

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

PROBLEMAS SOBRE OPERACIONES AIRE – AGUA

TRABAJO MONOGRAFICO DE ACTUALIZACION

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

PRESENTA

RAFAEL COQUIS LOPEZ

MEXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Profesora Graciela Martínez Ortiz
Vocal	Profesor Antonio Valiente Barderas
Secretario	Profesora María Luisa Galicia Pineda
1er. Suplente	Profesora María Rafaela Gutiérrez Lara
2º Suplente	Profesora Aída Gutiérrez Alejandre

Sitio donde se desarrollo el tema:

El tema se desarrolló en el Laboratorio de Ingeniería Química y en la Biblioteca de la Facultad de Química, U.N.A.M.

Asesor del tema:

Dr. Antonio Valiente Barderas _____

Sustentante:

Rafael Coquis López _____

A mi familia:

A mi esposa Adriana

A mi hija Marifer

A mis papas Rogelio y Cristina

A mis hermanos Chava y Ale

Por todo su apoyo y estar siempre conmigo.

A mis maestros

A la Facultad de Química

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A la profesora Graciela Martínez Ortiz por su tiempo y dedicación.

Y muy especialmente al Dr. Antonio Valiente Barderas por su disposición para ayudar.
Por todo su tiempo, su paciencia y todo su apoyo.
Muchas Gracias.

INDICE

Prólogo..... V

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN A LAS OPERACIONES AIRE AGUA

1.1	Introducción.....	1
1.2	Relaciones y definiciones de fases.....	3
1.2.1	Cambio de la fase líquida a la fase gaseosa.....	3
1.2.2	Equilibrio de fases entre líquido y vapor.....	4
1.2.3	Equilibrio entre un líquido y un gas insoluble en el líquido.....	6
1.3	Parámetros de humidificación.....	7
1.3.1	Humedad absoluta.....	7
1.3.2	Humedad relativa.....	8
1.3.3	Humedad porcentual.....	9
1.3.4	Humedad de saturación.....	9
1.4	Propiedades de las mezclas gas vapor.....	14
1.4.1	Temperatura de rocío.....	14
1.4.2	Volumen húmedo.....	14
1.4.3	Temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco.....	21
1.4.4	Calor húmedo.....	24

1.4.5	Entalpía.....	25
1.4.6	Temperatura de saturación adiabática.....	26
1.5	La carta psicrométrica.....	32
1.5.1	Uso de la carta psicrométrica.....	39

CAPITULO I I. ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

2.1	Acondicionamiento de aire.....	51
2.1.1	Carta de comodidad.....	54
2.1.1.1	Factores que determinan la temperatura efectiva.....	55
2.2	Procesos sencillos de acondicionamiento de aire.....	57
2.2.1	Calentamiento o enfriamiento de un flujo de aire a humedad y presión constante.....	57
2.2.2	Humidificación adiabática de un flujo de aire.....	57
2.2.3	Mezcla de dos flujos de aire.....	58
2.2.4	Flujo de aire sobre una superficie seca y más fría que el aire.....	58
2.2.5	Enfriamiento y deshumidificación de un flujo de aire....	59
2.2.6	Calentamiento y humidificación de un aire.....	59

CAPITULO III. HUMIDIFICACION Y DESHUMIDIFICACION

3.1	Procesos de humidificación y deshumidificación.....	71
3.1.1	Adición de vapor de agua.....	72

3.1.2	Adición de un líquido en condiciones cualesquiera, evaporándose parte del líquido.....	75
3.1.3	Humidificación adiabática con agua que está a la temperatura de bulbo húmedo del aire.....	79
3.1.3.1	El proceso de humidificación adiabática se puede llevar a cabo en dos tipos de equipos.....	80
3.1.3.2	Cálculo del equipo de humidificación adiabática.....	81
3.1.3.2.1	Diseño desde el punto de vista de transferencia de calor.....	82
3.1.3.2.2	Diseño desde el punto de vista de transferencia de masa.....	82
3.1.4	Torres empacadas.....	86
3.1.4.1	Altura del empaque.....	90
3.1.4.2	Diámetro de la torre.....	90
3.1.4.3	Caídas de presión.....	91
3.1.5	Torres empacadas empleadas como humidificadores.....	93
3.1.5.1	Correlaciones.....	94
A.	Correlación de McAdams para anillos Rasching de una pulgada.....	94
B.	Correlación de Yoshida.....	94
3.1.6	Cámaras de rociado.....	101
3.1.7	Enfriamiento de aire o calentamiento de aire por contacto directo con agua.....	108
3.1.7.1	Ecuación de diseño de los equipos.....	109
3.1.8	Determinación de la temperatura global de la fase gaseosa.....	117

CAPITULO IV. TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

4.1 Torres de enfriamiento de agua.....	130
4.1.1 Empaques de las torres de enfriamiento de agua.....	132
4.2 Método Kelly para el cálculo de torres de enfriamiento de agua	133

APENDICES

APENDICE 1	Constantes de Antoine.....	161
APENDICE 2	Tabla presión de vapor del agua.....	162
APENDICE 3	Carta psicrométrica.....	164
APENDICE 4	Correlación para predecir la caída de presión en torres empacadas.....	167
APENDICE 5	Gráfica de Lobo para el cálculo de la inundación en torres empacadas con empaques al azar.....	168
APENDICE 6	Características de los empaques aleatorios.....	169
APENDICE 7	Graficas de Pitchar.....	171
	Lista de símbolos.....	178
	Conclusiones.....	181
	Bibliografía.....	182

PROLOGO

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. El aire seco es la parte de la mezcla compuesta solamente por nitrógeno y oxígeno, y el vapor de agua es lo que se denomina humedad. Existen dos estados extremos del aire atmosférico: el aire seco en el que no hay absolutamente nada de vapor de agua y el aire saturado de humedad en el que la mezcla contiene todo el vapor de agua que puede absorber el aire seco a esa temperatura. El aire saturado seco puede absorber más vapor de agua si se lo calienta, y condensa agua líquida en forma de gotitas si se lo enfría, es decir se puede humidificar o deshumidificar el aire, es decir operaciones de contacto gas líquido.

Las operaciones de contacto gas líquido se utilizan para humidificar y deshumidificar un gas, para el enfriamiento de un líquido, o para acondicionar aire.

La humidificación es el proceso mediante el cual se aumenta la humedad y la cantidad de calor del aire.

En algunos procesos, la humedad absoluta se aumenta agregando agua, que se absorbe en forma de vapor.

Las operaciones de humidificación pueden llevarse a cabo para controlar la humedad de un espacio o bien, con mayor frecuencia, para enfriar y recuperar agua poniéndola en contacto con aire de baja humedad. De esta forma el agua pierde calor a la atmósfera y puede utilizarse una vez más en intercambiadores de calor en toda la planta.

El equipo de humidificación es la cámara de aspersion. Aquí el líquido de contacto se dispersa como una niebla en la corriente gaseosa.

El lavador de vapor es una variación de la cámara de aspersion, se utilizan para la eliminación de un componente condensable de la fase gaseosa.

Otro equipo para efectuar la humidificación es una columna empacada la cual cuenta con entradas y salidas para líquido y gas con distribuidor de líquido en lo alto de ella y uno para el gas en la base. El aire entra por el fondo de la columna en donde se pone en contacto y a contracorriente con el flujo de agua a lo largo de toda la torre hasta que se retira húmedo y frío por la parte alta de la misma.

El equipo que se utiliza para enfriamiento de agua con mayor frecuencia son las torres de enfriamiento de convección natural o mecánica. Para tamaños intermedios se suelen utilizar torres de tiro forzado o inducido. El agua caliente proveniente de la planta se bombea a la torre donde se distribuye en el relleno, que produce gotitas o una fina película de agua poniéndose en contacto con aire atmosférico evaporándose una parte pequeña del agua tomando calor latente del líquido, que se enfría

El enfriamiento de agua también puede efectuarse en estanques de aspersion para una capacidad pequeña y una pérdida elevada de agua.

La deshumidificación es necesaria frecuentemente en procesos de aire acondicionado o en procesos industriales.

La humedad puede removerse por absorción en líquidos o en sólidos enfriando por debajo del punto de rocío.

El equipo utilizado para la deshumidificación del aire o para eliminar un solo componente de un gas incondensable es la torre empacada o la columna de lavado. Estas unidades se utilizan para el contacto de una corriente gaseosa con varios líquidos manteniendo separadas las corrientes líquidas. Los eyectores se utilizan para condensar o “lavar” un vapor de una corriente gaseosa.

Acondicionar aire es controlar su temperatura, humedad pureza y distribución. Su objetivo es procurar la comodidad de los ocupantes de residencias, teatros, escuelas, etcétera, o bien en la industria, mantener productos alimenticios, productos químicos, etcétera, a muy bajas temperaturas para evitar que se contaminen.

El equipo utilizado para acondicionar aire se encarga de producir frío o calor y de impulsarlo al interior de la vivienda o local. Generalmente, los acondicionadores de aire funcionan según un ciclo frigorífico similar al de los frigoríficos y congeladores domésticos.

Los equipos de acondicionamiento de aire cuentan con cuatro componentes principales: evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión.

El objetivo principal de este trabajo es revisar las relaciones básicas para operaciones que involucran una transferencia simultánea de calor y masa particularmente las operaciones aire agua, incluyendo problemas ilustrativos para permitir una comprensión de la aplicación de la teoría y conceptos de física y termodinámica necesarios en los que se basa los fenómenos donde intervienen las operaciones aire agua.

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

I. Introducción a las operaciones aire-agua. En este capítulo se tratan los conceptos, la terminología y las relaciones psicrométricas aplicadas al sistema aire-agua. Se muestra el uso de la carta psicrométrica para calcular las propiedades del aire húmedo. Así como el uso de datos de la carta psicrométrica para efectuar balances de materia y energía en operaciones aire-agua. Se presenta la forma de resolver algunos problemas donde se implica introducir al conocimiento de las operaciones aire-agua.

II. Acondicionamiento de aire. En esta sección se revisan los fundamentos teóricos en los que se basa la operación unitaria de acondicionamiento de aire. Se explican algunos de los procesos para acondicionar aire y se expone la forma de resolver algunos problemas con sus balances de materia y de energía. También se expone la forma de cuantificar y representar los procesos de Aire Acondicionado en un diagrama psicrométrico.

III. Humidificación y deshumidificación. En las páginas de este capítulo se desarrollan los diferentes procedimientos de efectuar la humidificación y deshumidificación de una mezcla de aire-vapor de agua adecuada cada una a ciertas situaciones y con ventajas y desventajas. Se exponen las características de los equipos empleados para realizar la humidificación y deshumidificación del aire, así como las ecuaciones de diseño de estos equipos. Se incluye la forma de utilizar los diagramas entalpía temperatura para obtener las condiciones del aire en la entrada, en la interfase y en la salida de los proceso de humidificación. Adicionalmente se encuentran algunos problemas de aplicación de las bases teóricas de este capítulo.

IV. Torres de enfriamiento. En este apartado se hace una descripción de las partes principales que constituyen a una torre de enfriamiento de agua. Se exponen las ecuaciones de diseño de los equipos usados para enfriar agua. Se presenta el procedimiento para resolver problemas donde se incluye la aplicación de balances de materia y de energía para obtener el número de unidades y la altura de la unidad de transferencia.

Apéndices. En esta sección se muestra un conjunto de tablas y gráficas con datos necesarios de apoyo como consulta para resolver problemas de operaciones aire-agua planteados en los capítulos anteriores.

Apéndice 1. En este apartado se presentan una tabla con los datos de las constantes de Antoine para calcular la presión de vapor de una sustancia.

Apéndice 2. Muestra una tabla de datos de propiedades del vapor saturado de agua.

Apéndice 3. Aquí se presentan algunas versiones de la Carta Psicrométrica, una de ellas aparece con las unidades del Sistema Internacional y las otras con las del Sistema Ingles. Ambas están hechas para una presión de una atmósfera

Apéndice 4. Muestra una tabla que tiene datos de una correlación para predecir la caída de presión en torres empacadas.

Apéndice5. Muestra la gráfica de lobo para calcular la inundación en torres empacadas con empaques al azar.

Apéndice 6. Muestra una tabla con los datos de características de empaques y las constantes presentes en la ecuación para calcular la caída de presión en torres empacadas para diferentes tipos y tamaños de empaques.

Apéndice 7. Aquí se presentan las gráficas de Pitchar para calcular el L/G de operación buscado y el NUT de operación en las torres de enfriamiento.

CAPITULO I

INTRODUCCION A LAS OPERACIONES AIRE AGUA

1.1 Introducción.

Muchas operaciones unitarias requieren del manejo de mezclas de vapores condensables y gases incondensables; el ejemplo más común de estas mezclas es la del vapor de agua y aire, aunque no es raro encontrar algunas otras mezclas, tales como: benceno - nitrógeno, acetona - bióxido de carbono, hexano - nitrógeno, etc.

