abandona el Sistema de ayuda

Información	Archivos	Datos	Cálculos	100.0%	Ins
--------------------	----------	-------	-----------------	--------	-----

Se muestra cuales son las teclas que desempeñan siempre la misma función

Fig. 4-7. El Sistema de ayuda.

programa. Si en lugar de escoger alguna de las opciones que se presentan, se oprime nuevamente la tecla [F1], el programa desplegará un manual que explica el funcionamiento del Sistema de Ayuda.

En las primeras páginas de cada instructivo, aparece un índice que facilita la búsqueda de la información.

A continuación se indica cuáles son las teclas que pueden emplearse para manejar los manuales:

[PgDn]: Para avanzar a la siguiente página.

- [PgUp]: Para regresar a la página anterior.
- [P] Para pasar rápidamente a cualquier página. Al oprimir esta tecla, el programa solicitará se le indique el número de la página que se desea leer.
- [Home] Para volver a la primera página.
- [End] Para ir a la última página.
- [F1]: Para que aparezca nuevamente el catálogo de manuales.
- [Esc]: Para abandonar el Sistema de Ayuda.

Así, si se desea obtener información sobre algún mandato en particular, debe seleccionarse el manual correspondiente a la carta a que pertenece dicho mandato, y en el índice de este instructivo se podrá ver en qué página se encuentra la información requerida.

Este procedimiento puede resultar tedioso cuando se repite varias veces, por lo cual, TFC dispone de un camino más sencillo, que consiste en colocar la barra selectora del Sistema de Cartas sobre aquel mandato acerca del cual se desea obtener información, y en seguida oprimir simultáneamente las teclas [Alt] y [F1]. El programa buscará automáticamente el manual respectivo y la página adecuada. Una vez que ésta aparece en la pantalla, el instructivo puede manejarse convencionalmente.

4.4. LAS BASES DE DATOS.

Las bases de datos se componen de un número no determinado de registros, ya que esto depende de la memoria de la computadora. TFC puede manejar dos de estas listas, lo cual, como se verá más adelante, encuentra su utilidad en la simulación del comportamiento de una torre en distintas condiciones de operación. La lista A sirve para almacenar la información experimental de la torre; mientras que la B se usa para llevar a cabo estimaciones del rendimiento del equipo.

Asimismo, existen dos formas de emplear dichas bases, y de acuerdo con esto se hablará de listas del tipo o clase I y listas del tipo o clase II.

Al primer registro se le asigna el número cero, e independientemente de la clase de base de datos que se esté manejando, siempre contendrá la siguiente información:

- Presión barométrica.
- Temperatura del agua que entra a la torre.
- Entalpía del aire que entra a la torre.

Los demás registros tendrán una estructura que dependerá del tipo de base que se esté empleando. Cuando las listas tengan más de un registro —sin considerar el registro cero—, estos se acomodarán

de acuerdo con los valores que la variable L/G tenga en cada uno de ellos, siguiendo un orden creciente.

4.4.1. Usos y aplicaciones de la base de datos A clase I.

La base de datos A-I se usa cuando se va a suministrar al programa la información necesaria para que éste calcule el valor del coeficiente de desempeño.

4.4.1.1. Aplicación al diseño.

Con el fin de diseñar una torre, debe calcularse el coeficiente requerido para que el equipo pueda prestar el servicio deseado. Los pasos a seguir para llevar a cabo esta actividad son los que se enumeran a continuación:

1. Conocer los siguientes datos:

- a) Presión barométrica.
- b) Temperatura del agua a la entrada.
- c) Entalpía del aire a la entrada.
- e) Temperatura del agua a la salida.
- f) Entalpía del aire a la salida.
- g) Relación de los flujos de agua y aire.

P	t_s	p_s

L_r/G_r	t_s	p_s

Fig. 4-5. Estructura de la base de datos del tipo I.

2. Abrir una lista del tipo A-I, con el submandato *Abrir la Base A-I* de la carta de DATOS.
3. Suministrar la información solicitada.
4. Cerrar la base de datos.
5. Pasar a la carta de CALCULOS, y activar el submandato *Efectuar los cálculos*.

En el diseño de las torres de enfriamiento, resulta de gran utilidad evaluar la magnitud del factor ξ_r para distintas relaciones L_r/G_r ; ya que esto ayudará a seleccionar la razón definitiva de los flujos. En este

caso, se deben añadir a la base los datos necesarios.

Una vez que TFC haya concluido el cálculo de cada uno de los valores del coeficiente ξ_r para cada relación L_t/G_t , será posible encontrar una ecuación matemática del tipo:

$$\xi_r = f(L_t/G_t) \quad (4-1)$$

Si se desea llevar a cabo la actividad que se acaba de describir, deben seguirse los siguientes pasos:

6. Volver a la carta de DATOS.
7. Accionar el submandato *Regresión Lineal*.
8. Seleccionar el tipo de la transformación lineal a emplear, usando el mandato terciario correspondiente.
9. Accionar el mandato terciario *Efectuar la regresión*.

TFC le informará de los resultados de la regresión. Es posible comparar el coeficiente de correlación (r) obtenido usando cada una de las transformaciones lineales con que cuenta el programa. La mejor será aquella para la cual el $|r|$ sea más cercado a la unidad.

Puede calcularse el grupo ξ_r para una sola razón L_t/G_t usando un registro. En este caso, por supuesto, no será posible obtener la ecuación (4-1).

4.4.1.2. Aplicación al procesamiento de información experimental.

Para predecir el comportamiento de una torre en ciertas condiciones de operación aún no empleadas, es necesario apoyarse en datos experimentales obtenidos directamente en el equipo.

Si dada la presión barométrica, la temperatura del agua a la entrada de la torre y la entalpía del aire de enfriamiento, se experimenta variando la razón de los flujos, se encontrará que la temperatura del agua que abandona el equipo y la entalpía del aire a la salida del sistema son diferentes en cada caso. Así, para cada relación L_T/G_T empleada se podrá calcular el coeficiente disponible correspondiente. Con esta información puede hallarse una ecuación del tipo

$$\xi_0 = f(L_T/G_T) \quad (4-2)$$

Entonces, si se desea estimar cuál será el rendimiento de la torre cuando se opere con cierta razón de los flujos, se procederá en primer término a calcular la magnitud del factor ξ_0 con la ecuación (4-2); para después computar los valores de la temperatura del agua y de la entalpía del aire a la salida del equipo.

Si se desea predecir el comportamiento con otra presión, otro valor de la t_s u otra magnitud de la α_s , es necesario contar con los datos experimentales correspondientes de las magnitudes del grupo ϕ_0 contra los valores de la razón L_T/G_T (sección 3-5).

Para aplicar la base A-I a estas actividades, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Conocer los datos experimentales que se indican a continuación:

- a) Presión barométrica.
- b) Temperatura del agua a la entrada.
- c) Entalpía del aire a la entrada.

y para cada relación de los flujos con que se haya experimentado, los valores correspondientes de las variables t_s y α_s .

2. Abrir una base de datos del tipo A-I, con el submandato respectivo de la carta de DATOS.

3. Introducir la información solicitada.

4. Cerrar la lista de datos.

5. Pasar a la carta de CALCULOS, con el fin de realizar el cómputo de los coeficientes disponibles para cada relación L_T/G_T empleada.

6. Seguir los pasos 6 a 9 de la sección 4.4.1.1.

4.4.2. La base de datos B clase I

La base de datos B-I se emplea para suministrarle al programa los valores de las relaciones L_T/G_T con las que se desea estimar el rendimiento de la torre.

Los cálculos se llevan a cabo con base en la ecuación experimental (4-2); ya que con ella, TFC calcula la magnitud del coeficiente de desempeño para cada razón L_T/G_T presente en la lista de datos, y posteriormente evalúa cada uno de los correspondientes valores de la temperatura del agua y la entalpía del aire a la salida del equipo. Por supuesto que los cálculos pueden hacerse para una sola relación de los flujos.

Si por cualquier motivo se conoce una ecuación que exprese la magnitud del grupo ϕ_0 como una función de la variable L_T/G_T (igualdad (4-2)), es posible hacer cálculos de simulación a partir de ella, aunque no se haya obtenido con los datos de la base A. Para esto, es necesario que se le suministre al programa dicha ecuación. Más adelante se estudiarán los mandatos que permiten realizar esto.

Resumiendo, el único requisito para realizar cálculos con la lista B-I es que TFC conozca la relación matemática (4-2), ya sea que el programa la haya

encontrado a partir de los datos de la base A o que el usuario se la haya proporcionado. Entonces, los pasos que deben seguirse para llevar a cabo simulaciones son los que se presentan a continuación:

1. Que TFC disponga de la ecuación (4-2).
2. Abrir una lista de datos para simulaciones, con el submandato correspondiente de la carta de DATOS.
3. Introducir los valores de las variables P , t_x y x_c . Si existe la lista A, el programa esperará que ambas bases tengan las mismas magnitudes de las mencionadas variables. Si por alguna razón esto no es así, le solicitará al usuario que verifique los datos.
4. Introducir las magnitudes de las relaciones L_r/G_r con las que se quiere estimar el desempeño de la torre. El programa llenará los casilleros titulados t_x y x_c cuando haya concluido los cálculos.
5. Cerrar la base de datos.
6. Pasar a la carta de CÁLCULOS, para ordenarle al programa que realice los cálculos necesarios.

4.4.3. La base de datos A clase II.

La base de datos A-II se emplea para suministrarle al programa la información requerida para calcular la temperatura del agua y la entalpía del aire a la salida de la torre. Dicha información es la

P	t_{π}	α_{π}

L_T/G_T	ξ

Fig. 4-6. Base de datos del Tipo II.

siguiente:

- Los datos del registro 0: P , t_{π} y α_{π} .
- La relación de los flujos y
- el correspondiente valor del coeficiente de desempeño.

La lista, como en cualquier otro caso, puede contener varios registros (ver figura 4-6), dependiendo de la cantidad disponible de datos de los valores del factor ξ contra las magnitudes de la variable L_T/G_T ; ya sea que se trate de valores proporcionados por el fabricante o que se hayan calculado con anterioridad. El

manejo de esta lista es muy sencillo. Una vez que se ha introducido toda la información, se debe pasar a la carta de CALCULOS para que TFC lleve a cabo los cálculos solicitados. Después, es necesario volver a la carta de DATOS y accionar el submandato que muestra la tabla de resultados.

Otra aplicación de esta base es la de encontrar la ecuación (4-1), y para esto, una vez que se ha cerrado la lista, basta con seguir los pasos 6 a 9 de la sección 4.4.1.1.

También, por supuesto, es posible combinar los dos usos mencionados de esta lista.

4.4.4. La base de datos B tipo II.

La lista B sólo puede manejarse como del tipo II para llevar a cabo la revisión y la corrección de la información que contiene.

En la carta de DATOS existen los submandatos *Revisión I*, implementado para las bases de la clase I; y *Revisión II*, aplicable a las listas de la clase II.

Si se acciona este último al estar empleando la base B, TFC la presentará en el formato B-II.

Una vez que se hayan concluido los cálculos de simulación, puede solicitarse esta actividad para revisar la tabla de los valores calculados —con la

ecuación (4-2) — del coeficiente de desempeño para cada relación L_T/G_r de la lista.

4.4.5. Los submandatos de la carta de DATOS.

4.4.5.1. Base actual.

Dado que TFC puede manejar dos bases de datos, es necesario que el usuario especifique con cuál de ellas desea trabajar. Asimismo, debe precisar si requiere que la lista A se maneje con el formato I o con el II, lo cual dependerá de los cálculos que desee hacer, de acuerdo con lo escrito en secciones anteriores. El submandato *Base actual* cumple con esta función, y para ello ofrece tres opciones:

- a) A-I.
- b) A-II.
- c) B. (Clase I o II).

Junto al nombre del submandato aparecerá una etiqueta que indicará la elección hecha por el usuario.

Es necesario señalar que el submandato que aquí se estudia es de menor jerarquía que los otros que se refieren al manejo de las bases de datos y que se mencionan a continuación: *Abrir la Base A-I*, *Abrir la*

Base A-II, Abrir la Base B, Revisión de los datos (I) y Revisión de los datos (II). Esto significa que si, por ejemplo, el usuario escoge la opción "A-I" y ordena al programa que ejecute la instrucción *Abrir la Base A-II*, la especificación cambiará a "A-II" y con lista correspondiente se trabajará.

El submandato *Base actual* indica a los otros submandatos sobre cuál base deben actuar, y cómo deben procesar la información.

Para las instrucciones de la carta de ARCHIVOS, no importa el formato en que se estén manejando las listas, para ellas sólo existen las bases A y B. Por ejemplo, si se escoge la opción "A-I" o la opción "A-II" y se manda a TFC que lea algún archivo en un disco, la información se almacenará en la lista A; mientras que si se elige la opción "B", los datos se registrarán en la base respectiva.

Para el mandato CALCULOS si hay diferencia entre cada una de las tres opciones de la orden *Base actual*, y su carta de submandatos variará en cada caso, debido a que para la lista A-I debe computarse la magnitud del factor ξ mientras que para las bases A-II y B deben evaluarse los valores de las variables t_s y H_s .

Otra función del submandato *Base actual* es permitir modificar el formato de la base A, pasando del tipo I al II y viceversa.