En estas operaciones unitarias así como en los procesos de transporte se requiere efectuar cálculos que se basan en las propiedades de mezclas de vapor de agua y aire. Estos cálculos requieren del conocimiento de la concentración del vapor de agua en el aire bajo diversas condiciones de temperatura y presión, de las propiedades térmicas de estas mezclas y de los cambios que se certifican cuando esta mezcla se pone en contacto con agua o con sólidos húmedos para secarse.

Es frecuente la utilización indiscriminada de los términos gas y vapor para describir a aquellas sustancias que se presentan en el estado gaseoso. En este capítulo es sin embargo, vital hacer una distinción entre ambos. Daremos el término de gas a toda sustancia que está por arriba de su temperatura crítica y que por lo tanto es imposible licuar por medio de un aumento o disminución de presión a temperatura constante.

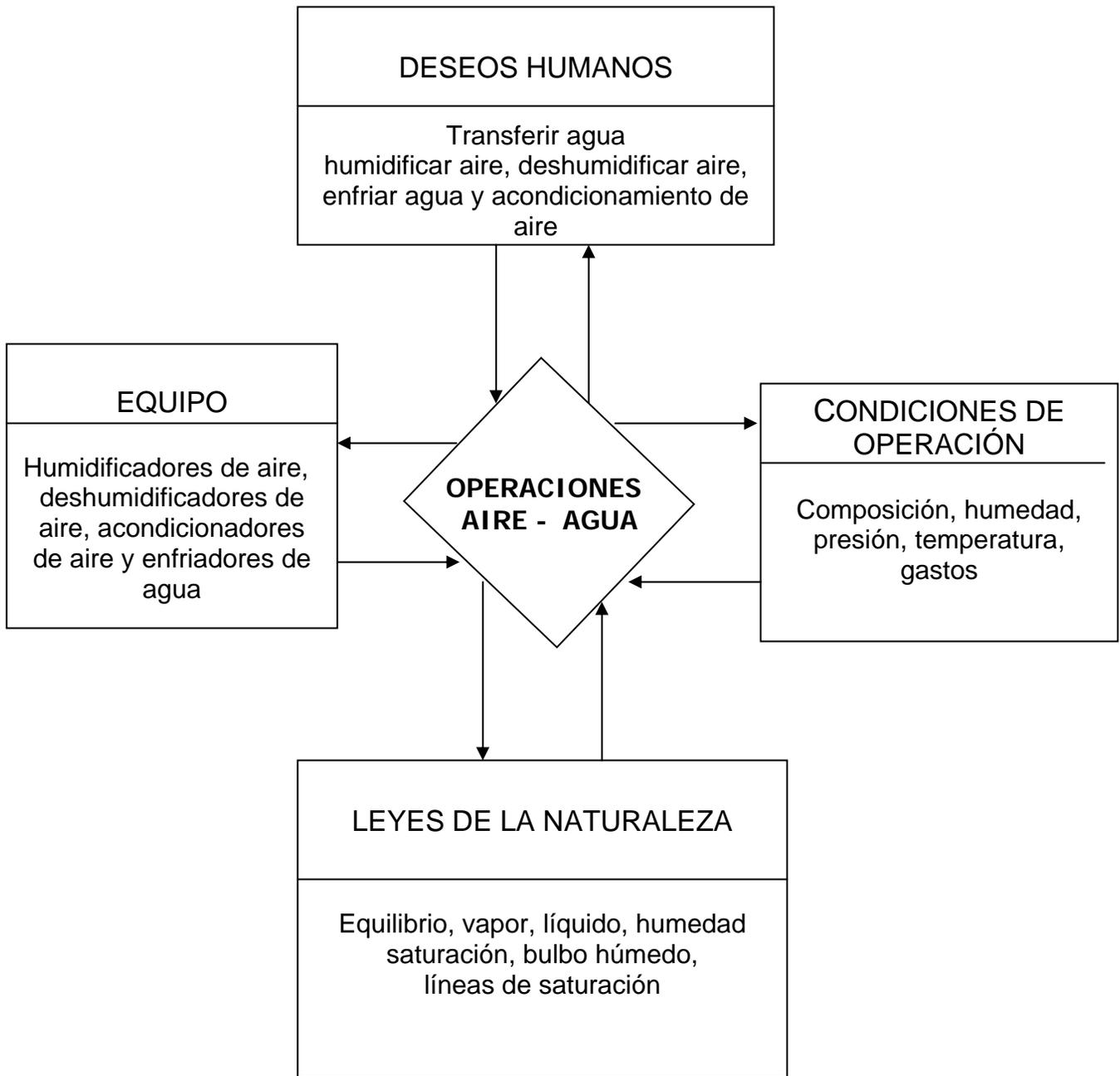


Diagrama representativo que incluye de manera global la función de las operaciones aire agua, el equipo necesario, sus condiciones de operación y las leyes que rigen dichos fenómenos.

1.2 Relaciones y definiciones de fases

1.2.1 Cambio de la fase líquida a la fase gaseosa

En el siguiente diagrama presión – entalpía (P – H) se indican las zonas correspondientes a gases y vapores, para una sustancia dada.

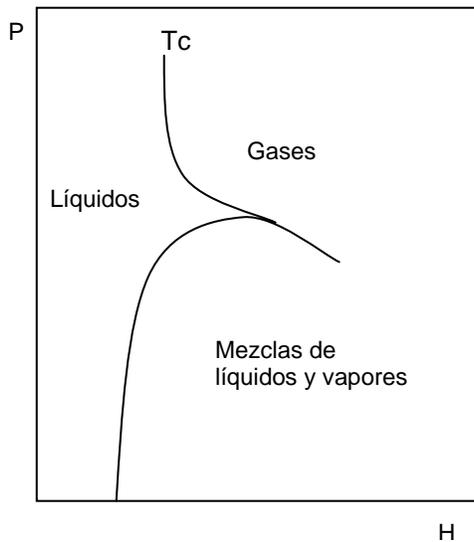


Fig. 1-1. Región de fases en un diagrama presión-entalpía

Todos los gases pueden llegar a licuarse si se les coloca a temperaturas inferiores a la crítica y si se maneja adecuadamente la presión. Por otro lado todos los líquidos pueden pasar al estado gaseoso convirtiéndose en vapores.

Al paso del estado líquido al gaseoso se le da el nombre de vaporización; esta se produce a todas las temperaturas y presiones y se debe a que aquellas moléculas líquidas que tienen una energía mayor que la promedio logran escapar del seno del líquido dando lugar a la formación de vapor.

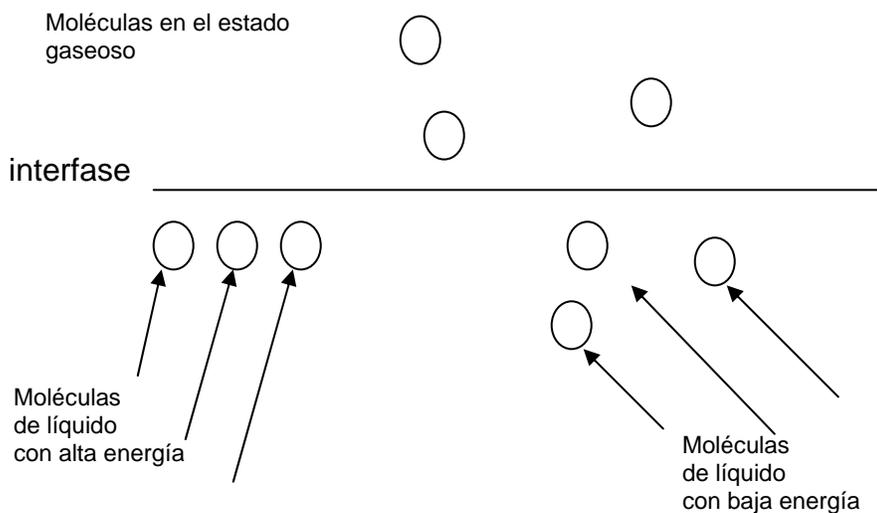


Fig. 1-2. Moléculas en el estado líquido y el estado gaseoso

1.2.2 Equilibrio de fases entre líquido y vapor

Si colocáramos un líquido en un recipiente cerrado y aislado térmicamente se produciría la vaporización, pero desde el momento en que el espacio arriba del líquido se llena con moléculas de vapor, se produce un flujo inverso al del líquido ya que las moléculas de vapor en su movimiento desordenado chocan contra la superficie del líquido y se condensan.

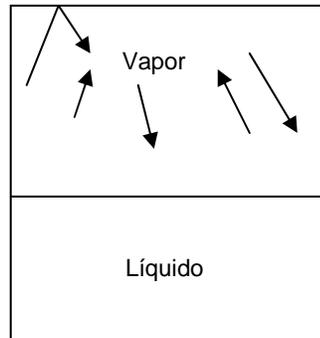


Fig. 1-3. Flujo de moléculas entre la fase líquida y la fase gaseosa

Si N_A es la cantidad de líquido que se evapora por unidad de tiempo y área y $-N_A$ la cantidad de vapor que se condensa por unidad de tiempo y área, cuando $N_A > -N_A$, la concentración del vapor aumentará así como la presión de la fase gaseosa y la temperatura descenderá. Poco a poco (N_A) se va acercando a ($-N_A$). Cuando se alcanza el equilibrio, el número de moléculas que salen del líquido (se vaporizan) es igual a las que entran al líquido (se condensan) y la presión que existe en la fase gaseosa así como la temperatura se hacen constantes. A la presión que existe en la fase gaseosa se le llama *presión de vapor*. Un aumento en la temperatura hará crecer a N_A haciendo que se aumente la concentración de la fase gaseosa. Si el sistema permanece así por un tiempo se alcanzará el equilibrio, la nueva presión de vapor será mayor que la anterior. En general la relación que existe entre la presión de vapor y la temperatura toma la siguiente forma:

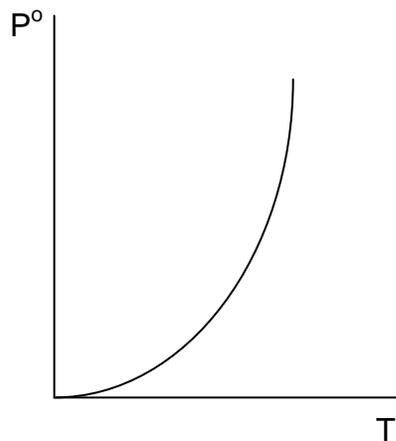


Fig. 1-4. Presión de vapor Vs. temperatura

Existen un gran número de ecuaciones para predecir la presión de vapor en función de la temperatura, una de las más utilizadas es la de Antoine.

$$\ln P^o = A - \frac{B}{T + C}$$

En donde:

P^o es la presión de vapor en mm de Hg , T es la temperatura en °C

A, B y C son constantes características de cada sustancia

Algunas de estas constantes se presentan en el **APENDICE 1**.

Ejemplo 1

Calcular la presión de vapor del etilbenceno a 150°C sabiendo que las constantes de Antoine son:

A = 6.95719 , B = 1424.255 , C = 213.206 Datos del APENDICE 1

1. Traducción

$$P^o_{\text{etilbenceno}} = ?$$

$$T = 150^\circ\text{C}$$



2. Planteamiento

2.1 Ecuación de Antoine

$$\log P^o = A - \frac{B}{T + C}$$

3. Cálculos

3.1 Presión de vapor

$$\log P^o = 6.95719 - \frac{1424.255}{150 + 213.206}$$

$$P^o = 1086.04 \text{ mm de Hg}$$

4. Resultado

La presión de vapor del etilbenceno es 1086.04 mm de Hg

1.2.3 Equilibrio entre un líquido y un gas insoluble en el líquido

Si ponemos a un líquido volátil en contacto con un gas, se producirá la vaporización del líquido y el vapor procedente de este se difundirá en el gas saturándolo si el espacio es limitado.

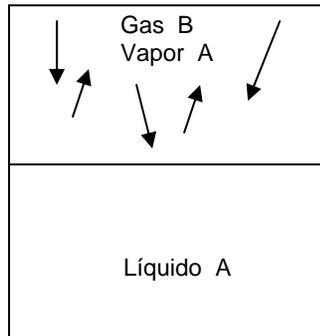


Fig. 1-5. Vaporización de un líquido saturando un espacio limitado

Decimos que el espacio gaseoso se satura cuando el número de moléculas del líquido A que pasan al estado gaseoso son iguales al número de moléculas de vapor que regresan al estado líquido. Cuando el gas se satura ya no hay más transferencia de masa y se establece el equilibrio. En el equilibrio la concentración, la temperatura y la presión permanecen constantes.