Esto permite comparar los datos suministrados al programa con aquéllos que éste calculó. Si por ejemplo, se evalúa el grupo 60 para un conjunto de datos de P, t_x , R_x , Lr/Gt , t_s y R_s y se desea comparar los valores de estas dos últimas variables con aquellos computados empleando el coeficiente de desempeño recién obtenido, se debe pasar de la lista A-I a la A-II.

Es importante mencionar que para cada variable quedará registrado el último valor presentado en la pantalla, de tal forma que, en un caso como el expuesto, las variables t_s y H_s permanecerán con el valor calculado, a menos que se les asigne nuevamente el original.

Un aspecto que debe subrayarse de este submandato, es que actúa internamente. Esto significa que el usuario no notará ningún cambio al activarlo, salvo en la etiqueta que indica la elección hecha, y en la línea de Estado, si es que la información se grabó en el disco o se obtuvo de él. Por ejemplo, si se está empleando la base B y se ordena que se trabaje con la lista A, en la pantalla permanecerá la primera hasta que se accione cualquier otro submandato, el cual se encargará de presentar la lista especificada.

4.4.5.2. Coeficiente ξ .

Permite indicar si se desea manejar el coeficiente de desempeño como KaV/Lt o como KaV/Gt .

4.4.5.3. Abrir la Base A-I.

Abre la base de datos A tipo I. Mientras introduce los datos, el usuario contará con las siguientes opciones:

■ Si aún no se ha calculado la relación de los flujos totales Lt/Gt , se podrá introducir el valor de cada flujo por separado, oprimiendo la tecla [F5].

■ Si no se conoce la entalpía del aire, el programa la puede calcular a partir de la temperatura de bulbo húmedo, para lo cual, debe oprimirse la tecla [F4].

Cuando se haya introducido toda la información disponible, oprimiendo la tecla [F6], se podrá cerrar la base de datos.

4.4.5.4. Abrir la Base A-II.

Abre la base de datos A-II. Se dispondrá también del auxilio de las teclas [F4] y [F5]. Para cerrar la lista hay que oprimir la tecla [F6].

4.4.5.5. Abrir la base B.

Abre la base de datos B, en la que se podrán introducir los valores de la variable Lr/Gr con los que se desea predecir el rendimiento de la torre. Los casilleros correspondientes a las variables t_s y X_c serán llenados por el programa cuando éste haya completado los cálculos. Nuevamente, las teclas [F4], [F5] y [F6] realizan las funciones anteriormente mencionadas.

4.4.5.6. Revisión de los datos.

Existen dos mandatos de este tipo: *Revisión de los datos (I)* y *Revisión de los datos (II)*. Cada uno se aplica a la base correspondiente, aunque cabe señalar que se puede accionar cualquiera de estas instrucciones independientemente del tipo de lista que se haya abierto en un principio (incluyendo la lista B).

La finalidad de ambas órdenes es permitir el acceso a cualquier dato presente en la base, para corregirlo. También se ofrece la opción de añadir nuevos registros, si así se desea. Esto último se conseguirá con la tecla [F8]. Para terminar de adicionar la nueva información, hay que presionar la tecla [F6].

Las siguientes teclas permiten mover la barra

de revisión a través de toda la lista:

[←], [→], [↵], [↓],

[PgUp], [PgDn],

[Home], [End],

[Tab],

[Barra espaciadora],

[Backspace],

[Ctrl - Home]: para pasar al primer registro.

[Ctrl - End]: para pasar al último registro.

Si se desea modificar el valor de alguna variable, debe presionarse la tecla [↵] cuando la barra de revisión se encuentre sobre ella. Para recuperar el valor anterior, aun después de haberlo borrado, basta con presionar la tecla [Esc]. Esto funcionará sólo si no se ha finalizado la escritura con la tecla [↵], o si el dato no ha sido aceptado debido a algún error.

También se cuenta con el auxilio de las siguientes teclas:

[F3]: Borra el registro actual. (Sin importar sobre cual variable se encuentre la barra de revisión).

[F4]: Muestra cuales entalpías fueron calculadas en la construcción de la base de datos y su temperatura de bulbo húmedo correspondiente.

[F5]: Muestra cuales relaciones, Lt/Gt fueron

computadas y las magnitudes respectivas de las variables Lt y Gr.

[F6]: Borra desde el registro actual, hasta el fin de la base.

4.4.5.7. Tabla de Resultados.

Presenta en la pantalla una hoja con toda la información disponible sobre la base actual:

- Datos introducidos por el usuario.
- Datos calculados por TFC.

Aparecerá una barra sobre el primer registro, que puede moverse a cualquier otro con las siguientes teclas:

[↑], [↓]
[PUp], [PgDn],
[Home], [End],

Si por alguna razón se desea borrar algún registro, es necesario presionar la tecla [F3] cuando la barra se encuentre sobre él. Oprimiendo la tecla [Esc] se finaliza esta actividad.

4.4.5.8. Regresión Lineal.

Mediante este mandato se podrá encontrar la ecuación que exprese la magnitud de la variable ξ como una función de la razón Lt/Gr. TFC emplea para esto el método de los "mínimos cuadrados" [12,14], y ofrece las siguientes opciones (ver tabla 4-4):

4.4.5.8.1. Tipo de transformación.

Se presentan 7 transformaciones lineales (ver tabla 4-5) para efectuar la regresión entre los valores del factor ξ y los de la relación Lt/Gr.

Al realizar la regresión, el programa informará de la magnitud del coeficiente de correlación "r", de esta forma, se podrá seleccionar el tipo de ecuación que mejor se ajuste a los datos (cuando el $|r|$ es más cercano a 1).

4.4.5.8.2. Información.

Presenta un recuadro con la siguiente información:

- Número de los datos procesados.
- Tipo de la transformación seleccionada.
- Valor de los coeficientes de regresión.
- Valor del coeficiente de correlación.

4.4.5.8.3. Entrada de coeficientes.

Si el usuario dispone de una igualdad matemática que exprese la magnitud del coeficiente disponible como una función de la variable L_t/G_t , y dicha ecuación corresponde a alguna de las siete con que cuenta el programa, podrá emplearla para hacer cálculos de simulación.

Para esto se deberá indicar —con el mandato terciario respectivo— el tipo de la transformación empleada; y con la orden estudiada en esta sección se podrán proporcionar los valores de los coeficientes de regresión.

Al introducir los coeficientes, se debe tener el cuidado de asignarles el valor obtenido directamente en la regresión lineal, y no el que tendrán cuando se despeje el factor ξ .

Por ejemplo:

En la transformación

$$\text{Ln}(\xi) = a_0 + a_1 \text{Ln}(L_t/G_t)$$

al despejar el grupo ξ la ecuación tendrá la siguiente forma:

$$\xi = [\exp(a_0)] [(Lt/Gt)^{a_1}],$$

Para el caso particular:

$$\xi = 1.25 (Lt/Gt)^{(-0.75)}.$$

los valores que deben ser introducidos son:

para a_0 : 0.2231435, (Ln (1.25))

para a_1 : -0.75

4.4.5.8.4. Realizar la regresión.

Efectúa la regresión lineal de acuerdo con la transformación seleccionada. Al finalizar los cálculos, se presenta un recuadro con los resultados obtenidos.

4.4.5.9. Sistema de Unidades.

La función de este submandato es definir el Sistema de Unidades que se utilizará en las bases de datos. Se dan opciones para cada variable a manejar (ver tablas 4-4 y 4-5): Presión, Temperatura, Entalpía y Flujos.

Al arrancar el programa, el sistema en uso es

el Internacional, pero se puede seleccionar el Inglés o emplear cualquier combinación de unidades.

Se incluyen unidades para los flujos sólo con la finalidad de recordarle al usuario que siempre se emplearán flujos máscicos totales, y no volumétricos ni masas velocidades. Dado que la variable Lt/Gt es adimensional, en realidad no importa en que unidades estén los flujos.

Así, al construir una base de datos y emplear la tecla [F5], se pueden introducir las cantidades en cualquier sistema de unidades —aun si es diferente al especificado— siempre que la Lr y la Gr sean dimensionalmente consistentes y se refieran a flujos máscicos totales.

Cuando se termine de definir el Sistema de Unidades a emplear, presionando [Esc] se volverá a la carta de DATOS.

4.5. LOS CÁLCULOS

Una vez que la base de datos esté completa, deberá pasarse a la carta de opciones del mandato CALCULOS, para iniciar los cómputos necesarios a partir de la información introducida.

El mandato CALCULOS tiene dos cartas

diferentes: una para la lista A-I y otra para las bases A-II y B. En el primer caso debe evaluarse la magnitud del coeficiente de desempeño; en tanto que en el segundo, deben calcularse los valores de la temperatura del agua y la entalpía del aire a la salida de la torre.

Existen algunas instrucciones iguales en ambas cartas, y son las que se analizarán primero; posteriormente se estudiarán los mandatos particulares.

4.5.1. Submandatos comunes a las tres bases de datos.

4.5.1.1. Intervalos en X e Intervalos en Y.

Para realizar los cálculos, el programa divide la torre en elementos diferenciales de volumen. Con estos submandatos se puede indicar cuántos de ellos se desea que haya a lo ancho (eje X) y cuántos a lo alto (eje Y). Hay que recordar que entre más elementos o intervalos se especifiquen, se obtendrá una mayor exactitud, pero se incrementará el tiempo requerido por el proceso.

4.5.1.2. Registro inicial.

Mediante este mandato, el usuario puede señalarle al programa el registro en que deben empezarse

los cálculos. Normalmente, esto será en el primero de ellos, pero la opción analizada encontrará su utilidad cuando se añadan datos a una base que ya tenga cálculos hechos, o cuando se desee hacer algún recálculo.

4.5.2. Submandatos para la lista A-I.

4.5.2.1. Coeficiente ξ .

Este mandato tiene la misma función que su homónimo de la carta de DATOS: permite señalar la forma como se desea manejar el coeficiente de desempeño (KaV/Lr o KaV/Gr).

Al especificar la presentación del factor ξ en cualquiera de las dos cartas, automáticamente se habrá especificado también en la otra.

4.5.2.2. Función.

Para calcular el valor del coeficiente de desempeño, TFC supone un valor inicial, y emplea una de las siguientes funciones para corroborar si el valor supuesto es acertado:

ts - ts calculada

Hs - Hs calculada

Cuando la función seleccionada sea igual a cero (en realidad menor que el valor máximo tolerable), se habrá encontrado la raíz buscada.

Junto al mandato *Función* aparecerá la etiqueta "ts" para indicar que se usará, para los cálculos, la primera función, y "Hs" en caso de que se haya seleccionado la segunda.

4.5.2.3. Tolerancia.

Se refiere al valor máximo aceptable para cualquiera de las funciones empleadas en el cálculo de los coeficientes de desempeño.

4.5.2.4. Verificación.

Antes de realizar los cálculos, el programa verificará que los datos de la base cumplan con ciertos requisitos, a menos que el usuario especifique que no se lleve a cabo comprobación ninguna.

4.5.2.4.1. Lo que TFC espera de las variables.

En cuanto a la relación de los flujos, el programa comprobará que corresponda a los valores de las otras variables, y que se encuentre dentro del límite

adecuado para los cálculos. Estrictamente, este límite lo marca la razón Lt/Gr máxima permisible (Sección 3-2); aunque en realidad, para TFC es un porcentaje de ese valor.

Si la magnitud de la variable Lt/Gr es mayor que el 10% de la razón máxima, el cálculo se dificultará y la convergencia será más lenta. Si el valor de la relación Lt/Gr es mayor que el 5% de la razón máxima, el cómputo del factor ξ no se llevará a cabo —a menos que el usuario le indique al programa que no realice verificación ninguna—, ya que las operaciones matemáticas que deben hacerse resultarían en cantidades tan grandes que el programa no las podría manejar (desbordamiento numérico).

Por otra parte, los valores de las variables t_s y α_s —si se trata de datos experimentales— aumentan al incrementarse la razón de los flujos. Ahora bien, si se está diseñando una torre, la magnitud de la variable α_s crece si así lo hace la de la relación Lt/Gr , mientras que el valor de la variable t_s permanece constante, ya que forma parte del servicio requerido.

4.5.2.4.2. Opciones para la verificación de los datos.

Las opciones para la verificación de los datos son las siguientes:

- a) Manual.
- b) Automática.
- c) Apagada.

Si se elige la primera, TFC comprobará que la razón de los flujos corresponda a las magnitudes de las otras variables. En caso de que esto no suceda así, el programa solicitará la autorización del usuario para ajustar el valor; si no la recibe, ejecutará la instrucción *Revisión I* para que el dato se corrija manualmente. Al finalizar la revisión y presionar la tecla [Esc], TFC volverá a la carta de CÁLCULOS y no a la de DATOS, como sucedería en otras circunstancias.

Cuando la relación Lr/Gr sea mayor que el 10% de la razón máxima permisible, TFC se lo notificará al usuario y le preguntará si se trata del valor correcto. Si es así, el proceso de verificación continúa con la siguiente etapa; de lo contrario, el programa obedece el mandato *Revisión I*. Si la razón de los flujos es mayor que el 5% de la máxima, TFC desplegará un mensaje que así lo indique y no realizará el cálculo; a continuación, entrará en funcionamiento la actividad *Revisión I*.