1.3 Parámetros de humidificación

En el equilibrio la concentración, la temperatura y la presión permanecen constantes.

$$P_A^o = P_T y_A = \tilde{P}_A$$

en donde:

\tilde{P}_A = Presión parcial del vapor A

y_A = fracción mol de A en la fase gaseosa

Ahora bien:

$$\frac{\tilde{P}_A}{\tilde{P}_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{P_A^o}{P_T - P_A^o} = Y_{As}$$

en donde:

Y_{As} = moles de vapor de A / moles de gas B (en la saturación)

P_A^o = presión de vapor del líquido A

P_T = presión total

n_A = moles de A en la fase gaseosa

n_B = moles de B en la fase gaseosa

\tilde{P}_B = presión parcial del gas B

\tilde{P}_A = presión parcial del vapor A en la fase gaseosa. La cual es inferior a P_A^o

Un gas en contacto con un líquido volátil que tiene menor cantidad del vapor que el correspondiente al equilibrio, se dice que está saturado parcialmente o que está insaturado, hará que el líquido tienda a evaporarse.

Este tipo de fenómenos se presenta en las llamadas operaciones aire-agua.

En las operaciones aire-agua son de uso frecuente varias definiciones especiales:

1.3.1 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 lo siguientes

La humedad molar es la relación entre el número de moles de vapor de agua y el número de moles de aire presentes en la unidad de masa de gas libre de vapor.

$$\text{Humedad absoluta molar: } \underline{Y} = \frac{\text{moles de agua}}{\text{moles de aire}}$$

Otra forma de indicar la concentración del vapor en la fase gaseosa es mediante la humedad molar.

$$\underline{Y} = \frac{\tilde{P}_A}{P_T - \tilde{P}_A}$$

La humedad se define como la masa de vapor que acompaña a una unidad de gas libre de vapor.

$$\text{Humedad absoluta: } Y = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de aire}}$$

Otra forma de indicar la concentración del vapor en la fase gaseosa es mediante la humedad másica o absoluta.

$$Y_A = \frac{\tilde{P}_A}{P_T - \tilde{P}_A} \left(\frac{PM_V}{PM_G} \right)$$

En donde PM_V es el peso molecular del vapor y PM_G es el peso molecular del gas

1.3.2 Humedad relativa

La humedad relativa se define como la relación entre el número de moles del agua que contiene la mezcla, a la temperatura y presión dadas, y el número de moles que estarían presentes si la mezcla hubiera alcanzado el equilibrio en esas condiciones de temperatura y presión.

Otra forma de definir la humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor y la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas

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

$$Y_{AR} = \frac{\tilde{P}_A}{P_A^o} (100)$$

También se suele emplear las humedades porcentuales y de saturación.

1.3.3 Humedad porcentual

La humedad porcentual se define como la relación entre la humedad absoluta presente, en las condiciones de temperatura y presión, de la mezcla y la humedad que tendrá el sistema cuando alcance el equilibrio a la misma temperatura y presión.

Se suele representar por la ecuación:

$$Y_{A\%} = \frac{Y_A}{Y_{As}} (100)$$

1.3.4 Humedad de saturación

Cuando el sistema aire-agua ha alcanzado el equilibrio líquido-vapor, se afirma que la mezcla esta saturada. En esta condición la presión parcial del vapor de agua en el aire, a una temperatura dada, es igual a la presión de vapor de agua a la misma temperatura.

De esta forma se puede definir a la humedad en la saturación como la masa de vapor presente en una unidad de masa de gas libre de vapor y se representa por la siguiente ecuación.

$$Y_{As} = \frac{P^o_A}{P_T - P^o_A} \left(\frac{PM_V}{PM_G} \right)$$

Gas saturado es un gas en el que el vapor está en equilibrio con el líquido a la temperatura del gas.

La humedad o sea el contenido de vapor en la fase gaseosa se puede modificar mediante la adición o sustracción de vapor a la fase gaseosa.

Ejemplo 2

Una mezcla de aire y vapor de agua que está a 20°C y 760 mm Hg tiene una humedad relativa del 70%. Calcule la humedad molar así como la humedad absoluta.

1. Traducción

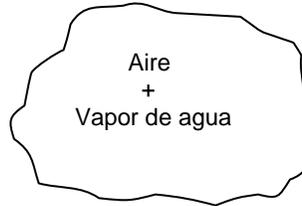
$$\underline{Y}_A = ?$$

$$Y_A = ?$$

$$T = 20^\circ\text{C}$$

$$Y_{AR} = 70\%$$

$$P_T = 760 \text{ mm de Hg}$$



2. Planteamiento

En este problema estamos tratando con mezclas de gases y vapores condensables, por lo que emplearemos las siguientes ecuaciones:

2.1 Humedad relativa

$$Y_{AR} = \frac{\check{P}_A}{P_A^o} (100)$$

2.2 Humedad molar

$$\underline{Y}_A = \frac{\check{P}_A}{P_T - \check{P}_A}$$

2.3 Humedad absoluta

$$Y_A = \frac{\check{P}_A}{P_T - \check{P}_A} \left(\frac{PM_V}{PM_G} \right)$$

3. Cálculos

La presión de vapor del agua se obtiene de las tablas de presión de vapor saturado del agua ver el **APENDICE 2**

La presión de vapor del agua a 20°C es $P_{agua}^o = 17.5 \text{ mm de Hg}$

3.1 Presión parcial del vapor de agua

Con la ecuación de humedad relativa se obtiene la presión parcial del vapor.

$$\tilde{P}_A = \frac{P^o_A Y_{AR}}{100} \quad \tilde{P}_A = \frac{17.5(70)}{100} \quad \tilde{P}_A = 12.2 \text{ mm de Hg}$$

3.2 Humedad molar

$$\underline{Y}_A = \frac{12.2}{760 - 12.2} \quad \underline{Y}_A = 0.0163 \frac{\text{moles de agua}}{\text{mol de aire seco}}$$

3.2 Humedad absoluta

$$Y_A = \frac{12.2}{760 - 12.2} \left(\frac{18}{29} \right) \quad Y_A = 0.01011 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

4. Resultado

La humedad molar es de $\underline{Y}_A = 0.0163 \frac{\text{moles de agua}}{\text{mol de aire seco}}$

La humedad absoluta es de $Y_A = 0.01011 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$

Ejemplo 3

En una mezcla de vapor de tolueno y nitrógeno a 80°C y 740 mm de Hg, la presión parcial del tolueno es 150 mm de Hg. Calcular la concentración de tolueno:

- a) en fracción molar
- b) en saturación molar
- c) en saturación absoluta

1. Traducción

$$y = ?$$

$$\underline{Y} = ?$$

$$Y = ?$$

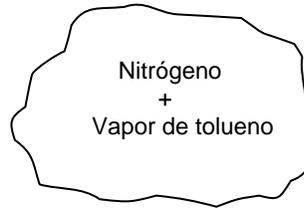
$$T = 80^\circ\text{C}$$

$$P_T = 740 \text{ mm Hg}$$

$$\tilde{P}_V = 150 \text{ mm Hg}$$

$$\text{Peso molecular del tolueno} = 92$$

$$\text{Peso molecular del nitrógeno} = 28$$



2. Planteamiento

2.1 La fracción molar del vapor es:

$$y = \frac{\tilde{P}_V}{P_T}$$

2.2 Saturación molar

$$\underline{Y} = \frac{\tilde{P}_V}{P_T - \tilde{P}_V}$$

2.3 Saturación absoluta

$$Y = \frac{\tilde{P}_V}{P_T - \tilde{P}_V} \left(\frac{PM_V}{PM_G} \right)$$

3. Cálculos

3.1 Fracción molar del vapor

$$y = \frac{150 \text{ mm Hg}}{740 \text{ mm Hg}}$$

$$y = 0.203 \frac{\text{moles tolueno}}{\text{mol de mezcla}}$$

3.2 Saturación molar

$$\underline{Y} = \frac{150}{740 - 150} \qquad \underline{Y} = 0.254 \frac{\text{moles de tolueno}}{\text{mol de nitrógeno}}$$

3.3 Saturación absoluta

$$Y = \frac{150}{740 - 150} \left(\frac{92}{28} \right) \qquad Y = 0.835 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de nitrógeno}}$$

4. Resultados

Fracción mol de vapor..... $y = 0.203 \frac{\text{moles tolueno}}{\text{mol de mezcla}}$

Saturación molar..... $\underline{Y} = 0.254 \frac{\text{moles de tolueno}}{\text{mol de nitrógeno}}$

Saturación absoluta..... $Y = 0.835 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de nitrógeno}}$

1.4 Propiedades de las mezclas gas- vapor

1.4.1 Temperatura de rocío

Una experiencia de la vida cotidiana es el empañamiento de un espejo cuando se exhala el vaho caliente sobre él. Este fenómeno es debido a que se ha alcanzado la temperatura de rocío. Cuando una mezcla de un gas y un vapor se enfrían a presión constante, la mezcla llega a una temperatura tal que se satura y se forman gotas de vapor condensado. A esa temperatura se le da el nombre de *temperatura de rocío* y se representa con el símbolo T_r .

1.4.2 Volumen húmedo

En los cálculos de humidificación con frecuencia es necesario conocer el volumen de la fase gas – vapor. Para este uso, el volumen húmedo se define como el volumen ocupado por un kilogramo de gas seco más el vapor que lo acompaña a la temperatura y presión dominantes.

$$V_H = \left(\frac{1}{PM_G} + \frac{Y}{PM_V} \right) \frac{RT}{P}$$

en donde PM_G , PM_V son los pesos moleculares del gas y del vapor, R la constante del estado gaseoso $\left(0.082057 \frac{\text{atm m}^3}{\text{kg mol } ^\circ\text{K}} \right)$, T la temperatura en $^\circ\text{K}$ y P la presión absolutas en atmósferas de la mezcla.

En el caso del volumen húmedo de la mezcla aire – agua, la ecuación anterior quedaría:

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{18} \right) \frac{0.082 T}{P}$$

Ejemplo 4

La presión y temperatura del aire en una habitación son de 101.3 kN/m^2 y 301°K respectivamente; la humedad relativa es del 30%. Si la presión de vapor de agua es de 3.8 kN/m^2 cuando el aire se halla saturado con vapor de agua, calcule:

- La presión parcial del vapor de agua en la habitación
- El punto de rocío
- El volumen específico del aire húmedo.
- La humedad del aire.
- La humedad porcentual.

1. Traducción

$$\tilde{P}_A = ?$$

$$T_r = ?$$

$$Y_A = ?$$

$$Y_{A\%} = ?$$

$$V_H = ?$$

$$P_T = 101.3 \text{ kN/m}^2$$

$$T = 301^\circ\text{K}$$

$$Y_{AR} = 30 \%$$

$$P^o_A = 3.8 \text{ kN/m}^2$$



2. Planteamiento

2.1 Humedad relativa

$$Y_{AR} = \frac{\tilde{P}_A}{P^o_A} (100)$$

2.2 Humedad absoluta

$$Y_A = \frac{\tilde{P}_A}{P_T - \tilde{P}_A} \left(\frac{PM_V}{PM_G} \right)$$

2.3 Humedad en la saturación

$$Y_{As} = \frac{P^o_A}{P_T - P^o_A} \left(\frac{PM_V}{PM_G} \right)$$

2.4 Humedad porcento

$$Y_{A\%} = \frac{Y_A}{Y_{As}} (100)$$

2.5 Volumen húmedo

$$V_H = \left(\frac{1}{PM_G} + \frac{Y}{PM_V} \right) \frac{RT}{P}$$

3. Cálculos

3.1 Con la ecuación de humedad relativa se obtiene la presión parcial del vapor.

$$\tilde{P}_A = \frac{P^o_A Y_{AR}}{100} \quad \tilde{P}_A = \frac{3.8 (30)}{100} \quad \tilde{P}_A = 1.14 \frac{kN}{m^2} \quad 1.14 \frac{kN}{m^2} = 8.55 \text{ mm Hg}$$

3.2 Temperatura de rocío

Con esta presión (8.55 mm Hg) en una tabla de presión de vapor del agua (ver el **APENDICE 2**) encontramos la temperatura de saturación de 8.9°C y este es el punto de rocío $T_r = 9^\circ\text{C}$ (282°K)

3.3 Humedad absoluta

$$Y_A = \frac{1.14}{101.3 - 1.14} \left(\frac{18}{29} \right) \quad Y_A = 0.0070 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

3.4 Humedad porcentual

Para obtener la humedad porcentual primero se calcula la humedad en la saturación con la presión de vapor del agua.

La presión de vapor del agua se obtiene de las tablas de presión de vapor saturado del agua. Ver el **APENDICE 2**

La presión de vapor del agua a 301°K (28°C)

$$\text{es } P^o_{\text{agua}} = 3.8 \frac{kN}{m^2} \quad (28.349 \text{ mm de Hg })$$

$$Y_{As} = \frac{28.349}{760 - 28.349} \left(\frac{18}{29} \right) \quad Y_{As} = 0.02402 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$Y_{A\%} = \frac{0.0070}{0.02402} (100)$$

$$Y_{A\%} = 29.1\%$$

3.5 Volumen húmedo

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.0070}{18} \right) \frac{0.082(301)}{101.3} \quad V_H = 0.858 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

4. Resultados

La presión parcial del vapor de agua es de $1.14 \frac{kN}{m^2}$

El punto de rocío es de 282 °K

La humedad absoluta es de $0.0070 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$

La humedad porcentual es de 29.1%

El volumen húmedo es de $0.858 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$

Ejemplo 5

En una mezcla de benceno y nitrógeno, que está a 40°C y 720 mm de Hg, la presión parcial del benceno es de 50 mm de Hg. Para separar el 80% del benceno presente, la mezcla se somete a enfriamiento y compresión.