En cuanto a las variables t_s y X_s , siempre que la lista tenga más de un registro, el programa esperará que se incremente su valor al aumentar el de la

razón de los flujos. Si esto no sucede así, le preguntará al usuario si los datos son correctos. En caso de que la respuesta sea afirmativa, el proceso continúa; si no, se acciona el mandato *Revisión I*.

De acuerdo con lo escrito, se puede ver que esta opción es muy adecuada para el manejo de la información experimental. Si se trata de diseñar una torre, sólo habrá que responder afirmativamente a las preguntas sobre la validez de las magnitudes de la variable t_s , puesto que permanece constante en todos los registros.

Si se escoge la opción (b), el programa no se ocupará en analizar cómo varían de un registro a otro los valores de las variables t_s y X_s .

Por otra parte, se ajustarán automáticamente las magnitudes de la variable L_t/G_r que no coincidan con las condiciones de operación; y aquellos registros cuyas relaciones de los flujos estén fuera del límite permisible, se excluirán de los cálculos.

Esta opción tiene su mayor utilidad en el diseño, puesto que se omiten las preguntas sobre la validez de los valores de las variables t_s y X_s y se corrigen las magnitudes de las relaciones de los flujos que pudieran estar mal calculadas.

Si se desactiva la verificación de datos (opción (c)), TFC realizará los cálculos directamente,

sin llevar a cabo comprobación ninguna. Si el usuario está seguro de que todos los datos de la lista son correctos, deberá elegir esta opción.

4.5.2.5. Efectuar los cálculos.

Realiza los cálculos solicitados. Si en cualquier momento se desean interrumpir, deben presionarse simultáneamente las teclas [Ctrl-Break].

Mientras se hacen los cálculos, en la pantalla se presentará un recuadro con la siguiente información:

- No. total de registros.
- Registro que actualmente se está procesando.
- Coeficiente : KaV/Lt o KaV/Gt .
- Variable que se está empleando como base para el cálculo del coeficiente de desempeño: t_s o R_s .
- Tolerancia permitida en el cálculo del grupo ξ .
- No. total de intervalos en el eje X.
- No. total de intervalos en el eje Y.
- Intervalo en el eje X que se está calculando
- Intervalo en el eje Y que se está calculando.

Es necesario señalar que cuando se estén calculando los últimos intervalos en los ejes X y Y no aparecerá su número en la pantalla (lo cual no significa que no hayan sido considerados).

4.5.3. Submandatos para la lista A-II.

4.5.3.1. Verificación de los datos de la lista A-II

4.5.3.1.1. Lo que TFC espera de las variables.

El comportamiento esperado del coeficiente disponible (aquél calculado con datos experimentales) es el siguiente:

- el factor KaV/Lr disminuye al aumentar la razón Lr/Gr .

- el factor KaV/Gr se incrementa al hacerlo la relación Lr/Gr .

Por otra parte, el valor del coeficiente requerido (aquél calculado con datos teóricos) en sus dos formas — KaV/Lr y KaV/Gr — crece si aumenta la razón de los flujos.

El submandato *Verificación*, para la base A-II, está orientado al manejo de coeficientes disponibles, por lo que, si se lleva a cabo el diseño de una torre, es conveniente desactivarlo.

4.5.3.1.2. Opciones para la verificación de los datos.

Las opciones que se ofrecen son las siguientes:

a) Sí.

b) No.

Si se especifica la primera, y la lista tiene más de un registro, TFC verificará que los valores del factor ξ varíen de acuerdo con lo esperado. Si el programa encuentra un dato que no cumple con este requisito, le preguntará al usuario si se trata del valor correcto. En caso afirmativo, el proceso de verificación continúa; de lo contrario, se ejecuta el mandato *Revisión II* para que el dato se corrija.

Cuando se elige la opción (b) no se lleva a cabo verificación alguna, y como se mencionó, es la indicada para el diseño.

4.5.3.2. Efectuar los cálculos.

Realiza el cómputo de las variables t_s y H_s para cada registro presente en la base de datos A-II. Si en cualquier momento el usuario desea interrumpir esta actividad, debe presionar simultáneamente las teclas [Ctrl] y [Break].

Mientras los cálculos son llevados a cabo, en el monitor aparece un recuadro con la información siguiente:

- No. total de registros.
- Registro que actualmente se está procesando.

- Coeficiente : KaV/Lt o KaV/Gt .
- No. total de intervalos en el eje X.
- No. total de intervalos en el eje Y.
- Intervalo en el eje X que se está calculando
- Intervalo en el eje Y que se está calculando.

Al concluir los cálculos, se puede ver toda la información que contiene la lista activando el submandato "Tabla de resultados", de la Carta de DATOS.

4.5.4. Submandatos para la lista B.

4.5.4.1. Verificación de los datos de la lista B.

Este submandato tiene las mismas opciones que el anterior:

- a) Sí.
- b) No.

Si se elige la primera, TFC verificará que los valores de la presión barométrica, temperatura del agua que entra a la torre y entalpía del aire de enfriamiento sean iguales a los introducidos en la base de datos experimentales (A). Si no existe esta última lista y se desea llevar a cabo una simulación, debe ser escogida la opción (b).

4.5.4.2. Efectuar los cálculos.

Al accionar este mandato, TFC computa primeramente el valor del coeficiente de desempeño con la ecuación experimental

$$s = \phi(Lt/Gt)$$

En seguida, el programa calcula los valores de las variables t_s y H_s .

Estas actividades se ejecutan para cada registro presente en la base de datos B.

En tanto que los cálculos son llevados a cabo, en el monitor se despliega, dentro de un recuadro, la siguiente información:

- No. total de registros.
- Registro que actualmente se está procesando.
- Coeficiente : KaV/Lt o KaV/Gt .
- No. total de intervalos en el eje X.
- No. total de intervalos en el eje Y.
- Intervalo en el eje X que se está calculando
- Intervalo en el eje Y que se está calculando.

4.5.5. Submandatos para las listas A-II y B.

4.5.5.1. Pausa.

Con este submandato puede indicársele al

programa que haga una pausa al finalizar los cálculos de cada registro. En caso contrario, TFC no se detendrá hasta haber completado todos los computos de la base.

Si se especificó la pausa, al terminar de procesar cada registro, el programa presentará una carta con las opciones que se analizan a continuación. Es necesario señalar que aunque la base sólo tenga un registro, si desea utilizarse esta carta, debe accionarse el mandato terciario *Pausa*.

4.5.5.1.1. Continuar.

Ocasiona que el programa inicie el siguiente cálculo.

4.5.5.1.2. Desplegar.

Este mandato hace que el programa presente, en la pantalla de la computadora, una ventana con la matriz de datos que acaba de calcular (ver figura 3-3), la cual contiene la información sobre las variaciones de la temperatura del agua y la entalpia del aire en el interior del equipo.

Inicialmente se mostrará una parte de la matriz que corresponde a la sección superior izquierda de la torre, y aparecerá una barra que puede moverse

para señalar cualquier dato. Si la mencionada barra llega a algún borde del recuadro y se la continúa moviendo en esa dirección, la ventana se desplazará, de este modo, puede verse la matriz en su totalidad. Las teclas que permiten mover dicha barra son las siguientes:

[←], [→], [↑], [↓],

[Home]: Envía la barra al extremo izquierdo de la ventana. Si la barra ya se encontraba en ese borde, la ventana se desplazará hacia la izquierda.

[End]: Manda la barra al extremo derecho de la ventana. Si la barra estaba colocada en ese borde, la ventana se desplazará hacia la derecha.

[Ctrl-Home]: Transporta la barra al extremo superior izquierdo de la matriz.

[Ctrl-End]: Coloca la barra en el extremo superior derecho de la matriz.

[PgUp]: Posiciona la barra en el extremo superior de la ventana. Si la barra se hallaba en ese borde, la ventana se desplazará hacia arriba.

[PgDn]: Pone la barra en el extremo inferior de la ventana. Si la barra estaba colocada

en ese borde, la ventana se desplazará hacia abajo.

[Ctrl- →]: Envía la barra al extremo inferior derecho de la matriz.

[Ctrl- ←]: Envía la barra al extremo inferior izquierdo de la matriz.

4.5.5.1.3. Grabar.

Permite grabar la matriz de datos en un disco para su posterior utilización en el programa de accesorios de TFC, el cual construirá, sobre la Carta Psicométrica, el diagrama de comportamiento de la torre.

TFC le solicitará al usuario un nombre para el archivo que guardará a la matriz. Es conveniente proporcionarlo sin extensión, para que el programa se la asigne (será .MDT).

4.5.5.1.4. Suspender.

Detiene los cálculos en el registro actual.

4.6. LA INTERACCIÓN CON EL DISCO. LA CARTA DE ARCHIVOS.

4.6.1. Introducción.

En esta carta se encuentran todos los mandatos necesarios para manejar los archivos que emplea TFC. También se proporcionan otras opciones de gran utilidad, que se explicarán más adelante.

TFC utiliza cuatro tipos de archivos, los cuales se analizarán de acuerdo con su extensión:

.TFC

Contiene la base de los datos de las condiciones de operación (lista A) o de los cálculos de simulación (lista B) de la torre.

.EFC

Es un archivo complementario del anterior, y contiene información auxiliar sobre los cálculos hechos y el sistema de unidades empleado.

.DPS

Guarda la información sobre el tipo de la transformación empleada con los valores del factor ξ y las magnitudes de la variable Lt/Gt , así como el valor de los coeficientes de regresión y el número de los datos procesados.

.MDT

Contiene la información sobre las variaciones de la temperatura del agua y la entalpía del aire dentro de la torre (matriz de datos). Este archivo es el que se requiere para emplear el programa de accesorios de TFC.

Los archivos .TFC, .EFC y .DPS tendrán el mismo nombre.

4.6.2. Submandatos.

4.6.2.1. Leer.

Permite cargar en la memoria de la computadora un archivo .TFC grabado previamente en el disco, así como el complementario .EFC y —si existe— el .DPS. El programa no podrá cargar el archivo .TFC si el no encuentra el .EFC correspondiente.

El programa solicitará el nombre del archivo a leer. No es necesario que se especifique la extensión si ésta es .TFC.

El programa no distingue entre un archivo que contenga a la lista A y uno que almacene a la B, por lo tanto, es necesario indicarle, con el submandato *Base Actual* de la carta de DATOS, en cual de ellas debe colocar la información leída en el disco.

4.6.2.2. Borrar.

Borra la lista seleccionada con el submandato *Base Actual* de la carta de DATOS y limpia la pantalla. Si existe otra base de datos, cualquier instrucción que actúe sobre ella hará que aparezca nuevamente en el monitor.

4.6.2.3. Grabar.

Permite grabar en el disco la base presente. Si es la primera vez que se realiza esta actividad, TFC solicitará un nombre para el archivo, el cual podrá suministrarse con o sin extensión, esto último es más recomendable, para que automáticamente se le añada .TFC.

Si el programa encuentra en el disco un archivo cuyo nombre sea el mismo que el usuario acaba de proporcionarle, pedirá autorización para llevar a cabo la grabación, ya que al hacerlo, se destruirá el antiguo archivo y quedará el nuevo.

Para grabaciones posteriores, TFC considerará que se trata del mismo archivo, y ya no se requerirá especificar el nombre.

Puede activarse este mandato en la carta de ARCHIVOS, o bien con la tecla [F9] desde cualquier parte del Sistema de Cartas.

4.6.2.4. Escribir.

Permite guardar en un nuevo archivo la información actual. Esta opción es útil cuando por algún motivo se han hecho modificaciones a la base de datos y desea almacenarse con su último contenido sin modificar el archivo original.

4.6.2.5. Cambiar el directorio.

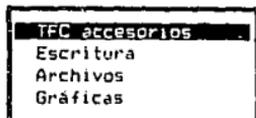
Despliega el nombre del directorio actual y permite seleccionar un nuevo directorio de trabajo.

4.6.2.6. Salida.

El programa termina de correr y el control regresa al DOS. Antes de ejecutar esta orden, TFC le solicitará al usuario que la confirme. Esto es por si se hubieran accionado accidentalmente el mandato.

La información suministrada al programa se perderá si no fue grabada en un disco y esta instrucción es confirmada.

El mandato "Salida" también puede activarse desde cualquier parte del Sistema de Cartas si se presionan simultáneamente las teclas [Alt] y [S].



←-Presenta el tema seleccionado [Esc]-Abandona el Sistema de ayuda
[Información] [Archivos] [Gráficas] [Ins]
Aspectos generales de TFCA: su manejo, sus usos y aplicaciones

Fig. 4-8. El Sistema de ayuda de TFCA

4.8. EL PROGRAMA DE ACCESORIOS.

La finalidad de este programa auxiliar es construir los diagramas de comportamiento de las torres que operan con flujo cruzado a partir de la matriz de datos calculada por TFC. Antes de activar a TFCA, deberá haberse grabado en el disco dicha matriz (ver sección 4.5.5.1, submandato *Pausa*).

El manejo de TFCA es muy similar al de TFC, ya que también se encuentra estructurado en un sistema de cartas. El sistema de ayuda y el escritor funcionan

igual que en el programa principal.

4.9 EL MANEJO DE ARCHIVOS EN TFCA.

4.9.1. Submandatos.

4.9.1.1. Leer.

Este mandato se emplea para cargar un archivo que contenga a la matriz de los datos calculados por TFC. TFCA solicitará el nombre del archivo a leer. No se necesita especificar la extensión, a menos que sea una diferente de .MDT.