Calcular:

- La presión final si se enfría hasta 10°C
- El volumen inicial de la mezcla para condensar 50kg/h de benceno.

1. Traducción

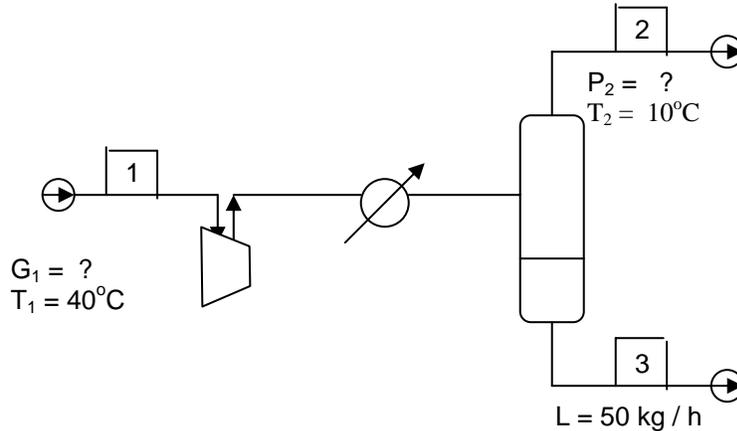


Fig. 1-6. Diagrama para separar el benceno de la mezcla

2. Planteamiento

Como hay condensación la masa gaseosa quedará saturada a la temperatura final de enfriamiento.

2.2 Balance de masa.

$$\text{Total} \quad G_1 = G_2 + L_3$$

Balance parcial de benceno

$$G_1 y_1 = G_2 y_2 + L_3 x_3$$

En las operaciones de vapores con gases se usa más el término de humedad que el fracción peso.

$$Y = \frac{y_1}{1 - y_1}$$

$$G_s = G_1(1 - y_1)$$

$$\frac{Gs}{(1 - y_1)} y_1 = L_3 x_3 + \frac{Gs}{(1 - y_2)} y_2$$

$$GsY_1 = L_3 x_3 + GsY_2$$

$$L_3 = Gs(Y_1 - Y_2)$$

$$G_1 = GsV_H$$

3 Cálculos

3.1 Humedad inicial

$$Y_1 = \frac{50}{720 - 50} \times \frac{78}{28} = 0.207 \frac{\text{kg de vapor de benceno}}{\text{kg de nitrógeno}}$$

3.2 Humedad final

Como se condensa el 80 % del benceno entrante.

$$Y_2 = 0.207(0.2) = 0.0414 \frac{\text{kg benceno}}{\text{kg nitrógeno}}$$

3.3 Presión de vapor del benceno a 10 ° C

Constantes de Antoine tomadas del **APENDICE 1**

$$A = 7.429 \quad ; \quad B = 1628.32 \quad ; \quad C = 279.56$$

$$\log P^o = 7.429 - \frac{1628.32}{10 + 279.56} = 1.8055$$

$$P^o = 63.9 \text{ mm de Hg}$$

3.4 Presión final

$$Y_2 = 0.0415 = \frac{63.91}{P_T - 63.91} \left(\frac{78}{28} \right)$$

$$(P_T - 63.91)(0.0416) = 63.91(2.785)$$

$$P_T = \frac{63.91(2.785)}{0.0416} + 63.91$$

$$P_T = 4342.50 \text{ mm de Hg} \quad P_T = 5.72 \text{ atm}$$

3.5 Benceno condensado por kilogramo de nitrógeno.

$$\Delta Y = 0.207 - 0.0415 = 0.1655 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{kg de nitrógeno}}$$

3.6 Volumen húmedo de la corriente (1)

$$V_H = \left(\frac{1}{28} + \frac{0.207}{78} \right) \frac{0.082 \times 313}{720} = 1.039 \frac{m^3}{\text{kg de } N_2}$$

3.7 Volumen inicial

$$V = \frac{50 \text{ kg de benceno} / h}{0.1655 \frac{\text{kg benceno}}{\text{kg } N_2}} \left(1.039 \frac{m^3}{\text{kg } N_2} \right) = 313.89 \frac{m^3 \text{ de mezcla}}{h}$$

4. Resultados

La presión final es de 5.72 atm

Se requieren $313.89 \frac{m^3 \text{ de mezcla}}{h}$ para condensar $50 \frac{\text{kg de benceno}}{h}$

1.4.3 Temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco

Unas de las variables más empleadas para caracterizar a las mezclas de vapores y gases son las llamadas temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco, las cuales se miden mediante un psicrómetro. Este aparato consta de dos termómetros, uno de ellos común y corriente y el otro cubierto por una gasa saturada con el líquido que se está vaporizando, sumergido en una corriente de gas de temperatura T y una humedad Y dadas.

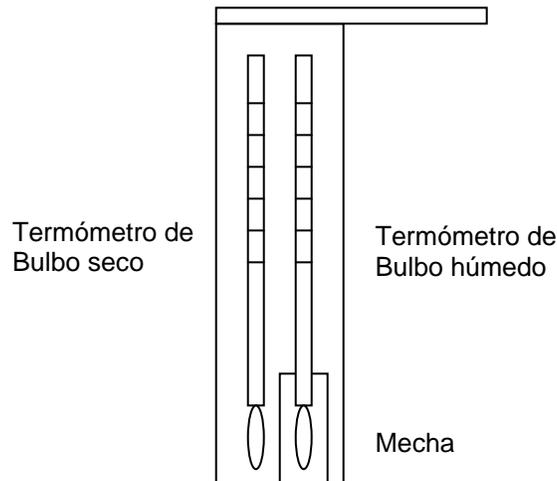


Fig. 1-7. Termómetro de bulbo seco y bulbo húmedo o psicrómetro

Para determinar las temperaturas, se hace girar el psicrómetro en la mezcla gaseosa o bien se hace pasar esta sobre los termómetros mediante un ventilador. Al efectuar la medición se observa que la temperatura registrada en el termómetro humedecido por la gasa desciende lentamente hasta que llega un momento en el que permanece fija. La temperatura que registra el termómetro común y corriente recibe el nombre de temperatura de bulbo seco, la que registra el termómetro humedecido por la gasa, temperatura de bulbo húmedo.

La temperatura de bulbo seco es la temperatura de una mezcla de aire y vapor de agua. Se representa con la letra T en las ecuaciones que aparecen en este capítulo.

La temperatura de bulbo húmedo es la que se obtiene al llegar al estado estacionario una pequeña cantidad de agua que se evapora en una gran cantidad de mezcla vapor-gas no saturada. Se representa con el símbolo T_H .

En este proceso parte del líquido de la mecha se evapora hacia la corriente gaseosa no saturada llevándose el calor latente asociado provocando un descenso en la temperatura del bulbo del termómetro y la mecha. En el instante en que esta temperatura sea menor que la de la mezcla, comenzará a fluir hacia la superficie de la mecha, hasta que finalmente, en estado estacionario, el flujo de calor que recibe la mecha se ocupa en su totalidad para la evaporación del agua.

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

La temperatura de bulbo húmedo es una temperatura de no equilibrio en la cual el flujo de calor sensible que transmite el gas a la mecha se iguala con las pérdidas de calor latente producidas por la evaporación del líquido en la corriente gaseosa.

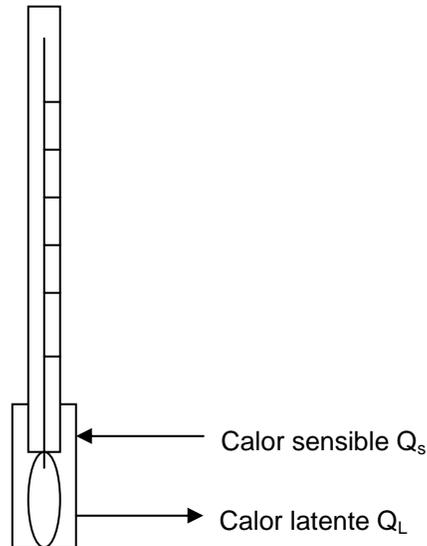


Fig. 1-8. Transferencia de calor en el termómetro de bulbo húmedo

El calor transferido a la mecha es:

$$Q_s = h_c A(T_1 - T_H)$$

La masa de vapor transferida desde la mecha es:

$$M_A = k_Y A(Y_H - Y_1)$$

El punto 1 es la temperatura del gas y el H es la temperatura de la superficie de la mecha.

En el estado continuo todo el calor transferido sirve para vaporizar el líquido.

$$Q_L = M_A \lambda_H$$

Igualando

$$h_c A(T_1 - T_H) = k_Y A(Y_H - Y_1)\lambda_H$$

Como el área de transferencia es la misma para transferir calor que masa.

$$h_c (T_1 - T_H) = k_Y (Y_H - Y_1)\lambda_H$$

$$T_1 - T_H = \frac{k_Y \lambda_H}{h_c} (Y_H - Y_1)$$

Esa ecuación recibe el nombre de ecuación de la *línea de bulbo húmedo*.

La relación k_y/h_c se conoce como coeficiente psicrométrico o relación de Lewis, esa relación se obtiene bajo condiciones turbulentas.

Para el flujo turbulento de gases que pasan sobre un cilindro húmedo tal como sucede en el caso de un termómetro de bulbo húmedo, los datos experimentales dan:

$$\frac{h_c}{k_y} = 0.293 \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{0.56} \quad \text{cuando el aire es el gas incondensable}$$

y

$$\frac{h_c}{k_y} = C_H \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0.56} \quad \text{para otros gases}$$

En donde Sc es el número de Schmidt y Pr el número de Prandtl.

Para el caso de aire puro $Sc \cong Pr \cong 0.7$ y se encuentra que:

$$\frac{h_c}{k_y} = C_H = 0.24$$

En donde

h_c = coeficiente de transferencia de calor en $\frac{kcal}{h m^2 \text{ } ^\circ C}$

k_y = coeficiente de transferencia de masa en $\frac{kg \text{ de vapor}}{h m^2 (Y/Y)}$

T_H = temperatura de bulbo húmedo $^\circ C$

Y_H = humedad en la interfase $\frac{kg \text{ de vapor}}{kg \text{ de gas seco}}$

λ_H = calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo $\frac{kcal}{kg \text{ de vapor}}$

Para otros gases la relación de Lewis se puede obtener a partir de la gráfica siguiente:

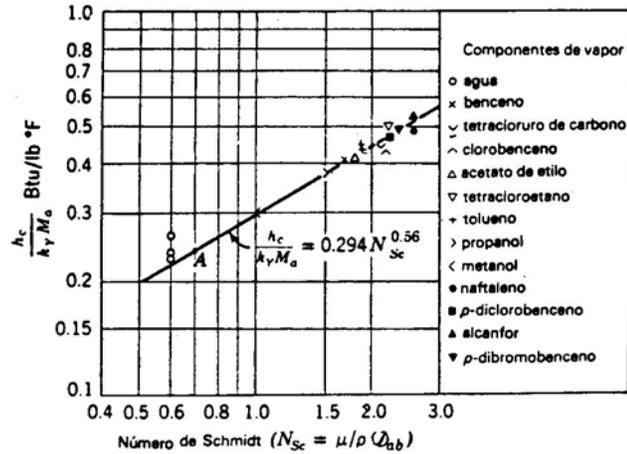


Fig. 1-9. Relación de h_c/k_Y para termometría de bulbo húmedo en sistemas aire-vapor

Fuente: 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, 1997.

1.4.4 Calor húmedo

El calor húmedo C_H , es el calor que se requiere para aumentar 1°C la temperatura de la masa unitaria del gas y el vapor que lo acompaña a presión constante

Para una mezcla de humedad absoluta Y_A

$$C_H = C_{p_G} + C_{p_V} Y$$

Para el caso del aire – vapor de agua

$$C_H = 0.24 + 0.46 Y$$

Para el caso del aire agua, la relación de Lewis¹ es igual a la inversa del calor húmedo.

¹ Ingeniero y profesor de ingeniería Química de principios del siglo XX, que hizo importantes aportaciones a la ingeniería en el campo de la transferencia de masa y calor. Propuso una relación adimensional muy utilizada en el campo de los procesos de separación llamada número de Lewis que relaciona los mecanismos de transferencia de calor y de masa.