4.9.1.2. Matriz.

Muestra la matriz de los datos de la torre. Este submandato es el mismo que el llamado *Desplegar* (sección 4.5.5.1.2) de TFC.

4.9.1.3. Escribir.

Permite grabar la matriz de datos en el disco en un nuevo archivo.

4.9.1.4. Cambiar el directorio.

Muestra el directorio actual y permite seleccionar un nuevo directorio de trabajo.

4.9.1.5. Salida.

El programa termina de correr y el control de la computadora regresa al DOS. Antes de ejecutar esta orden, TFC le solicitará al usuario que la confirme. Esto es por si se hubiera accionado accidentalmente el mandato.

El mandato "Salida" también puede activarse desde cualquier parte del Sistema de Cartas si se presionan simultáneamente las teclas [Alt] y [S].

4.10 LA CARTA DE GRÁFICAS.

4.10.1. Submandatos de la carta de gráficas.

4.10.1.1. Escala.

El usuario puede seleccionar, de entre tres opciones, la escala a emplear en la gráfica:

4.10.1.1.1. Escala TFC.

Es la escala preasignada, y se calcula de acuerdo con los datos de la matriz. En este caso se presenta una región amplia de la curva de equilibrio.

4.10.1.1.2. Escala del Usuario.

Permite modificar los límites de la gráfica. Este submandato es muy útil cuando se desean hacer ampliaciones de alguna sección del diagrama de comportamiento de la torre.

4.10.1.1.3. Escala Total.

Presenta el diagrama de comportamiento ocupando todo el plano gráfico. (Sólo aparece una pequeña parte de la curva de equilibrio).

4.10.1.2. Intervalos.

Este mandato se emplea para asignar los valores de la entalpía y la temperatura a las marcas que aparecen en cada eje de la gráfica (ver figura 4-8).

Existen dos tipos de intervalos: *Prácticos* y *Calculados*.

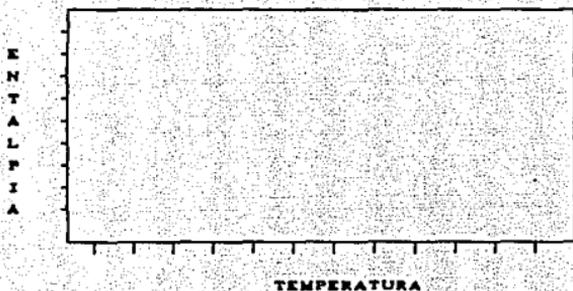


Fig. 4-8. Tipo de intervalos

4.10.1.2.1. Prácticos.

Es el tipo preasignado, e implica que aparecerán valores que facilitan la lectura en la gráfica, con incrementos múltiplos de 10 o de 5 en cada eje.

Esto sin embargo, puede hacer que el diagrama de comportamiento aparezca en una sección reducida de la Carta Psicrométrica (lo cual dependerá también de la escala empleada).

4.10.1.2.2. Calculados.

Los valores que se asignarán a las marcas de cada eje se calcularán de acuerdo con los valores máximos y mínimos —que contenga la matriz— de la temperatura del agua y la entalpía del aire.

4.10.1.3. Curvas.

Permite especificar cuántas curvas de la temperatura del agua y la entalpía del aire deben trazarse en el diagrama de comportamiento.

4.10.1.4. Tipo de gráfica.

Para la curva de equilibrio y la matriz, se puede indicar si se desea que sólo se marquen los puntos calculados o que se trace la curva que los une.

4.10.1.5. Cuadrículado.

Si se desea que se cuadricule el plano, debe emplearse este submandato para así indicarlo.

4.10.1.6. Marcar los Límites.

Traza una línea punteada desde el punto que representa la esquina inferior izquierda de la torre hasta la curva de equilibrio, y desde el punto que representa la esquina superior derecha de la torre hasta la mencionada curva.

La intersección de la primera línea con la curva de equilibrio señala la temperatura mínima que, teóricamente, podría alcanzar el agua en una torre de altura infinita. La intersección de la segunda línea con la misma curva indica la máxima entalpía que, en teoría, podría conseguir el aire en un equipo de anchura infinita.

4.10.1.7. Título.

Permite colocar un título en la parte superior de la gráfica. Pueden emplearse las letras acentuadas, la ñ y la ñ.

El programa *keybsp.com* del DOS da la posibilidad de obtener dichas letras. Si se corre, permanece residiendo en la memoria de la computadora, y sigue funcionando inclusive si otro programa se activa. Así, al oprimir la tecla correspondiente al acento ('),

la máquina esperará a que se presione la tecla de alguna vocal (como en una máquina de escribir).

Existe otra forma de conseguir las mencionadas letras, en caso de que no se disponga del programa *keybsp.com*, y consiste en usar los códigos ASCII que se indican a continuación

Letra	Código
ë	144
á	160
é	130
í	161
ó	162
ú	163
ñ	164
Ñ	165

Cada letra se obtendrá presionando [Alt] y tecleando el código deseado en el bloque numérico ubicado a la derecha del teclado.

4.10.1.8. Dibujar.

Presenta la gráfica solicitada. Cuando esta actividad se realiza por primera vez, el plano deberá

estructurarse. Aparecerá un mensaje que así lo indicará.

Para regresar a la carta de gráficas, debe presionarse la tecla [Esc].

El plano será reestructurado si la escala o el tipo de intervalos se modifican.

4.10.3. Impresión de las gráficas.

El MS-DOS cuenta con un programa llamado *graphics.com*, que permite la impresión de las gráficas que se encuentren en la pantalla al oprimir la tecla [Print Screen].

Este programa permanece residiendo en la memoria de la computadora y debe activarse antes de correr al programa TFCA.

Así, una vez que el diagrama de comportamiento de la torre aparezca en el monitor, debe presionarse la tecla [Print Screen] para imprimirlo, asegurándose primero de que la impresora este lista.

APENDICE A

SUPLEMENTO DEL CAPITULO I

A.1 LA LEY DE RAOULT.

A.1.1. Breve revisión del equilibrio líquido-vapor.

Para que en un sistema de varios componentes (n) se alcance el equilibrio líquido-vapor, se debe cumplir que

$$\bar{f}_i^l = \bar{f}_i^v \quad (A-1)$$

desde $i = 1$ hasta $i = n$.

donde la \bar{f}_i^l representa la fugacidad del componente i en

la fase líquida de la mezcla; y la \bar{f}_i^v simboliza la fugacidad del mismo componente en la fase vapor de la mencionada mezcla.

La fugacidad de la sustancia i en la fase vapor del sistema se calcula con la expresión

$$\bar{f}_i^v = \bar{\phi}_i^v y_i P \quad (A-2)$$

en la cual, la $\bar{\phi}_i^v$ representa el coeficiente de fugacidad del componente i en la mezcla —evaluado a la temperatura (t) y la presión (P) del sistema— y la y_i simboliza su fracción mol.

Si para la fase líquida de la mezcla se selecciona el modelo de la solución ideal de Lewis y Randall, y se introduce el coeficiente de actividad como un factor de corrección para aplicar el mencionado modelo a las mezclas reales, la fugacidad del componente i se computa con la siguiente igualdad:

$$\bar{f}_i^l = \gamma_i x_i f_i^l \quad (A-3)$$

Esta ecuación es válida cuando la presión es baja, ya que sólo en este caso se puede considerar que el coeficiente de actividad γ_i y la fugacidad del compuesto puro f_i^l son independientes de la presión. La fugacidad de la sustancia pura debe evaluarse empleando

la temperatura y la presión del sistema. La expresión matemática que la define es

$$f_i^L = f_i^S \exp \int_{P_i^S}^P \frac{V_i^L}{Rt} dP \quad (A-4)$$

En esta ecuación, la t representa la temperatura de la mezcla; la V_i^L el volumen molar del líquido puro —calculado a dicha temperatura y a la presión del sistema— y la f_i^S la fugacidad en el estado de saturación, que puede expresarse de la siguiente manera:

$$f_i^S = \phi_i^S P_i^S \quad (A-5)$$

donde la P_i^S es la presión de saturación del componente i y la ϕ_i^S su coeficiente de fugacidad, evaluado a dicha presión y a la temperatura del sistema.

De acuerdo con lo hasta aquí expuesto, la relación de equilibrio puede escribirse

$$\bar{\phi}_i y_i P = \gamma_i x_i \phi_i^S P_i^S \exp \int_{P_i^S}^P \frac{V_i^L}{Rt} dP \quad (A-6)$$

A.1.2. Idealizaciones.

Según la regla de Lewis y Randall, la solución ideal se comporta conforme a la ecuación

$$\bar{f}_i^{ld} = x_i f_i^l \quad (A-7)$$

en la cual, la \bar{f}_i^{ld} representa la fugacidad del componente i en la mezcla ideal.

Sin embargo, las soluciones reales no siguen esta regla en todo el intervalo de composiciones, por lo que debe introducirse un factor de corrección, llamado coeficiente de actividad, y que se define como

$$\gamma_i = \frac{\bar{f}_i}{\bar{f}_i^{ld}} \quad (A-8)$$

por lo cual

$$\bar{f}_i^{ld} = \frac{\bar{f}_i}{\gamma_i} \quad (A-9)$$

sustituyendo la \bar{f}_i^{ld} por su definición en la ecuación (A-7) se llega a la expresión

$$\bar{f}_l = \gamma_l x_l f_l \quad (\text{A-3})$$

aplicable a soluciones reales. Para dichas soluciones, la regla de Lewis y Randall puede escribirse

$$f_l = \left(\frac{\partial \bar{f}_l}{\partial x_l} \right)_{x=1} \quad (\text{A-10})$$

lo cual significa que

$$\lim_{x \rightarrow 1} \left(\frac{\bar{f}_l}{x_l} \right) = f_l \quad (\text{A-11})$$

Por lo tanto, se puede afirmar que la regla de Lewis y Randall es válida para mezclas reales en el límite cuando la $x_l \rightarrow 1$, y es aproximadamente correcta para valores de la x_l cercanos a la unidad.

De la ecuación (A-3), se tiene que la siguiente expresión define el coeficiente de actividad:

$$\gamma_l = \frac{\bar{f}_l}{x_l f_l} \quad (\text{A-12})$$

Dado que para una solución real, en el límite cuando la $x \rightarrow 1$ es aplicable la regla de Lewis y

Randall, se concluye que

$$\bar{f}_i \rightarrow x_i f_i \quad \text{si} \quad x_i \rightarrow 1 \quad (\text{A-13})$$

en consecuencia

$$\lim_{x_i \rightarrow 1} \gamma_i = 1 \quad (\text{A-14})$$

Por otra parte, si la presión es baja, puede asumirse que la fase vapor se comporta como una mezcla de gases ideales, entonces

$$\bar{\phi}_i^v \cong 1 \quad (\text{A-15})$$

$$\bar{\phi}_i^l \cong 1 \quad (\text{A-16})$$

desde $i = 1$ hasta $i = n$.

En estas condiciones, y para el equilibrio líquido-vapor, existe una ligera diferencia entre la P y la P_i^s . Además, en los líquidos el volumen molar es pequeño comparado con el producto Rt , por lo cual

$$\exp \int_{P_l^0}^P \frac{V_l^l}{RT} dP \approx 1 \quad (\text{A-17})$$

De lo anteriormente expuesto se concluye que para un sistema que tiene una presión baja, puede asumirse que la fase vapor se comportará como una mezcla de gases ideales ($\bar{\phi}_i \approx 1$ y $\bar{\phi}_i \approx 1$ desde $i = 1$ hasta $i = n$ componentes); y si además la fase líquida es una solución ideal, la relación de equilibrio puede expresarse

$$y_i P = x_i P_i^0 \quad (\text{A-18})$$

Esta ecuación se conoce como *la ley de Raoult*.

Las torres de enfriamiento de agua operan con una presión baja, por lo que en este caso se puede considerar que el sistema aire-vapor de agua se comporta como una mezcla de gases ideales. Por otra parte, los gases componentes del aire son muy poco solubles en el agua, y en consecuencia, para la fase líquida, la $x_A \rightarrow 1$. De esta forma

$$y_A P = P_A^s \quad (A-19)$$

por lo que

$$y_A = \frac{P_A^s}{P} \quad (A-20)$$

A.2. DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN (1-17).

El volumen molar de una mezcla puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\underline{V} = \sum_{i=1}^n x_i \bar{V}_i \quad (A-21)$$

en la cual la \bar{V}_i simboliza el volumen molar parcial del componente i , la x_i su fracción mol y la n el número de componentes.

La diferencial total de la ecuación que define la energía libre molar de Gibbs de un compuesto puro es:

$$d\bar{G}_i = -\bar{S}_i dt + \bar{V}_i dP \quad (A-22)$$

si la temperatura es constante, esta ecuación se reduce a la igualdad

$$dB_i = v_i dP \quad (A-23)$$

Para un gas ideal, se cumple que

$$v_i = \frac{Rt}{P} \quad (A-24)$$

entonces

$$dB_i = Rt \frac{dP}{P} \quad (t \text{ constante}) \quad (A-25)$$

por tanto

$$dB_i = Rtd(\ln P) \quad (A-26)$$

Con el fin de que esta última ecuación sea válida para gases reales, se requiere reemplazar a la presión por la fugacidad, de esta forma

$$dB_i = Rtd(\ln f_i) \quad (t \text{ constante}) \quad (A-27)$$

y para un componente en una solución

$$d\bar{B}_i = Rtd(\ln \bar{f}_i) \quad (t \text{ constante}) \quad (A-28)$$

Al combinar las ecuaciones (A-23) y (A-28) se encuentra que

$$Rtd(\ln f_i) = V_i dP \quad (t \text{ constante}) \quad (A-29)$$

Esta expresión puede escribirse también de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\partial(\ln f_i)}{\partial P} \right)_t = \frac{V_i}{Rt} \quad (A-30)$$

y para un componente en una solución

$$\left(\frac{\partial(\ln f_i)}{\partial P} \right)_{t,n} = \frac{V_i}{Rt} \quad (A-31)$$

donde se indica que la temperatura y la composición son constantes.