1.4.5 Entalpía

La entalpía de una mezcla vapor – gas es la suma del calor sensible de 1 kg de gas , y el calor latente de vaporización del vapor que contiene a la temperatura a la que se refieren las entalpías

$$H = C_H(T - T_0) + \lambda_o Y$$

En donde

T_0 = temperatura base para calcular las entalpías, generalmente 0°C

λ_o = calor latente de vaporización del vapor a la temperatura base.

Para el caso de las mezclas de vapor de agua y aire tomando como entalpía de referencia la del agua líquida a 0°C

$$H = (0.24 + 0.46Y)T + 597.2 Y \quad \frac{kcal}{kg \text{ de aire seco}}$$

1.4.6 Temperatura de saturación adiabática

Es la temperatura alcanzada por una masa de gas cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas.

Cuando un gas insaturado se pone en contacto con un líquido en un equipo aislado térmicamente, el líquido se evaporará hasta que el gas se sature con vapor. El gas que pasa se humidifica y enfría. A menos que el gas entrante esté saturado la temperatura adiabática es menor que la del gas entrante. Si el contacto entre el gas y el líquido es lo suficientemente grande el gas se saturará alcanzando una temperatura T_s . Como el líquido evaporado se pierde hay que poner líquido de repuesto, el cual se debe introducir a T_s .

El calor latente de evaporación debe ser suministrado por el calor sensible transferido desde el gas.

La entalpía del gas entrante es:

$$H = C_H(T - T_o) + Y\lambda_o$$

La entalpía del gas saliente es:

$$H_s = C_H(T_s - T_o) + Y_s\lambda_o$$

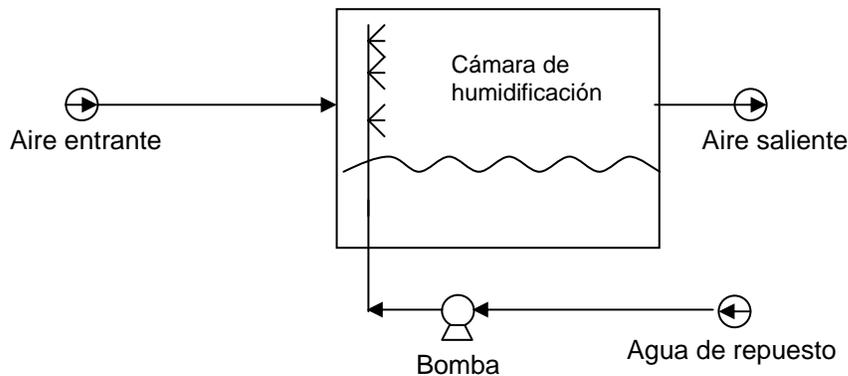


Fig. 1-10. Saturación de un gas con vapor en una cámara de humidificación

Igualando, ya que la entalpía entrante es igual a la saliente:

$$H_s = C_H(T_s - T_o) + Y_s\lambda_o = C_H(T - T_o) + Y\lambda_o$$

si se toma como una temperatura base para calcular las entalpías a la temperatura de saturación adiabática T_s .

$$C_H(T - T_s) + Y\lambda_s = Y_s\lambda_s$$

$$\therefore C_H(T - T_s) = \lambda_s(Y_s - Y)$$

$$\frac{Y_s - Y}{T_s - T} = - \frac{C_H}{\lambda_s}$$

La ecuación anterior se conoce como *la línea de temperatura adiabática*.

Para el caso del sistema aire – agua, el valor de la temperatura húmeda y el de la temperatura de saturación adiabática es el mismo y se pueden usar indistintamente una u otra temperatura.

Para otros pares de gas y vapor la temperatura de saturación adiabática y la de bulbo húmedo son diferentes.

Ejemplo 6

En un aparato se ha encontrado una temperatura de bulbo seco de 65°C y una temperatura de bulbo húmedo de 32°C cuando la presión era de 1 atm. ¿Cuál es la humedad del aire?

1. Traducción

Y = ?

T = 65°C

T_H = 32°C

P = 1 atm

2. Planteamiento

2.1 Ecuación de bulbo húmedo.

$$T_1 - T_H = \frac{k_Y \lambda_H}{h_c} (Y_H - Y_1) \quad , \quad \frac{h_c}{k_Y} = C_H$$

3. Cálculos

3.1 Datos

Calor latente de vaporización a 32°C es 578 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg de vapor}}$

Presión de vapor del agua a 32°C es 35.66 mm de Hg

$$\log P^o = A - \frac{B}{T + C} \quad \text{en donde } A = 8.10765 ; \quad B = 1750.286 ; \quad C = 235$$

$$\text{Humedad absoluta del aire a } T_H \quad Y_H = \frac{35.66}{760 - 35.66} \times \frac{18}{29} = 0.03052 \frac{\text{kg de vapor}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$\text{Calor húmedo } C_H = 0.24 + 0.03052(0.46) = 0.25403$$

3.2 Humedad

$$Y_1 = Y_H - \frac{(T_1 - T_H) h_c}{k_Y \lambda_H} \quad Y_1 = 0.03052 - \frac{(65 - 32) 0.25403}{578} \quad Y = 0.016 \frac{\text{kg de vapor}}{\text{kg de aire seco}}$$

4. Resultado

La humedad es de 0.016 $\frac{\text{kg de vapor}}{\text{kg de aire seco}}$

Ejemplo 7

¿Cuál es la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de saturación adiabática de una mezcla de tolueno y aire que tienen una humedad de 0.05, una temperatura de bulbo seco de 60°C y una presión de 1 atm?

1. Traducción

$$T_H = ?$$

$$T_s = ?$$

$$Y = 0.05 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$T = 60^\circ\text{C}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

2. Planteamiento

2.1 Línea de temperatura de bulbo húmedo

$$T_1 - T_H = \frac{k_Y \lambda_H}{h_c} (Y_H - Y_1)$$

2.2 Línea de temperatura de saturación adiabática

$$C_H (T - T_s) = \lambda_s (Y_s - Y)$$

$$\frac{Y_s - Y}{T_s - T} = -\frac{C_H}{\lambda_s}$$

3. Cálculos

3.1 Datos

$$\text{Densidad del aire a } 60^\circ\text{C} = 1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Viscosidad del aire 0.0195 centipoises

$$\text{Difusividad del tolueno gaseoso en el aire} = 0.092 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

3.2 Schmidt del gas

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{0.0195 \times 10^{-3}}{1.062 \times 0.092 \times 10^{-4}} = 2$$

3.3 Relación de Lewis

La relación de Lewis $\left(\frac{h_c}{k_Y}\right)$ se obtiene con el número de Schmidt en la gráfica que se encuentra en la figura 1-9.

$$\frac{h_c}{k_Y} = 0.44$$

3.4 Temperatura de bulbo húmedo

La temperatura de bulbo húmedo T_H se obtiene por medio de tanteos suponiendo una T_H .

Se sustituye en la ecuación los datos de Y_H , λ_H , a la temperatura supuesta con Y , T y $\frac{h_c}{k_Y}$

Primer tanteo:

Temperatura supuesta 32°C

$$\text{Datos: } T_H = 32^\circ\text{C}, \lambda_H = 102 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, Y_H = 0.1782 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire seco}}, T = 60^\circ\text{C},$$

$$Y = 0.05 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire seco}} \quad Y \quad \frac{h_c}{k_Y} = 0.44$$

La humedad absoluta Y_H se obtiene de la siguiente forma

La presión de vapor del tolueno a 32°C es de 41.3 mm de Hg

$$Y_H = \frac{41.3}{760 - 41.3} \times \frac{92}{29} = 0.1827 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire}}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación

$$T_H = T_1 - \frac{k_Y \lambda_H}{h_c} (Y_H - Y_1) \quad T_H = 60 - \frac{102}{0.44} (0.1872 - 0.05) \quad T_H = 30.28^\circ\text{C}$$

se obtiene que $T_H = 30.28^\circ\text{C}$ en vez de los 32°C supuestos

Después de varios intentos se obtiene que $T_H = 31^\circ\text{C}$ de acuerdo a lo siguiente:

Temperatura supuesta 31°C

$$\text{Datos: } T_H = 31^\circ\text{C}, \lambda_H = 107 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, Y_H = 0.1692 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire seco}}, T = 60^\circ\text{C}$$

$$Y \quad Y = 0.05 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire seco}}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación

$$T_H = T_1 - \frac{k_Y \lambda_H}{h_c} (Y_H - Y_1) \quad T_H = 60 - \frac{107}{0.44} (0.1692 - 0.05) \quad T_H = 31^\circ\text{C}$$

se obtiene $T_H = 31^\circ\text{C}$ que coinciden con los 31°C supuestos

3.5 Temperatura de saturación adiabática

La temperatura de saturación adiabática T_s se obtiene por medio de tanteos suponiendo una T_s .

Se sustituye en la ecuación los datos de Y_s , λ_s , a la temperatura supuesta con Y , T y C_H

Primer tanteo:

Temperatura supuesta 26°C

$$\text{Datos: } T_s = 26^\circ\text{C}, \quad \lambda_s = 108 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \quad Y_s = 0.130 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire seco}}, \quad T = 60^\circ\text{C},$$

$$Y = 0.05 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{kg de aire seco}} \quad \text{y} \quad C_H = 0.255 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco } ^\circ\text{C}}$$

El Calor húmedo del tolueno se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{El } C_p \text{ de los vapores de tolueno es de } 0.3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco } ^\circ\text{C}}$$

$$C_H = 0.24 + 0.05 (0.3) = 0.255 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco } ^\circ\text{C}}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación

$$T_s = T - \frac{\lambda_s (Y_s - Y)}{C_H} \quad T_s = 60 - \frac{108 (0.130 - 0.05)}{0.255} \quad T_s = 26^\circ\text{C}$$

se obtiene $T_s = 26^\circ\text{C}$ que coinciden con los 26°C supuestos

4. Resultado

La temperatura de bulbo húmedo es de 31°C

La temperatura de saturación adiabática es de 26°C

1. 5 La carta psicrométrica

La carta psicrométrica es una representación gráfica de las propiedades que caracterizan a una mezcla definida de un gas incondensable y un vapor condensable; en ella se representa en el eje de las abscisas la temperatura y en el eje de las ordenadas la humedad absoluta, el volumen húmedo y la entalpía teniendo cada una de ellas una escala diferente.

Existen cartas psicrométricas para varios sistemas, la más común de ellas es para el sistema aire - vapor de agua a una atmósfera de presión, estos diagramas también reciben el nombre de **cartas de humedad**. (ver el **APENDICE 3**)

La carta psicrométrica está construida en unidades de masa, pero si se desea en base molar, se pueden hacer modificaciones a las ecuaciones en las que se basa su construcción, para utilizar unidades molares.

La carta psicrométrica está construida en función de la presión total. Los datos que se requieren para su diseño son la presión de vapor, el calor latente de vaporización del componente condensable en función de la temperatura, los calores específicos del gas y el vapor puros, así como los pesos moleculares de ambos componentes.

La carta está diseñada a la presión de una atmósfera; si se desea usar la carta a una presión diferente, se pueden realizar modificaciones en las ecuaciones en las que se basa su diseño.

De manera alterna puede emplearse la carta psicrométrica diseñada a la presión de una atmósfera para otras presiones de trabajo próximas a ella, corrigiendo las humedades relativas. Para ello se multiplican los valores encontrados en este diagrama por la relación entre la presión a la que se ha construido el diagrama y la presión de operación.

La utilidad de la carta psicrométrica es facilitar la obtención de datos para una mezcla definida de aire y vapor de líquido a partir de cantidades medibles de manera conveniente, como la temperatura de bulbo seco y húmedo.

Cualquier punto de la carta de humedad representa una mezcla definida de aire y vapor de agua.

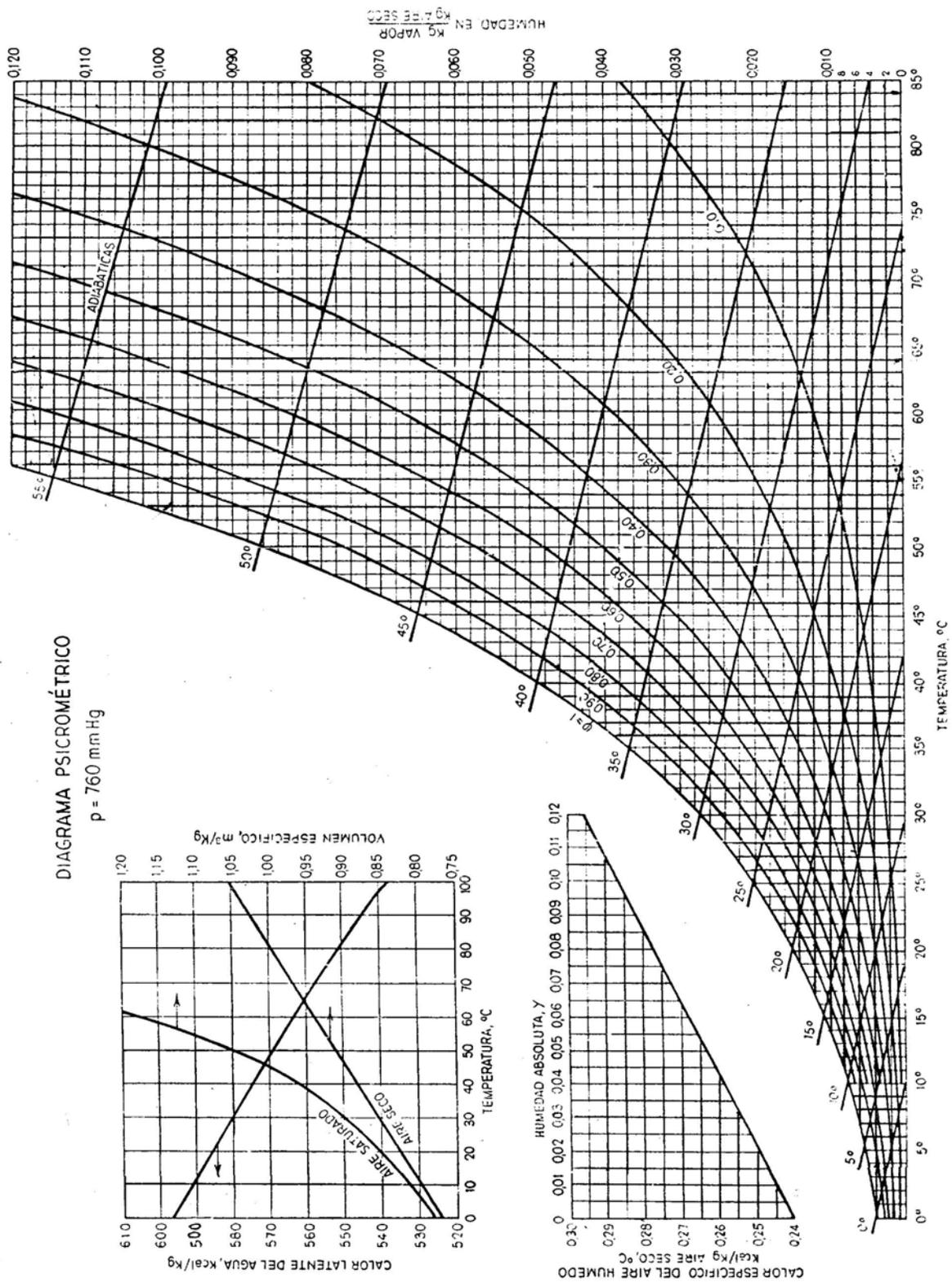


Fig. 1-11. Carta psicrométrica para el aire - vapor de agua, 1 atm. std. abs., en unidades S.I.

Fuente: Ocon G.J., G.T. Barreiro, Problemas de ingeniería química, Editorial Aguilar S.A., España; 1963.

En la carta psicrométrica se representan las siguientes propiedades.

La temperatura de bulbo seco, (T), esta representada en la abscisa del diagrama.

La humedad absoluta, (Y), está representada en la ordenada del diagrama.

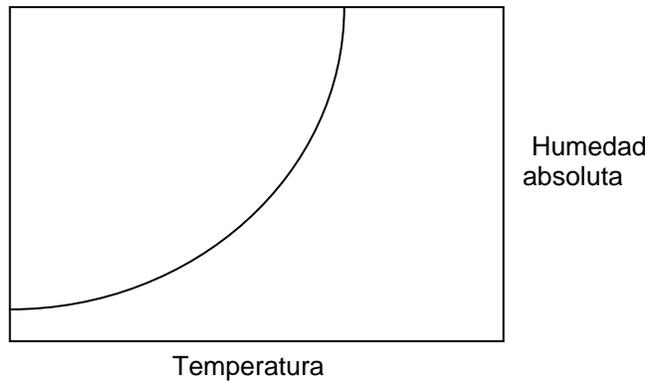


Fig. 1-12. Temperatura de bulbo seco y humedad absoluta en la carta psicrométrica

La humedad en la saturación, (Y_s), se representa por la línea curva rotulada con 100% y representa la humedad de aire saturado en función de la temperatura del aire. Las coordenadas de los puntos de esta línea se obtienen con la presión de vapor a

partir de la ecuación.
$$Y_s = \frac{P_A^o}{P_T - P_A^o} \left(\frac{PM_V}{PM_G} \right)$$

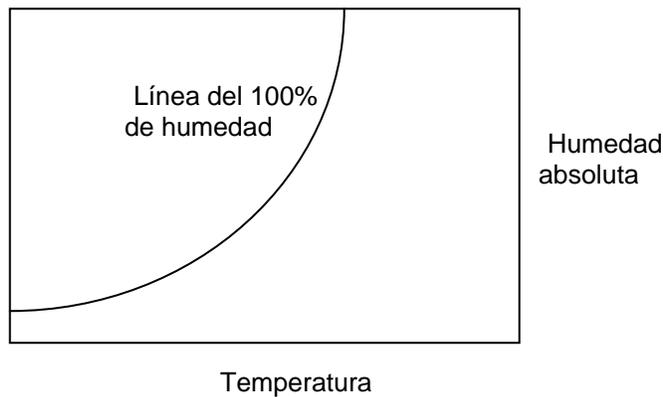


Fig. 1-13. Línea de saturación total en la carta psicrométrica

Todos los puntos situados a la izquierda de esta curva representan mezclas de gas saturado y gotas de líquido que dan origen a nieblas o nubes y que son condiciones inestables. Cualquier punto situado a la derecha de esta curva representa una mezcla gaseosa insaturada y un punto situado sobre el eje de temperaturas representa aire seco.

Las líneas de % de saturación o de saturación relativa constante tendrán una curva similar a la curva de saturación.

La humedad relativa, (Y_R), esta representada por las líneas curvas situadas entre el eje de temperaturas y la línea de saturación. El cálculo de sus distintos puntos para cada una se obtiene determinando las humedades absolutas para diferentes temperaturas aplicando la ecuación siguiente.

$$Y_{AR} = \frac{\tilde{P}_A}{P_A^o} (100)$$

La humedad porcentual, ($Y_{\%}$), se representa por las líneas curvas situadas entre la línea de saturación y el eje de temperaturas. Se pueden localizar estas líneas por interpolación lineal como lo indica la siguiente ecuación.

$$Y_{A\%} = \frac{Y_A}{Y_{As}} (100) = \frac{\tilde{P}_A}{P_A^o} \left(\frac{P_T - P_A^o}{P_T - \tilde{P}_A} \right) (100) \quad Y_{A\%} = Y_{AR} \left(\frac{P_T - P_A^o}{P_T - \tilde{P}_A} \right) (100)$$

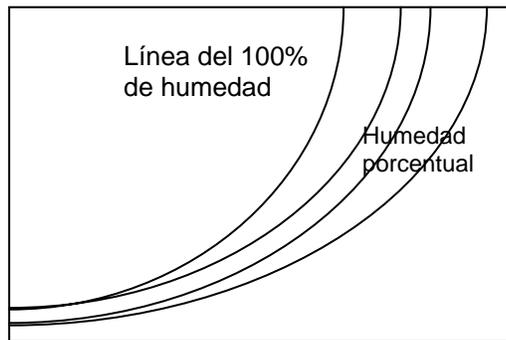


Fig. 1-14. Líneas de saturación parcial y total en la carta psicrométrica

Si se grafican las líneas de saturación porcentual constante, quedarán en ordenadas directamente proporcionales a las ordenadas de la curva de saturación a la misma temperatura. Si se grafican las líneas de saturación relativa constante no existe esta proporción directa. Las curvas de saturación relativa siempre serán más bajas que las curvas de saturación porcentual equivalentes. Por lo general, en una sola carta, tan solo se presenta una de las medidas de saturación parcial.

Para todas las humedades diferentes de 0 y 100% la humedad porcentual es menor que la humedad relativa.

La temperatura de bulbo húmedo, (T_H), se representa por líneas inclinadas de pendiente negativa y el cálculo de sus distintos puntos para cada una se obtiene determinado la humedad a la temperatura de bulbo húmedo, asignando valores a la humedad absoluta y al coeficiente psicrométrico con la ecuación siguiente.

$$T_H = T - \frac{k_y \lambda_H}{h_c} (Y_H - Y_1)$$

La temperatura de saturación adiabática, (T_s), se representa por líneas inclinadas de pendiente negativa. También se llaman líneas de enfriamiento adiabático. El cálculo de sus distintos puntos para cada una se obtiene determinando la humedad de saturación, asignando valores a la humedad absoluta, y al calor latente de vaporización en la saturación con la ecuación siguiente.

$$T_s = \frac{\lambda_s (Y_s - Y)}{C_H}$$

Para el caso de la mezcla de vapor de agua y aire las líneas de temperatura de saturación adiabática coinciden con las líneas de temperatura de bulbo húmedo en la carta psicrométrica.

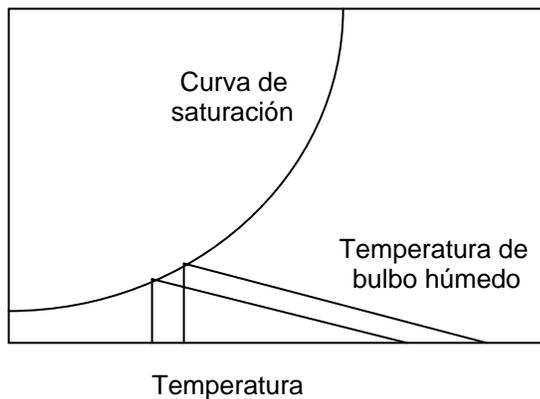


Fig. 1-15. Líneas de temperatura de bulbo húmedo en la carta psicrométrica

El volumen específico de aire seco, (V_{seco}), se representa por una línea inclinada de pendiente positiva.

El volumen húmedo del aire saturado, ($Y_{sat.}$), se representa por una línea curva inclinada hacia la derecha.

Las líneas de volumen son representaciones gráficas del volumen frente a la temperatura. Por interpolación lineal entre las líneas basada en la humedad porcentual, permite establecer el volumen húmedo del aire no saturado. Las coordenadas de los puntos de esta línea se calculan utilizando la ecuación.

$$V_H = \left(\frac{1}{PM_G} + \frac{Y}{PM_V} \right) \frac{RT}{P}$$

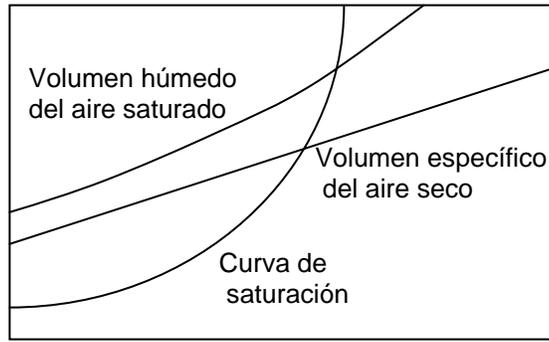


Fig. 1-16. Línea de volumen específico del aire seco y de volumen húmedo del aire saturado en la carta psicrométrica

El calor húmedo, (C_H), se representa con una línea de pendiente positiva. La escala para el calor húmedo está en la parte superior del diagrama. Esta línea se obtiene a partir de la ecuación.

$$C_H = Cp_G + Cp_V Y$$

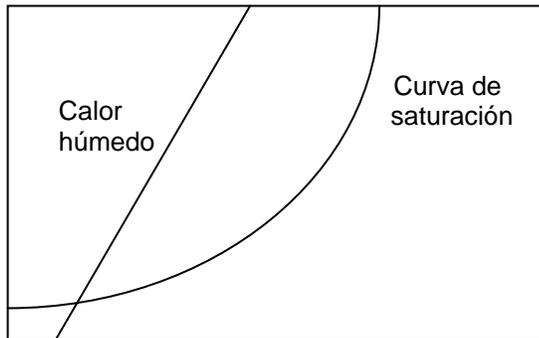


Fig. 1-17. Línea de calor húmedo en la carta psicrométrica

Entalpía (H) se representa por una curva inclinada hacia la derecha y el cálculo de sus distintos puntos se obtiene con la siguiente ecuación.

$$H = (0.24 + 0.46Y)T + 597.2 Y$$

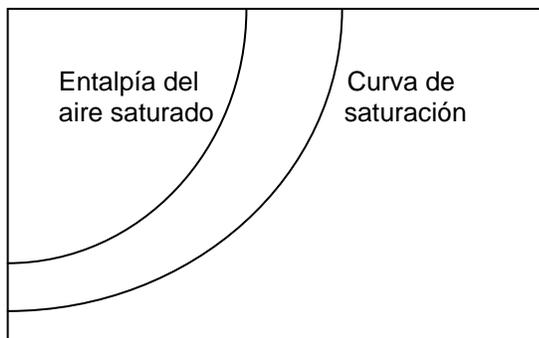


Fig. 1-18. Línea de entalpía en la carta psicrométrica

Entalpía del aire seco (H_{seco}) se representa por una recta inclinada de pendiente positiva.