Ahora bien, en el apéndice (A-1) se demostró que para un gas ideal

$$\bar{f}_i^g = y_i P \quad (A-32)$$

Introduciendo esta ecuación en la (A-30) se

encuentra que en este caso se cumple la siguiente igualdad:

$$\left[\frac{\partial(\ln(y_i P))}{\partial P} \right]_{T,n} = \frac{\bar{V}_i^0}{Rt} \quad (\text{A-33})$$

obteniendo la derivada parcial del $\ln(y_i P)$ respecto de la P , manteniendo la temperatura y la composición constantes, se llega a la expresión

$$\frac{y_i}{y_i P} = \frac{\bar{V}_i^0}{Rt} \quad (\text{A-34})$$

por lo tanto

$$\bar{V}_i^0 = \frac{Rt}{P} \quad (\text{A-35})$$

Como se explicó anteriormente, el sistema aire-vapor de agua se considerará como una mezcla de gases ideales, por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (A-21), el volumen molar de la mezcla se define por la siguiente ecuación:

$$V = y_A \frac{Rt}{P} + y_B \frac{Rt}{P} \quad (\text{A-36})$$

así

$$\underline{V} = (y_A + y_B) \frac{Rt}{P} \quad (A-37)$$

como $y_B = 1 - y_A$, la ecuación (A-37) puede escribirse

$$\underline{V} = (y_A + (1 - y_A)) \frac{Rt}{P} \quad (A-38)$$

al multiplicar ambos lados de esta ecuación por la razón $1/(1 - y_A)$ se obtiene

$$\underline{V} = (\underline{y} + 1) \frac{Rt}{P} \quad (A-39)$$

que es la expresión para calcular el volumen molar húmedo, para obtener el volumen por unidad de masa de aire seco, se sustituye la \underline{y} por su definición en la igualdad (A-38).

De la ecuación (1-3) se tiene que

$$\underline{y} = y \frac{M_B}{M_A} \quad (A-40)$$

entonces

$$\gamma = \left(y \frac{M_B}{M_A} + 1 \right) \frac{Rt}{P} \quad (A-41)$$

dividiendo ambos miembros entre la M_B , se llega a

$$\gamma = \left(\frac{y}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right) \frac{Rt}{P} \quad (A-42)$$

Aquí se empleará el valor de la R igual a $8.3137 \text{ m}^3\text{Pa/gmolK}$, por lo cual la presión deberá darse en pascales, la temperatura en kelvin y el volumen húmedo se obtendrá en m^3/kg de aire seco.

A.3. DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN (1-18).

La expresión

$$H = \sum_{i=1}^n x_i \bar{H}_i \quad (A-43)$$

proporciona el valor de la entalpía molar de una mezcla. En esta ecuación, la \bar{H}_i simboliza la entalpía molar

parcial del componente i . La igualdad (A-43) también puede escribirse

$$H = \sum_{l=1}^n x_l H_l + \Delta H_m \quad (\text{A-44})$$

donde la H_l representa la entalpía molar de la sustancia i pura, y la ΔH_m el calor molar de mezclado; de esta expresión

$$\Delta H_m = H - \sum_{l=1}^n x_l H_l \quad (\text{A-45})$$

Al introducir la igualdad (A-45) en la (A-43) se concluye que

$$\Delta H_m = \sum_{l=1}^n x_l \bar{H}_l - \sum_{l=1}^n x_l H_l \quad (\text{A-46})$$

por lo cual

$$\Delta H_m = \sum_{l=1}^n x_l (\bar{H}_l - H_l) \quad (\text{A-47})$$

Para una solución que tiene una conducta ideal, el calor de mezclado es igual a cero, consecuentemente $\bar{H}_i = H_i$ y la ecuación (A-44) se reduce a la expresión

$$H = \sum_{i=1}^n x_i H_i \quad (A-48)$$

En el caso del sistema aire-vapor de agua se hará esta consideración, y el problema del cálculo de la entalpía de la mezcla se reduce al cómputo de las entalpías de cada componente. Así

$$H = y_A H_A + y_B H_B \quad (A-49)$$

Dividiendo ambos lados de esta ecuación entre $(1 - y_A)$ se llega a la definición de la entalpía molar de la mezcla:

$$\underline{x} = H_B + \frac{y_A}{1 - y_A} H_A \quad (A-50)$$

y en forma análoga, la entalpía expresada en unidades de energía por unidad de masa de aire seco se calcula con la ecuación

$$\mathcal{X} = H_B + \gamma/H_A \quad (A-51)$$

A.3.1. Entalpía del gas ideal.

Para un gas ideal se cumple la ecuación

$$dH^{\square} = C_p^{\square} dt \quad (A-52)$$

La integración de la ecuación (A-52) entre los límites de un estado de referencia a la t_0 y la P_0 y un estado a una temperatura y una presión cualesquiera da el siguiente resultado:

$$H^{\square} = H_0^{\square} + \int_{t_0}^t C_p^{\square} dt \quad (A-53)$$

Esta expresión es aplicable a fases tanto gaseosas como líquidas.

Si la magnitud del C_p es constante en el intervalo de temperaturas $[t, t_0]$, o cambia ligeramente de modo que pueda usarse un valor promedio sin ocasionar un error considerable, es posible escribir la ecuación (A-53) de la siguiente manera:

$$H^{\square} = H_0^{\square} + C_p (t - t_0) \quad (A-54)$$

Ya que el sistema aire-vapor de agua se considera una mezcla de gases ideales, es esta última expresión la que se empleará en el cálculo de las entalpías de los componentes.

Dado que las ecuaciones termodinámicas no permiten calcular los valores absolutos de la entalpía y que en la práctica sólo se requieren los valores relativos, las condiciones del estado de referencia —la T_0 y la P_0 — pueden seleccionarse de acuerdo con la conveniencia y puede asignarsele cualquier valor a la H_0^0 (es una práctica común asignarle el valor de cero).

A.3.2. Entalpía del aire seco.

Para el cálculo de la entalpía del aire se establece generalmente el siguiente estado de referencia:

gas seco a

$$T_{00} = 255.37 \text{ K}$$

y $P = 101325 \text{ Pa (1 atm)}$

Además $H_0^0 = 0.$

Puede emplearse un valor promedio del calor específico del aire, de modo que se considere independiente de la temperatura, así, a partir de la

ecuación (A-54) se tiene que

$$H_a = C_a(t - t_{a0}) \quad (A-55)$$

donde la t representa la temperatura del sistema.

A.3.3. Entalpía del vapor de agua.

Para el cálculo de la entalpía del vapor de agua, el estado de referencia más comúnmente usado es aquel en que este compuesto se encuentra como líquido saturado a 273.15 K y la presión correspondiente. En estas condiciones se le asigna a la entalpía el valor de cero.

Entonces, la suma de los siguientes términos proporcionará el valor de la entalpía del vapor de agua que se encuentre en ciertas condiciones de temperatura y presión:

a) Cambio en la entalpía desde el estado de referencia hasta aquel en que el líquido se encuentra saturado a la presión del vapor en cuestión y a la temperatura correspondiente.

b) Calor latente de evaporación evaluado en las últimas condiciones mencionadas de temperatura y presión.

c) Cambio en la entalpía desde el estado en que el

agua se encuentra como vapor saturado a dicha temperatura y presión, hasta las condiciones en que se halla el vapor cuyas propiedades se calculan.

En la figura A-1 se presenta un diagrama clásico de entalpía-temperatura, que servirá de base para mostrar un caso que ejemplifique lo hasta aquí escrito.

Se tiene un vapor sobrecalentado con las características que representa el punto A y será sometido a los siguientes procesos:

1. Enfriamiento a presión constante, que lo llevará a alcanzar las características del punto B (vapor saturado y temperatura de ebullición t_b). El cambio producido en la entalpía es igual a $H_1 - H_2$, y puede calcularse con la ecuación (A-54), para lo cual, se usará un valor promedio del calor específico del vapor de agua.

2. Enfriamiento a presión constante que provocará que el vapor tome las características del punto C (líquido saturado a t_b). Cambio en la entalpía = $H_2 - H_3$ = λ_b .

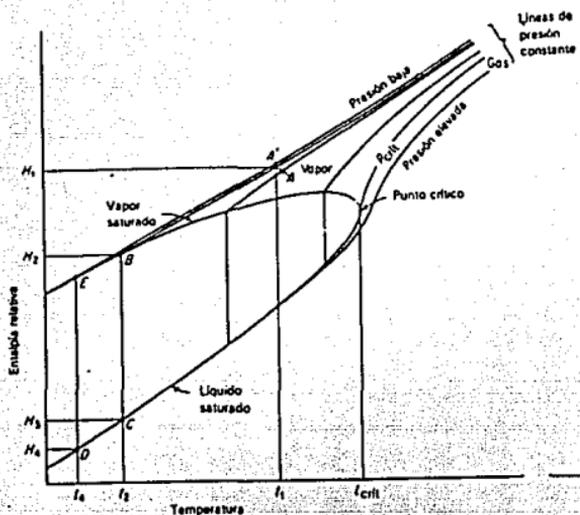


Fig. A-1. Diagrama Entalpía-temperatura de una sustancia pura.

3. Enfriamiento como líquido saturado hasta llegar al punto *D* (estado de referencia). Este proceso, por supuesto, ya no será a presión constante. La diferencia $H_3 - H_4$ proporciona el cambio ocasionado en la entalpía. Para computar esta diferencia es posible emplear un valor promedio del calor específico del agua líquida y aplicar la expresión (A-54).

Entonces, la entalpía en el punto *A* puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$H_A = C_A(t - t_e) + \lambda_{lb} + C_{AL}(t_e - t_{e0}) \quad (A-56)$$

donde la t es la temperatura del vapor en el punto A ; la t_0 , la temperatura de ebullición (o condensación); la λ_{1b} , el calor latente de evaporación a la t_0 ; la C_A y la C_{AL} , los calores específicos del agua de las fases vapor y líquida, respectivamente; y la t_{00} , la temperatura de referencia. Para el vapor saturado, el término $C_A(t - t_0)$ será igual a cero, ya que se cumple la igualdad $t = t_0$ en este caso.

Como puede verse en el diagrama de la figura A-1, el punto A está sobre la línea de la presión de saturación a la t_0 , y el punto A'' sobre la línea de la presión de saturación a la temperatura de referencia; sin embargo, si la presión en el punto A no es alta, se cumple la relación $H_A \cong H_{A''}$. Este hecho facilita grandemente el cómputo de la entalpía del vapor, ya que podrá hacerse siguiendo la trayectoria $A''-E-D$, lo cual se traduce en la ecuación

$$H_A = C_A (t - t_0) + \lambda_{10} \quad (A-57)$$

A.3.4. Entalpía de la mezcla.

Al sustituir las ecuaciones (A-54) y (A-57) en la (A-51), se obtiene la expresión para el cómputo de la entalpía de la mezcla

$$Q = C_B(t - t_{B0}) + \gamma(C_A(t - t_{A0}) + \lambda_0) \quad (A-58)$$

Aquí se emplearán los siguientes valores:

$$C_B = 1004.832 \text{ J/kg K}$$

$$C_A = 1884.06 \text{ J/kg K}$$

$$C_{AL} = 4186.8 \text{ J/kg K}$$

$$\lambda_0 = 2501613 \text{ J/kg}$$

A.4. DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN (1-19).

El calor específico molar de una mezcla se define como

$$C_P = \sum_{i=1}^n x_i \bar{C}_{Pi} \quad (A-59)$$

donde

$$\bar{C}_{Pi} = \left(\frac{\partial \bar{H}_i}{\partial t} \right)_{P,x} \quad (A-60)$$

los subíndices P y x indican la constancia de la presión y la composición, respectivamente.

Para una solución ideal es cierta la igualdad $\bar{H}_i = H_i$, por lo tanto se cumple que $\bar{C}_{Pi} = C_{Pi}$. Según se

expuso en el apéndice A-1, se hará esta consideración para el sistema aire-vapor de agua, siendo así, el calor específico molar de la mezcla se escribe

$$C_p = y_A C_A + y_B C_B \quad (A-61)$$

dado que $y_B = 1 - y_A$, la ecuación anterior se transforma en

$$C_p = y_A C_A + (1 - y_A) C_B \quad (A-62)$$

al multiplicar ambos lados por la razón $1/(1 - y_A)$ se obtiene la expresión para el calor húmedo molar

$$\underline{c} = \frac{y}{1 - y} C_A + C_B \quad (A-63)$$

y en forma análoga, el calor húmedo, en unidades de energía por unidad de masa de aire seco se define como

$$c = \frac{y}{1 - y} C_A + C_B \quad (A-64)$$

A.5. DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN (1-21).