Entalpía del aire saturado ($H_{\text{sat.}}$) se representa por una curva inclinada hacia la derecha.

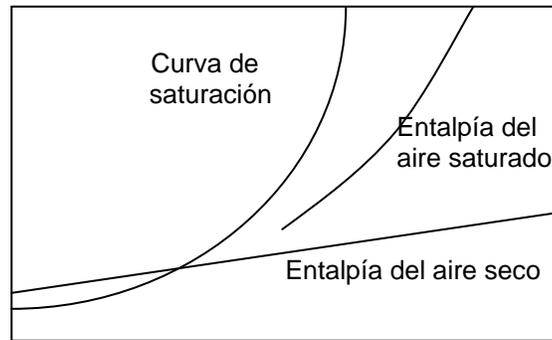


Fig. 1-19. Línea de entalpía del aire seco y de entalpía del aire saturado en la carta psicrométrica

1.5.1 Uso de la carta psicrométrica.

La utilidad de la carta psicrométrica como fuente de datos para mezclas definidas de aire y vapor de agua puede observarse en la figura siguiente.

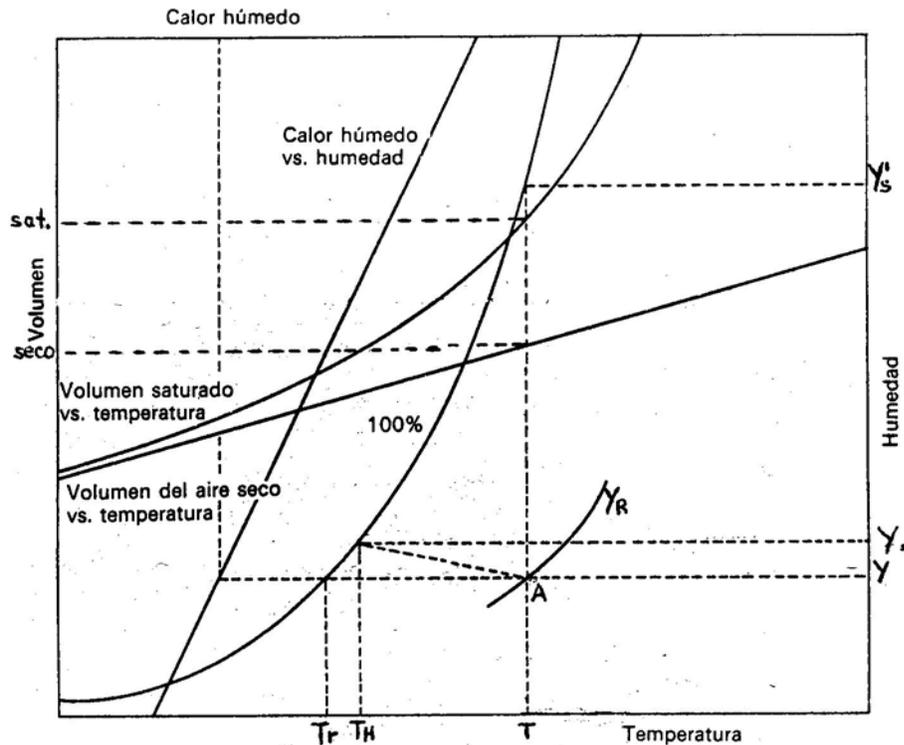


Fig. 1-20. Diagrama que muestra el uso de la carta psicrométrica

Conociendo la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo de una corriente de aire no saturado

El punto **A** representa este aire sobre la carta.

La determinación de las distintas propiedades dadas por la carta psicrométrica se realiza del siguiente modo:

El punto representativo del aire se localiza en la carta de humedad a partir de la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la línea de temperatura de bulbo húmedo.

La temperatura de bulbo seco (T) se lee en el eje de abscisas

La temperatura de bulbo húmedo (T_H) se lee en las líneas inclinadas de pendiente negativa que representan la temperatura de bulbo húmedo.

Humedad absoluta (Y) se lee en el eje de ordenadas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la línea de temperatura de bulbo húmedo.

Humedad relativa (Y_R) se lee en las curvas de humedad relativa. Puede ser necesario efectuar una interpolación vertical entre las curvas adyacentes

Temperatura de rocío (T_r) se lee en el eje de abscisas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de la ordenada correspondiente a la humedad absoluta con la curva de saturación.

Humedad de saturación por enfriamiento adiabático (Y_s) Se lee en el eje de ordenadas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la curva de saturación con la línea de temperatura de bulbo húmedo.

Humedad de saturación a la temperatura que se encuentra (Y_s') Se lee en el eje de ordenadas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la curva de saturación.

Volumen húmedo del aire (V_H) se obtiene por interpolación entre el volumen específico del aire seco y el volumen del aire saturado en función del por ciento de humedad

Volumen del aire seco (V_{seco}) se lee en el eje de ordenadas en la escala ubicada del lado izquierdo de la carta psicrométrica.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la curva de volumen del aire seco.

Volumen del aire saturado ($V_{sat.}$) se lee en el eje de ordenadas en la escala ubicada del lado izquierdo de la carta psicrométrica.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la curva de volumen del aire saturado.

Entalpía del aire (H) se lee en el eje de ordenadas en la escala ubicada del lado izquierdo de la carta psicrométrica.

El punto de lectura se obtiene trazando una línea vertical iniciando en la abscisa de temperatura de bulbo seco hasta realizar la intersección con la ordenada correspondiente a la humedad absoluta. Se continua trazando la línea paralela a las curvas adyacentes de temperatura de bulbo húmedo hasta hacer contacto con la curva de saturación y de ahí se continua la trazando la línea en forma vertical hasta realizar la intersección con la curva de entalpía del aire. En ese punto se traza una línea horizontal hacia la izquierda para leer el valor de entalpía en la escala.

Ejemplo 8

Una muestra de aire - vapor de agua tiene una temperatura de bulbo seco de 35°C y una temperatura de bulbo húmedo de 22°C. A la presión atmosférica de 760 mm de Hg. Empleando la carta psicrométrica determine las siguientes propiedades.

- a) La humedad absoluta
- b) La humedad relativa
- c) La temperatura de rocío
- d) La humedad de saturación por enfriamiento adiabático
- e) La humedad de saturación a la temperatura que se encuentra
- f) El volumen húmedo del aire
- e) La entalpía del aire

1. Traducción

La masa del aire no esta saturado

$$T = 35^{\circ}\text{C}$$

$$T_H = 22^{\circ}\text{C}$$

$$P = 760 \text{ mm de Hg}$$

$$Y = ?$$

$$Y_R = ?$$

$$T_r = ?$$

$$Y_s = ?$$

$$Y_s' = ?$$

$$V_H = ?$$

$$H = ?$$

2. Planteamiento

El problema indica que debe resolverse empleando la carta psicrométrica a la presión de una atmósfera. (**APENDICE 3 A**)

3. Cálculos

3.1 Localización de la masa de aire en la carta de humedad

El punto representativo del aire sobre la carta se localiza a partir de la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la línea de temperatura de bulbo húmedo.

La temperatura de bulbo seco se lee en el eje de abscisas.

La temperatura de bulbo húmedo se lee en las líneas inclinadas de pendiente negativa

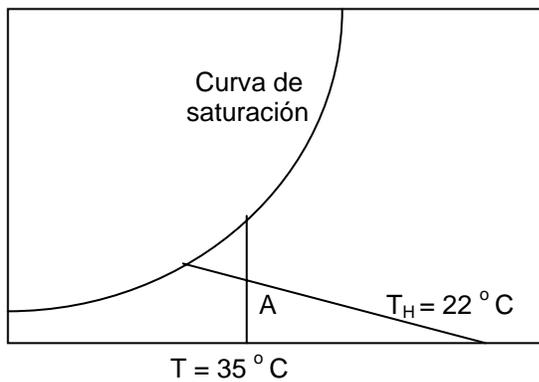


Fig. 1-21. Uso de la carta de humedad para localizar la muestra de aire-vapor de agua

3.2 Humedad absoluta (Y)

Se lee en el eje de ordenadas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la línea de temperatura de bulbo húmedo.

$$Y = 0.0114$$

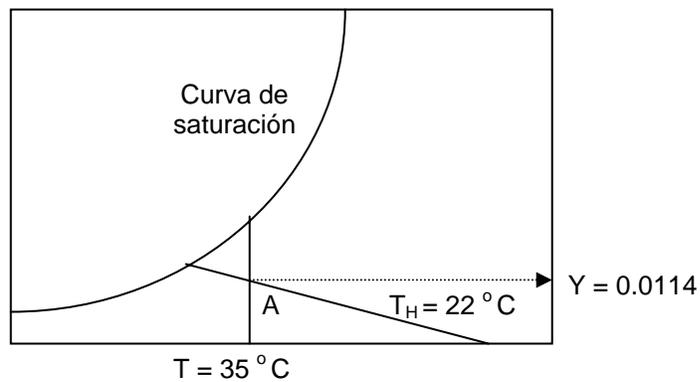


Fig. 1-22. Uso de la carta de humedad para obtener la humedad absoluta

3.3 Humedad relativa(Y_R)

Se lee en las curvas de humedad relativa

Puede ser necesario efectuar una interpolación vertical entre las curvas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la ordenada correspondiente a la humedad absoluta con la línea de temperatura de bulbo seco

$$Y_R = 32.5\%$$

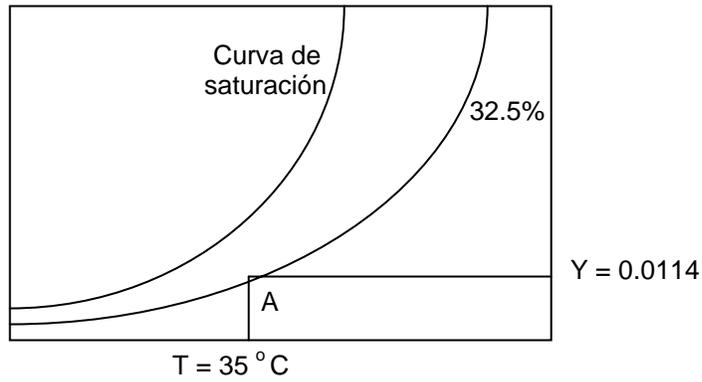


Fig. 1-23. Uso de la carta de humedad para obtener la humedad relativa

3.4 Temperatura de rocío(T_r)

Se lee en el eje de abscisas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de la ordenada correspondiente a la humedad absoluta con la curva de saturación.

$$T_r = 16^\circ\text{C}$$

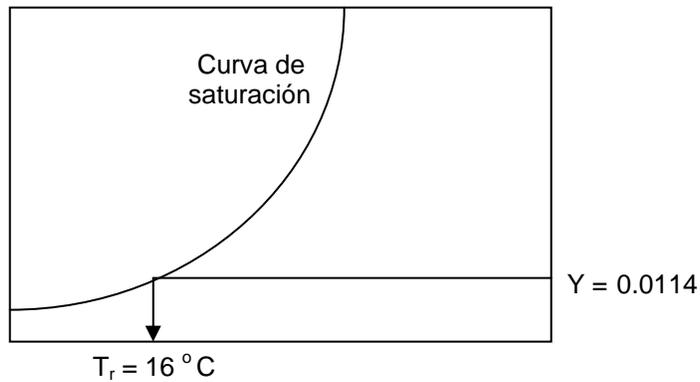


Fig. 1-24. Uso de la carta de humedad para obtener la temperatura de rocío

3.5 Humedad de saturación por enfriamiento adiabático(Y_s)

Se lee en el eje de ordenadas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la curva de saturación con la línea de temperatura de bulbo húmedo.

$$Y_s = 0.0165 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

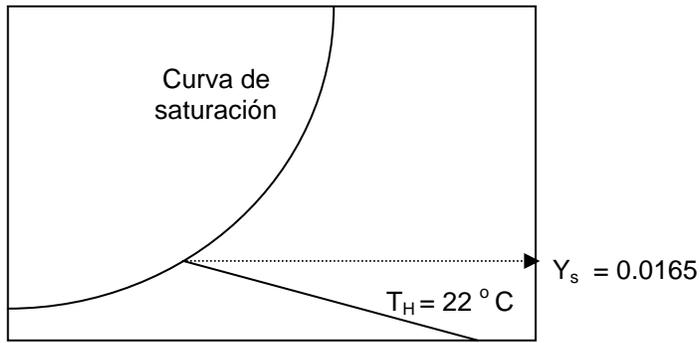


Fig. 1-25. Uso de la carta de humedad para obtener la humedad de saturación por enfriamiento adiabático

3.6 Humedad de saturación a la temperatura que se encuentra(Y_s')

Se lee en el eje de ordenadas.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la curva de saturación.

$$Y_s' = 0.0385 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

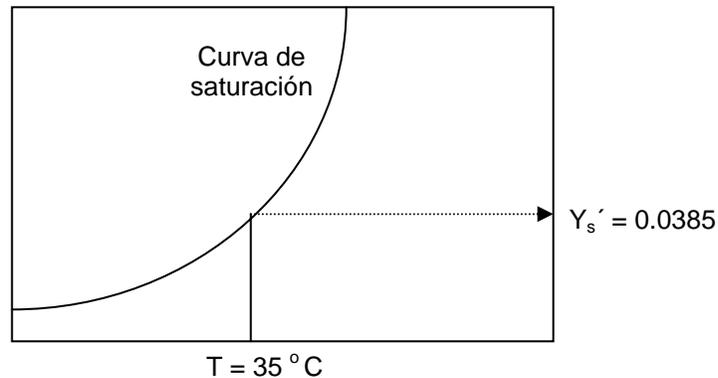


Fig. 1-26. Uso de la carta de humedad para obtener la humedad de saturación a la temperatura que se encuentra el aire

3.7 Volumen húmedo del aire(V_H)

Se obtiene por interpolación determinando el volumen específico del aire seco y el volumen del aire saturado.