A partir del proceso general de humidificación presentado en la figura A-2, podrá

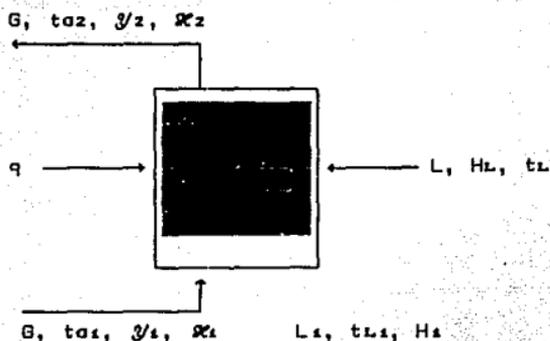


Fig. A-2. *Proceso de saturación adiabática.*

obtenerse la ecuación que relaciona la temperatura de saturación adiabática con la humedad del aire.

Un balance de masa en la columna muestra que

$$L = G(y_2 - y_1) \quad (A-65)$$

y un balance de entalpía se expresa

$$q + LH_L + Gx_1 = Gx_2 \quad (A-66)$$

al reordenar esta ecuación el resultado es

$$q + LHL = G(x_2 - x_1) \quad (A-67)$$

Como resultado del transporte de masa y de energía, se incrementa la humedad del aire que circula a través de la torre; ahora bien, dado que el proceso ha de ser adiabático, se requiere que no exista una transferencia de calor con el medio, por lo cual $q = 0$. De acuerdo con esta consideración, la ecuación (A-67) puede escribirse

$$LHL = G(x_2 - x_1) \quad (A-68)$$

Combinando las ecuaciones (A-65) y (A-68) y simplificando se obtiene

$$HL(y_2 - y_1) = x_2 - x_1 \quad (A-69)$$

Esta ecuación puede desarrollarse empleando la definición de la entalpía de una sustancia pura —expresión (A-54)—, y la definición de la entalpía de una mezcla —igualdad (A-58)—, entonces

$$CAL(t_{L2} - t_{A0})(y_2 - y_1) = \left[C_B(t_{A2} - t_{B0}) + y_2[C_A(t_{A2} - t_{A0}) + \lambda_0] \right] - \left[C_B(t_{A1} - t_{A0}) + y_1[C_A(t_{A1} - t_{A0}) + \lambda_0] \right]$$

(A-70)

Ahora, si se asume que la mezcla que sale de la torre ha alcanzado el equilibrio y que por lo tanto está saturada, existirán las siguientes condiciones:

$$t_{a2} = t_{sa},$$

$$\text{humedad} = y_{sa},$$

$$\text{Entalpía} = X_{sa}.$$

El subíndice *sa* indica que se trata de las propiedades conseguidas mediante el proceso de saturación adiabática. Con base en lo anterior, la ecuación (A-70) puede escribirse

$$CAL(t_{sa} - t_{a0})(y_{sa} - y_i) = C_s(t_{sa} - t_{s0}) + y_{sa}[CA(t_{sa} - t_{a0}) + \lambda_0] - C_s(t_{s1} - t_{s0}) + y_i[CA(t_{s1} - t_{a0}) + \lambda_0]$$

(A-71)

Reestructurando la ecuación y sustrayendo el producto $y_i CA t_{sa}$ en ambos lados se llega a la igualdad

$$(C_s + y_i CA)(t_{s1} - t_{sa}) = (y_{sa} - y_i)[CA(t_{sa} - t_{a0}) + \lambda_0] - CAL(t_{sa} - t_{a0})$$

(A-72)

de acuerdo con la ecuación (A-64) se tiene que

$$\mathcal{Q}(t_{s1} - t_{sa}) = (y_{sa} - y_1) [CA(t_{sa} - t_{a0}) + \lambda_0 - CAL(t_{sa} - t_{a0})] \quad (A-73)$$

Si se hace referencia al diagrama de la figura A-1 podrá verse que el término entre paréntesis cuadrados es igual al calor latente de evaporación evaluado a la t_{sa} : λ_{sa} , de esta forma

$$\mathcal{Q}(t_s - t_{sa}) = (y_{sa} - y_1)\lambda_{sa} \quad (A-74)$$

y

$$t - t_{sa} = (y_{sa} - y_1) \frac{\lambda_{sa}}{g} \quad (A-75)$$

A.6. DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN (1-29).

La ley de Fick para la transferencia de masa establece que

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} = -CD_{AB} \frac{dx_A}{dz} \quad (A-76)$$

En esta ecuación, la J_A es el flux molar del componente A con relación a la velocidad molar promedio de todos los demás componentes; la D_{AB} es el coeficiente

de la difusividad de la sustancia A en la B, la C es el número total de moles por unidad de volumen (concentración); la C_A es la concentración del componente A y la x_A su fracción mol; la z es la distancia en la dirección de la difusión.

El flux del componente A respecto de un lugar fijo en el espacio se expresa

$$N_A = N x_A + J_A \quad (A-77)$$

donde

$$N = N_A + N_B \quad (A-78)$$

de aquí .

$$N_A = (N_A + N_B) \frac{C_A}{C} - D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (A-79)$$

Esta ecuación puede integrarse fácilmente si la difusión ocurre únicamente en la dirección z, y si las cantidades N_A y N_B son constantes (estado estacionario) y el coeficiente D_{AB} también lo es. Al separar las variables, la ecuación (A-79) se escribe

$$\frac{-dC_A}{C_{NA} - (N_A + N_B)C_A} = \frac{dz}{C_{DAB}} \quad (A-80)$$

y puede integrarse de la C_{A1} a la C_{A2} y de la z_1 a la z_2

$$\int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{-dC_A}{C_{NA} - (N_A + N_B)C_A} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{C_{DAB}} \quad (A-81)$$

$$\left[\frac{1}{N_A + N_B} \ln [C_{NA} - (N_A + N_B)C_A] \right]_{C_{A1}}^{C_{A2}} = \frac{z_2 - z_1}{C_{DAB}} \quad (A-81)$$

sea $z = z_2 - z_1$, entonces

$$\frac{1}{N_A + N_B} \ln \frac{C_{NA} - C_{A2}(N_A + N_B)}{C_{NA} - C_{A1}(N_A + N_B)} = \frac{z}{C_{DAB}} \quad (A-83)$$

esta ecuación puede escribirse

$$\frac{1}{N_A + N_B} \ln \frac{N_A/(N_A + N_B) - C_{A2}/C}{N_A/(N_A + N_B) - C_{A1}/C} = \frac{z}{C_{DAB}} \quad (A-84)$$

al multiplicar ambos lados por la relación $C_{DAB}z$ el resultado es

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{C_{DAB}}{z} \ln \frac{N_A/(N_A + N_B) - C_{A2}/C}{N_A/(N_A + N_B) - C_{A1}/C} \quad (A-85)$$

Para la difusión del componente A a través del B estático, la ecuación (A-85) se reduce a

$$N_A = \frac{C_{DAB}}{z} \ln \frac{1 - C_{A2}/C}{1 - C_{A1}/C} \quad (A-86)$$

que puede expresarse en términos de las fracciones mol de la siguiente manera:

$$N_A = \frac{C_{DAB}}{z} \ln \frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \quad (1-29)$$

A.7. INTEGRACIÓN DE LA ECUACIÓN (1-23).

$$k \frac{dt^2}{dz^2} - (N_A C_A + N_B C_B) \frac{dt}{dz} = 0 \quad (1-23)$$

Esta es una ecuación homogénea de segundo orden y el método de solución es el siguiente:

Se define el polinomio auxiliar

$$kD^2 - (N_A C_A + N_B C_B)D = 0 \quad (A-87)$$

dividiendo entre el coeficiente k la expresión anterior, se obtiene la siguiente ecuación:

$$D^2 - \frac{(N_A C_A + N_B C_B)D}{k} = 0 \quad (A-88)$$

factorizando se llega a la igualdad

$$D \left(D - \frac{(N_A C_A + N_B C_B)}{k} \right) = 0 \quad (A-89)$$

las raíces de este polinomio son las siguientes:

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 = \frac{(N_A C_A + N_B C_B)}{k}$$

De este modo, la solución general se expresa

$$t = c_1 e^{\alpha_1 z} + c_2 e^{\alpha_2 z} \quad (\text{A-90})$$

sustituyendo la α_1 y la α_2 por sus equivalencias en esta última igualdad se llega a

$$t = c_1 + c_2 e^{\frac{(N_A C_A + N_B C_B)}{k} z} \quad (\text{A-91})$$

Si se introduce el factor C_0 , la ecuación (A-91) puede escribirse

$$t = c_1 + c_2 e^{\frac{C_0 z}{z_0}} \quad (\text{A-92})$$

ahora bien, las condiciones iniciales y en la frontera son:

$$t = t_1 \text{ para } z = 0$$

$$t = t_2 \text{ para } z = z_0,$$

por lo cual

$$t_1 = c_1 + c_2 \quad (\text{A-93})$$

$$\text{y} \quad t_2 = c_1 + c_2 e^{C_0} \quad (\text{A-94})$$

sustrayendo la ecuación (A-94) de la (A-93) resulta que

$$t_1 - t_2 = c_2 - c_2 e^{\frac{C_0}{z_0}} = c_2(1 - e^{\frac{C_0}{z_0}}) \quad (\text{A-95})$$

de donde

$$c_2 = \frac{t_1 - t_2}{1 - e^{\frac{C_0}{z_0}}} \quad (\text{A-96})$$

Despejando la c_1 de la ecuación (A-93) y sustituyendo la c_2 por su definición se tiene que

$$c_1 = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{1 - e^{\frac{C_0}{z_0}}} \quad (\text{A-97})$$

reemplazando la c_1 y la c_2 por sus equivalencias en la ecuación (A-91) se obtiene

$$t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{1 - e^{\frac{C_0}{z_0}}} + \frac{t_1 - t_2}{1 - e^{\frac{C_0}{z_0}}} e^{\frac{C_0 z}{z_0}} \quad (\text{A-98})$$

Reordenando

$$t = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{e^{\frac{C_0 z}{z_0}} - 1}{e^{C_0} - 1} \quad (1-24)$$

A.8. DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN (1-27)

$$q_0 = kt(0) = h(t_2 - t_1) \frac{C_0}{e^{C_0} - 1} \quad (1-27)$$

Para obtener esta igualdad, primero debe encontrarse la función $t'(z)$ y después evaluarla en la distancia $z = 0$. Así, de la ecuación (1-24) se tiene que

$$t'(z) = t_2 - t_1 \frac{\left(e^{C_0} - 1 \right) \left(e^{\frac{C_0 z}{z_0}} \frac{C_0}{z_0} \right)}{\left(e^{C_0} - 1 \right)^2} \quad (A-99)$$

Simplificando esta relación matemática se llega a la siguiente ecuación:

$$t'(z) = t_2 - t_1 \frac{e^{\frac{Coz}{z_0}} - \frac{Co}{z_0}}{e^{Co} - 1} \quad (A-100)$$

Entonces, si $z = 0$ se tiene que

$$t'(0) = t_2 - t_1 \frac{\frac{Co}{z_0}}{e^{Co} - 1} \quad (A-101)$$

esta expresión también puede escribirse

$$t'(0) = t_2 - t_1 \frac{Co}{z_0 (e^{Co} - 1)} \quad (A-102)$$

Por la ecuación (1-26) se sabe que $z_0 = k/h$,
consecuentemente

$$t'(0) = t_2 - t_1 \frac{h Co}{k (e^{Co} - 1)} \quad (A-103)$$

Es así que

$$q_0 = kt'(0) = k \left[t_2 - t_1 \frac{h \cdot C_0}{k \left[\frac{h \cdot C_0}{k} - 1 \right]} \right] \quad (A-104)$$

Simplificando esta igualdad se obtiene la ecuación buscada.

APENDICE B

LA CARTA PSICROMETRICA

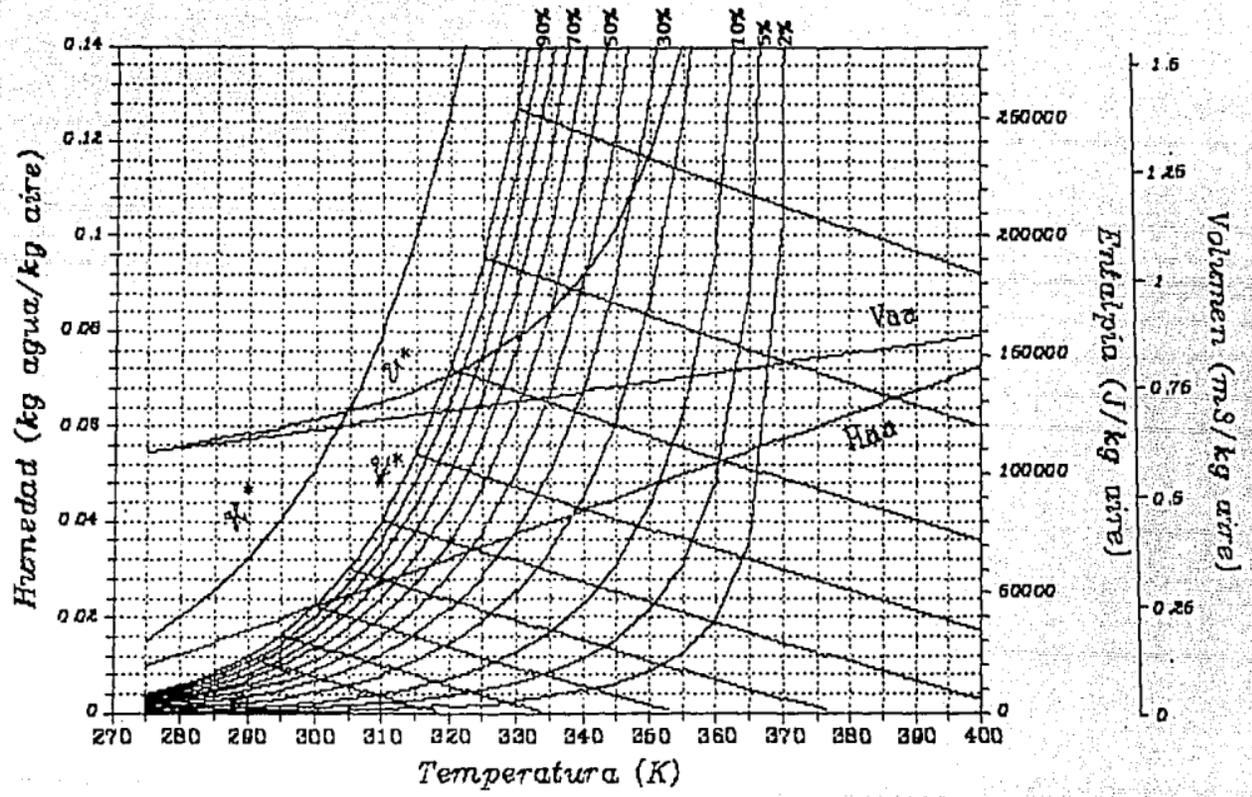
tbase	γ^*	λ_0	90%	t_a	80%
K	$\frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire}}$	$\frac{J}{\text{kg agua}}$			
275	0.004189	2497193.8	0.003770	276.0339	0.003351
280	0.006002	2485331	0.005401	281.4696	0.004801
285	0.008479	2473701	0.007631	287.0579	0.006783
290	0.011828	2461605.8	0.010645	292.8409	0.009462
295	0.016313	2449975.8	0.014681	298.8709	0.013050
300	0.022271	2438113.2	0.020044	305.2082	0.017817
305	0.030139	2426252.4	0.027125	311.9252	0.024111
310	0.040486	2414620.6	0.036437	319.1067	0.032389
315	0.054069	2402292.8	0.048662	326.8457	0.043255
320	0.071917	2390430.2	0.064725	335.2570	0.057534
325	0.095469	23785676	0.085922	344.6332	0.076375
330	0.126810	2366239.8	0.114129	354.5982	0.101448
335	0.169087		0.152178		0.135269
340	0.227315		0.204583		0.181852
345	0.310032		0.279029		0.248025
350	0.433108		0.389797		0.346486
355	0.629841		0.566857		0.503873
360	0.984101		0.885690		0.787280
365	1.785418		1.606876		1.428335
370	5.160196		4.644176		4.128157

t_3	70%	t_4	60%	t_5	50%
277.0695	0.002932	278.1067	0.002513	279.1456	0.002094
282.9425	0.004201	284.4187	0.003601	285.8982	0.003001
289.1224	0.005935	291.1933	0.005087	293.2708	0.004239
295.6943	0.008279	298.5601	0.007097	301.4385	0.005914
302.7649	0.011419	306.6823	0.009787	310.6232	0.008156
310.4585	0.015590	315.7515	0.013363	321.0875	0.011135
318.9253	0.021097	326.0015	0.018083	333.1551	0.015069
328.3438	0.028340	337.7141	0.024291	347.2204	0.020243
338.9136	0.037848	351.2100	0.032441	363.7415	0.027034
350.8855	0.050342	366.8992	0.043150	383.3124	0.035958
720.3617	0.066828	927.4763	0.057281	1141.286	0.047734
380.1792	0.088767	406.8032	0.076086	434.5351	0.063405
	0.118361		0.101452		0.084543
	0.159120		0.136389		0.113657
	0.217022		0.186019		0.155016
	0.303175		0.259864		0.216554
	0.440889		0.377905		0.314920
	0.688870		0.590460		0.492050
	1.249793		1.071251		0.892709
	3.612137		3.096117		2.580098

ta	40%	tr	30%	ts	20%
280.1860	0.001675	281.2281	0.001254	282.2718	0.000837
287.3811	0.002400	288.8672	0.001800	290.3567	0.001200
295.3548	0.003391	297.4454	0.002543	299.5426	0.001695
304.3295	0.004731	307.2332	0.003548	310.1497	0.002365
314.5879	0.006525	318.5765	0.004893	322.5893	0.003262
326.4672	0.008908	331.8912	0.006681	337.3598	0.004454
340.3873	0.012055	347.6995	0.009041	355.0929	0.006027
356.8658	0.016194	366.6533	0.012145	376.5861	0.008097
376.5147	0.021627	389.5369	0.016220	402.8153	0.010813
400.1402	0.028767	417.3987	0.021575	435.1045	0.014383
1362.123	0.038187	1590.337	0.028640	1826.305	0.019093
463.4457	0.050724	493.6117	0.038043	525.1167	0.025362
	0.067634		0.050726		0.033817
	0.090926		0.068194		0.045463
	0.124012		0.093009		0.062006
	0.173243		0.129932		0.086621
	0.251936		0.188952		0.125968
	0.393640		0.295230		0.196820
	0.714167		0.535625		0.357083
	2.064078		1.548058		1.032039

t_0	10%	t_{10}	5%	t_{11}	2%
283.3172	0.000418	284.3642	0.000209	284.8883	0.000083
291.8495	0.000600	293.3457	0.000300	294.0951	0.000120
301.6464	0.000847	303.7570	0.000423	304.8148	0.000169
313.0791	0.001182	316.0214	0.000591	317.4975	0.000236
326.6265	0.001631	330.6883	0.000815	332.7285	0.000326
342.8738	0.002227	348.4336	0.001113	351.2308	0.000445
362.5690	0.003013	370.1290	0.001506	373.9410	0.000602
386.6674	0.004048	396.9007	0.002024	402.0753	0.000809
416.3575	0.005406	430.1716	0.002703	437.1832	0.001081
453.2753	0.007191	471.9296	0.003595	481.4442	0.001438
2070.429	0.009546	2323.139	0.004773	2452.857	0.001909
558.0518	0.012681	592.5168	0.006340	610.3567	0.002536
	0.016908		0.008454		0.003381
	0.022731		0.011365		0.004546
	0.031003		0.015501		0.006200
	0.043310		0.021655		0.008662
	0.062984		0.031492		0.012596
	0.098410		0.049205		0.019682
	0.178541		0.089270		0.035708
	0.516019		0.258009		0.103203

t_{12}	α^* $\frac{J}{kg \text{ air}}$	α_{aa}	γ^* $\frac{m^3}{kg \text{ air}}$	γ_{aa}
285.2030	30359.28	19722.61	0.783647	0.778392
294.5451	40040.03	24746.77	0.800199	0.792535
305.4502	51456.07	29770.93	0.817699	0.806678
318.3847	65156.92	34795.09	0.836464	0.820822
333.9556	81846.81	39819.25	0.856910	0.834965
352.9148	102431.2	44843.41	0.879576	0.849108
376.2385	128083.2	49867.57	0.905169	0.863251
405.1990	160340.1	54891.73	0.934625	0.877394
441.4242	201250.8	59915.89	0.969201	0.891537
487.2143	253606.7	64940.05	1.010619	0.905681
2531.798	321317.1	69964.21	1.061304	0.919824
621.2633	410048.7	74988.37	1.124782	0.933967
	528370.2	80012.53	1.206393	0.948110
	689934.8	85036.69	1.314659	0.962253
	917995.3	90060.85	1.464104	0.976396
	1255770.4	95085.01	1.681724	0.990540
	1793953.6	100109.1	2.024180	1.004683
27609648.2		105133.3	2.634171	1.018826
	4945354.1	110157.4	4.004314	1.032969
	14138420	115181.6	9.752441	1.047112



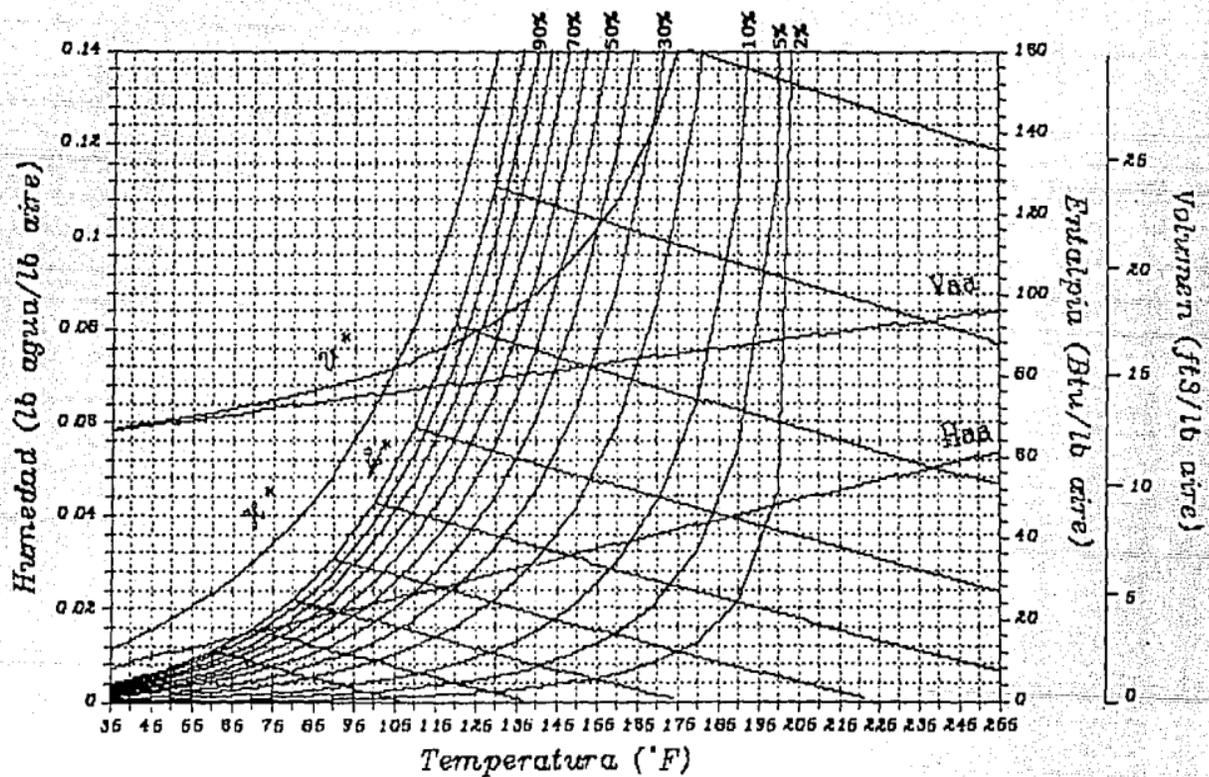
t base	γ°	λ_0	90%	t z	80%
$^{\circ}\text{F}$	$\frac{\text{lb agua}}{\text{lb aire}}$	$\frac{\text{Btu}}{\text{lb agua}}$			
35	0.00413	1073.8	0.003720	36.83679	0.003307
40	0.00505	1071	0.004552	42.23808	0.004046
50	0.00747	1065.3	0.006725	53.27583	0.005978
60	0.01086	1059.7	0.009777	64.71062	0.008691
70	0.01556	1054	0.014010	76.66145	0.012453
80	0.02202	1048.4	0.019820	89.27547	0.017618
90	0.03081	1042.7	0.027734	102.7266	0.024653
100	0.04273	1037.1	0.038462	117.2250	0.034188
110	0.05886	1031.4	0.052977	133.0110	0.047091
120	0.08073	1025.6	0.072659	150.3632	0.064586
130	0.11059	1019.8	0.099533	169.6020	0.088474
140	0.15190	1014	0.136715	191.0851	0.121525
150	0.21032	1008.2	0.189289		0.168256
160	0.29577	1002.2	0.266194		0.236617
170	0.42758	996.2	0.384824		0.342066
180	0.64914	990.2	0.584234		0.519319
190	1.08263	984.1	0.974372		0.866108
200	2.25712	977.9	2.031413		1.805700
210	15.2625	971.5	13.73627		12.21002

ts	70%	t4	60%	ts	50%
38.67642	0.002893	40.51888	0.002480	42.36419	0.002066
44.48037	0.003540	46.72689	0.003034	48.97765	0.002529
56.56074	0.005231	59.85478	0.004483	63.15796	0.003736
69.44012	0.007604	74.18862	0.006518	78.95623	0.005432
83.36090	0.010896	90.09868	0.009340	96.87511	0.007783
98.62509	0.015415	108.0497	0.013213	117.5503	0.011011
115.5938	0.021571	128.6039	0.018489	141.7593	0.015408
134.7094	0.029915	152.4592	0.025641	170.4804	0.021367
156.4887	0.041204	180.4475	0.035318	204.9024	0.029431
181.5463	0.056512	213.5831	0.048439	246.5090	0.040366
210.6127	0.077414	253.1086	0.066355	297.1719	0.055296
244.5403	0.106334	300.5343	0.091143	359.2526	0.075953
	0.147224		0.126192		0.105160
	0.207040		0.177463		0.147885
	0.299308		0.256549		0.213791
	0.454404		0.389489		0.324574
	0.757844		0.649581		0.541317
	1.579988		1.354275		1.128562
	10.68377		9.157519		7.631266

t6	40%	t7	30%	t8	20%
44.21234	0.001653	46.06335	0.001240	47.91723	0.000826
51.23266	0.002023	53.49192	0.001517	55.75547	0.001011
66.47034	0.002989	69.79195	0.002241	73.12282	0.001494
83.74308	0.004345	88.54926	0.003259	93.37491	0.002172
103.6905	0.006226	110.5452	0.004670	117.4396	0.003113
127.1278	0.008809	136.7831	0.006606	146.5172	0.004404
155.0624	0.012326	168.5159	0.009244	182.1221	0.006163
188.7793	0.017094	207.3623	0.012820	226.2361	0.008547
229.8688	0.023545	255.3630	0.017659	281.4020	0.011772
280.3617	0.032293	315.1807	0.024219	351.0080	0.016146
342.8910	0.044237	390.3609	0.033177	439.6842	0.022118
420.8987	0.060762	485.6973	0.045571	553.8966	0.030381
	0.084128		0.063096		0.042064
	0.118308		0.088731		0.059154
	0.171033		0.128274		0.085516
	0.259659		0.194744		0.129829
	0.433054		0.324790		0.216527
	0.902850		0.677137		0.451425
	6.105013		4.578759		3.052506

tp	10%	t10	5%	t11	2%
49.77397	0.000413	51.63359	0.000206	52.56448	0.000082
58.02329	0.000505	60.29542	0.000252	61.43309	0.000101
76.46301	0.000747	79.81254	0.000373	81.49083	0.000149
98.22014	0.001086	103.0850	0.000543	105.5249	0.000217
124.3741	0.001556	131.3489	0.000778	134.8515	0.000311
156.3310	0.002202	166.2255	0.001101	171.2033	0.000440
195.8838	0.003081	209.8036	0.001540	216.8237	0.000616
245.4077	0.004273	264.8840	0.002136	274.7388	0.000854
308.0033	0.005886	335.1855	0.002943	349.0003	0.001177
387.8881	0.008073	425.8681	0.004036	445.2861	0.001614
490.9716	0.011059	544.3428	0.005529	571.8499	0.002211
625.7714	0.015190	701.6273	0.007595	741.1528	0.003038
	0.021032		0.010516		0.004206
	0.029577		0.014788		0.005915
	0.042758		0.021379		0.008551
	0.064914		0.032457		0.012982
	0.108263		0.054131		0.021652
	0.225712		0.112856		0.045142
	1.526253		0.763126		0.305250

t_{12}	α° <u>Btu</u> <u>lb aire</u>	α_{aa}	γ° <u>ft²</u> <u>lb aire</u>	V_{aa}
53.12336	12.91120	8.4	12.54333	12.46034
62.11622	15.13105	9.6	12.68877	12.58620
82.49893	20.20552	12	12.99250	12.83793
106.9912	26.37774	14.4	13.31876	13.08965
136.9580	34.03250	16.8	13.67598	13.34137
174.1999	43.67804	19.2	14.07539	13.59310
221.0552	55.99108	21.6	14.53220	13.84482
280.6895	71.88558	24	15.06713	14.09655
357.3622	92.62189	26.4	15.70901	14.34827
457.0775	119.9876	28.8	16.49901	14.6
588.6268	156.6122	31.2	17.49796	14.85172
765.4055	206.5453	33.6	18.79983	15.10344
	276.3970	36	20.55828	15.35517
	377.7980	38.4	23.04391	15.60689
	533.3758	40.8	26.78337	15.85862
	793.9409	43.2	32.95937	16.11034
	1302.539	45.6	44.90154	16.36206
	2678.680	48	77.02952	16.61379
	17907.56	50.4	431.5824	16.86551



LISTA DE SIMBOLOS

A	Área interfacial, m^2
A	Pérdidas de agua por arrastre, kg/s
a	Área interfacial por unidad de volumen, m^2/m^3
B	Energía libre de Gibbs, J/kg
C	Calor específico, J/Kkg
C	Concentración, moles/ m^3
\mathcal{C}	Calor húmedo, J/K kg aire
C_0	Factor de corrección de Ackermann.
D_{AB}	Coeficiente de la difusividad del componente A en el B
E	Pérdidas de agua por evaporación, kg/s
F	Gasto volumétrico de aire, m^3/s
\mathcal{F}	Flux molar relativo a un punto fijo, mol/ m^2s
f	Fugacidad, Pa

$f()$	Denota una función matemática
	Factor de la ecuación (3-109)
G	masa velocidad de aire, $\text{kg/m}^2\text{s}$
G_T	Flujo másico de aire, kg/s
H	Entalpía, J/kg
\mathcal{H}	Entalpía de una mezcla de aire y vapor de agua, J/kg aire
h	Coeficiente de la transferencia de calor por convección, $\text{J/m}^2\text{sK}$
I	Constante de integración (igualdad (3-49))
J_A	flux molar del componente A respecto de la velocidad molar promedio, $\text{mol/m}^2\text{s}$
J_m	Grupo adimensional de la transferencia de masa
J_h	Grupo adimensional de la transferencia de calor
K	Coeficiente global de la transferencia de masa, $\text{kg/m}^2\text{s}$
k_v	Coeficiente de la transferencia de masa en la fase gaseosa, $\text{kg/m}^2\text{s}$
k'	Coeficiente de la transferencia de masa en la fase gaseosa, $\text{gmol/m}^2\text{sPa}$
k	Constante de la conductividad térmica en la fase gaseosa, $\text{J/m}^2\text{sK/m}$
L	masa velocidad de agua, $\text{kg/m}^2\text{s}$
Le	Número de Lewis (Pr/Sc)

L_T	Flujo másico de agua, kg/s
LUT_0	Longitud de la unidad de transferencia correspondiente a la fase gaseosa, m
LUT_L	Longitud de la unidad de transferencia correspondiente a la fase líquida, m
M	Intervalos en el eje Y de una torre
m	relación $(H^* - H') / (t_L - t')$
N	Intervalos en el eje X de una torre
n	número de moles
n_c	número de componentes
NUT_0	Número de unidades de transferencia correspondientes a la fase gaseosa
NUT_L	Número de unidades de transferencia correspondientes a la fase líquida
P	Presión, Pa
P_i	Presión parcial del componente i , Pa
Pr	Número de Prandtl
P	Purga de agua, kg/s
Q	Carga térmica, J/s
q	Calor, J
R	Constante universal de los gases: $8.3137 \text{ m}^3\text{Pa/gmolK}$
Δ	Rango de enfriamiento: $t_x - t_s$, K
R	Rapidez de la reposición de agua, kg/s
λ	kg sólidos en el agua circulante/kg sólidos en el agua de reposición.

S	Entropía, J/kgK
Sc	Número de Schmidt
S	Saturación porcentual
Sr	Saturación relativa
Srp	Saturación relativa porcentual
γ	kg sólidos disueltos/kg agua circulante
γ_r	kg sólidos disueltos/kg agua de reposición
t	temperatura, K
V	Volumen, m ³
γ	Volumen húmedo, m ³ /kg aire
X	Anchura del empaque, m
x	Distancia en el eje X de una torre, m
x _l	fracción mol del componente i en la fase líquida de un sistema
x	razón x/X
Y	Altura del empaque, m
y	Distancia en el eje Y de una torre, m
y _l	fracción mol de un componente en la fase vapor de un sistema
y	razón y/Y
γ	Humedad absoluta, kg agua/kg aire
Z	Profundidad del empaque, m
z	Distancia en la dirección de la difusión, m
z _o	Espesor de la película de fluido
	Coefficiente de desempeño: KaV/Lr o KaV/Gr

β	Factor de corrección para la analogía entre la transferencia de masa y la de calor
γ	Coefficiente de actividad
Δ	Incremento
η	Eficiencia
λ	Calor latente de evaporación
ϕ	Coefficiente de fugacidad

Superíndices:

id	Propiedades de la solución ideal
l	Propiedades de la fase líquida
s	Propiedades de un sistema en el estado de saturación (ha alcanzado el equilibrio líquido-vapor)
v	Propiedades de la fase vapor
'	Propiedades existentes en la interfase
*	Propiedades que posee un sistema cuando ha alcanzado el equilibrio líquido-vapor
o	Propiedades del gas ideal

Subíndices

A	Propiedades del agua
---	----------------------

aa	Propiedades del aire seco
a	Propiedades del aire
bh	Propiedades calculadas a la temperatura de bulbo húmedo
bs	Propiedades computadas a la temperatura de bulbo seco
c	Propiedad estática
calc	Propiedades calculadas
ò	disponible
e	Propiedades a la entrada de la torre
e	Propiedades del punto de ebullición
g	Propiedades del gas
i	Propiedad del componente i
L	Propiedades del líquido
o	Propiedades de un estado de referencia
r	requerido
s	Propiedades a la salida de la torre
sa	Propiedades obtenidas mediante un proceso de saturación adiabática.
T	Propiedades totales del sistema
π	Propiedades promedio
1	Propiedades al inicio de un proceso
2	Propiedades al final de un proceso

Otras señalizaciones

Las propiedades molares se señalan subrayando el símbolo que las representa.

Tendrán una raya sobre ellos los símbolos que representan las propiedades molares parciales o de las sustancias que se encuentran en una mezcla.

Si un símbolo no posee ninguna de las dos señalizaciones mencionadas se referirá a una propiedad másica.

BIBLIOGRAFIA

1. Burger R., *Cooling tower drift elimination*; Chem. Eng. Prog.; 71 (7), 73 (1975).
2. Burger R., *Conservation strategies for cooling towers*; Chem. Eng. Prog.; 79 (12), 33 (1983).
3. Burger R., *Retrofit your cooling tower to save energy and money*; Hydrocarbon Processing; 64 (7), 67 (1985).
4. Badger W.L. y J.T. Banchero, *Introducción a la Ingeniería química*; Mc Graw-Hill book Co.; México D.F.; 1978.
5. Balzhiser R.E, M.R. Samuels y J.D. Eliassen, *Termodinámica química para ingenieros*; Prentice Hall Internacional; Madrid, España; 1980.

6. Foust A.S., L.A. Wenzel, C.W. Clump, L. Maus y L.B. Andersen, *Principios de operaciones unitarias*; C.E.C.S.A.; México, D.F.; 1985
7. Inazume H. y S. Kageyama, *A successive graphical method of design of a cross-flow cooling tower*; Chem. Eng. Sci.; 30, 717 (1975).
8. Kern D.Q., *Procesos de transferencia de calor*; C.E.C.S.A.; México, D.F.; 1984.
9. Kreider D.L., R.G. Kuller y D.R Otsberg, *Ecuaciones diferenciales*; Fondo educativo interamericano, S.A.; Bogotá, Colombia; 1973.
10. Leithold L., *El Cálculo con Geometría analítica*; Editorial Harla; México D.F.; 1987.
11. Ludwig E.E., *Applied process design for Chemical and Petrochemical plants*; Gulf Publishing Co.; Houston, U.S.A.; 1965.
12. Luthé R., A. Olivera y F. Schutz, *Métodos numéricos*; Editorial Limusa; México D.F.; 1988.
13. Maddox R.N. y A.L. Hilnes, *Transferencia de masa. fundamentos y aplicaciones*; Prentice Hall Internacional; México D.F.; 1987.
14. Miller I. y J. Freund, *Probabilidad y estadística para ingenieros*; Prentice Hall Internacional; México D.F.; 1987.
15. Molineux F., *Counter and cross-flow cooling towers*; Chem. & Proc. Eng.; 50 (8), 70 (1967).

16. Monroe R.C., *Energy saving fans*; Chem. Eng. Prog.; 79 (12), 28 (1983).
17. Norman, *Absorption, distillation and cooling towers*; Lognmans; Londres, Gran Bretaña; 1962.
18. Park J.E. y J.M. Vance, *Computer model of crossflow towers*; Chem. Eng. Prog.; 67 (7), 55 (1971).
19. Perry R.H., *Chemical engineers handbook*; sixth edition; Mc Graw-Hill book Co.; New York, U.S.A.; 1984.
20. Reid R.C., T.K. Sherwood y J.M. Prausnitz, *The properties of gases and liquids; their estimation and correlation*; Mc Graw-Hill book Co.; New York, U.S.A.; 1958.
21. Sherwood T.K., R.L. Pigford y C.R. Wilke, *Transferencia de masa*; Editorial Géminis S.R.L.; Buenos Aires, Argentina; 1979.
22. Smith J.M. y H.C. Vance, *Introducción a la termodinámica en Ingeniería química*; Mc Graw-Hill book Co.; México D.F.; 1985.
23. Treybal R.E., *Operaciones de transferencia de masa*; Mc Graw-Hill book Co.; México D.F.; 1987.
24. Welty J.R., *Transferencia de calor aplicada a la ingeniería*; Editorial Limusa; México D.F.; 1978.
25. Willa J.L. y J.C. Campbell, *Common misconceptions about cooling towers*; Chem. Eng. Prog.; 79 (12), 23 (1983).