Volumen específico del aire seco(V_{seco})

Se lee en el eje de ordenadas en la escala ubicada del lado izquierdo de la carta psicrométrica.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la curva de volumen específico del aire seco.

$$V_{\text{seco}} = 0.872 \frac{m^3}{\text{kg de aire seco}}$$

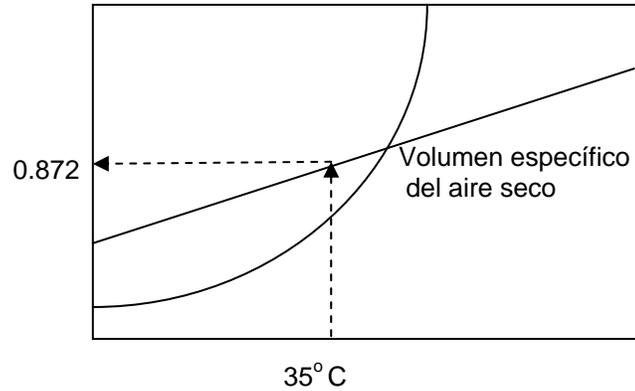


Fig. 1-27. Uso de la carta de humedad para obtener el volumen específico del aire seco

Volumen del aire saturado($V_{\text{sat.}}$)

Se lee en el eje de ordenadas en la escala ubicada del lado izquierdo de la carta psicrométrica.

El punto de lectura se obtiene por la intersección de la línea de temperatura de bulbo seco con la curva de volumen del aire saturado.

$$V_{\text{sat.}} = 0.922 \frac{m^3}{\text{kg de aire seco}}$$

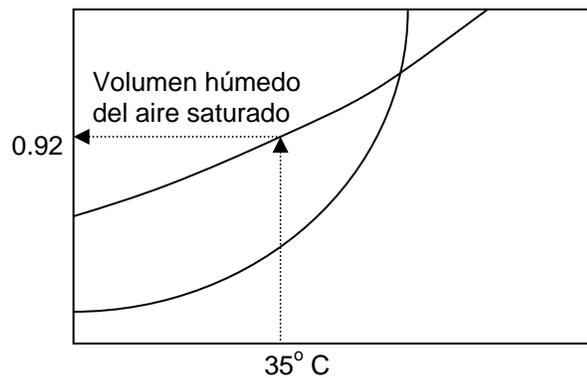


Fig. 1-28. Uso de la carta de humedad para obtener el volumen del aire saturado

La interpolación para la humedad relativa de 32.3% es:

$$V_H = V_{\text{seco}} + Y_R(V_{\text{sat.}} - V_{\text{seco}})$$

$$V_H = 0.872 + 0.324(0.922 - 0.872)$$

$$V_H = 0.888 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

3.8 Entalpía del aire (H)

Se lee en el eje de ordenadas en la escala ubicada del lado izquierdo de la carta psicrométrica.

El punto de lectura se obtiene trazando una línea vertical iniciando en la abscisa de temperatura de bulbo seco hasta realizar la intersección con la ordenada correspondiente a la humedad absoluta. Se continúa trazando la línea paralela a las curvas adyacentes de temperatura de bulbo húmedo hasta hacer contacto con la curva de saturación y de ahí se continúa la trazando la línea en forma vertical hasta realizar la intersección con la curva de entalpía del aire. En ese punto se traza una línea horizontal hacia la izquierda para leer el valor de entalpía en la escala.

$$H = 64.5 \frac{kJ}{kg \text{ de aire seco}}$$

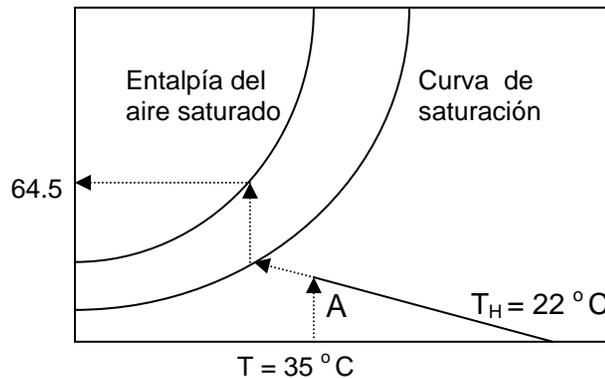


Fig. 1-29. Uso de la carta de humedad para obtener la entalpía del aire

4. Resultados

La humedad absoluta es $0.0114 \frac{kg \text{ de vapor de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$

La humedad relativa es 32.4%

La temperatura de rocío es 16°C

La humedad de saturación por enfriamiento adiabático es 0.0165

Continuación de los resultados

La humedad de saturación a la temperatura que se encuentra es

$$0.0385 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$\text{El volumen húmedo del aire } 0.888 \frac{\text{m}^3}{\text{kg de aire seco}}$$

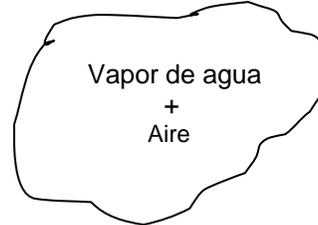
$$\text{La entalpía del aire es } 64.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg de aire seco}}$$

Ejemplo 9

La temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo de un aire que va a entrar a un secador son, respectivamente, 50°C y 30°C cuando la presión atmosférica es de 760 mm de Hg.
 ¿Qué datos adicionales se pueden obtener con la carta de humedad?

1. Traducción

$T = 50^{\circ}\text{C}$	$Y = ?$
$T_H = 30^{\circ}\text{C}$	$Y_R = ?$
$P = 760 \text{ mm Hg}$	$T_r = ?$
	$C_H = ?$
	$V_H = ?$



2. Planteamiento

El problema indica que se debe usar la carta de humedad a 760 mm de Hg. (**APENDICE 3 C**)

3. Cálculos

3.1 Humedad absoluta

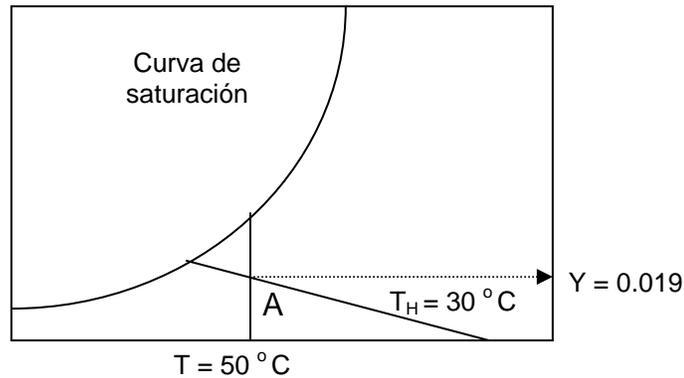


Fig. 1-30. Uso de la carta de humedad para obtener la humedad absoluta

3.2 Humedad relativa

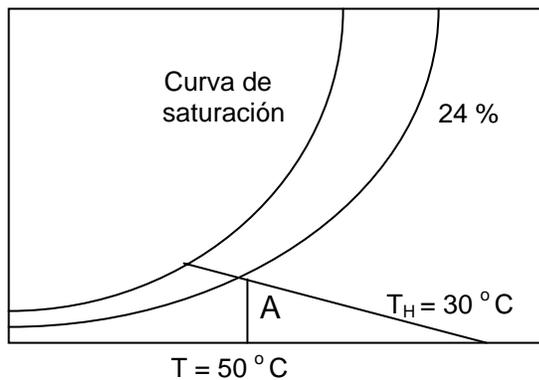


Fig. 1-31. Uso de la carta de humedad para obtener la humedad porcentual

3.3 Temperatura de rocío

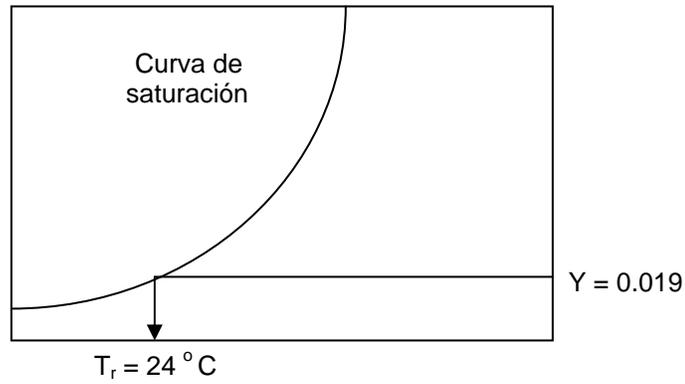


Fig. 1-32. Uso de la carta de humedad para obtener la temperatura de rocío

3.4 Calor húmedo

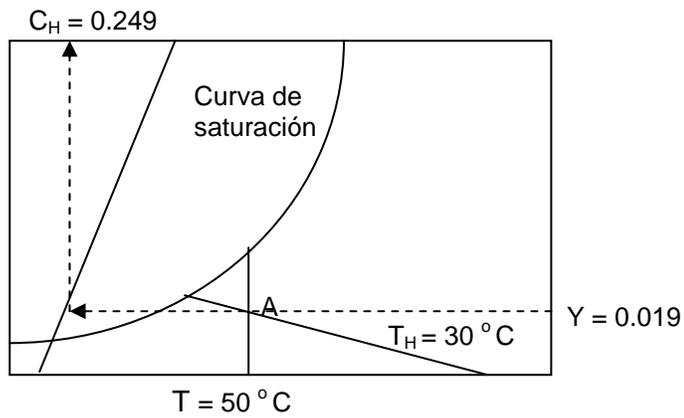


Fig. 1-33. Uso de la carta de humedad para obtener el calor húmedo

3.5 Volumen húmedo

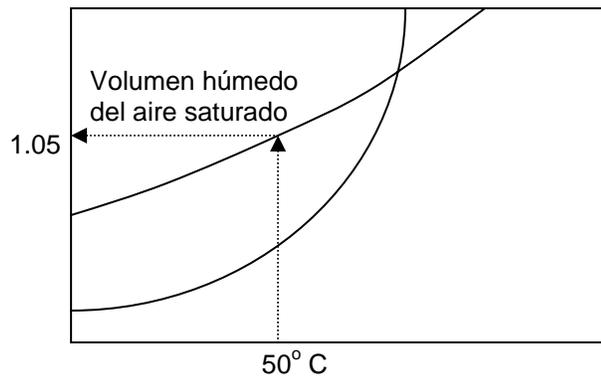


Fig. 1-34. Uso de la carta de humedad para obtener el volumen del aire saturado

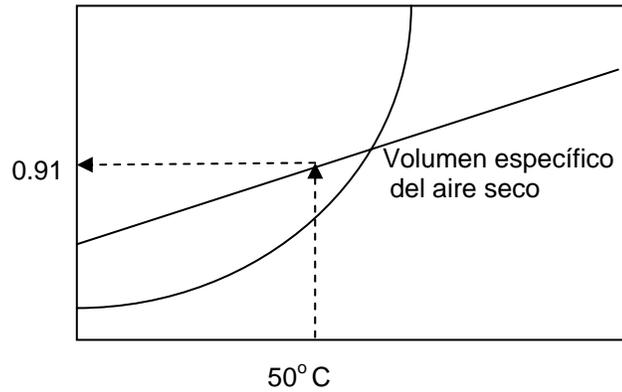


Fig. 1-35. Uso de la cata de humedad para obtener el volumen específico del aire seco

$$\text{Volumen seco } 0.91 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

$$\text{Volumen saturado } 1.05 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

$$V_H = V_{\text{seco}} + Y_R (V_{\text{saturado}} - V_{\text{seco}})$$

$$V_H = 0.91 + 0.24(1.05 - 0.91)$$

$$V_H = 0.943 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

4. Resultados.

$$\text{Humedad } 0.019 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$$

Humedad relativa 24 %

Temperatura de rocío = 24°C

$$\text{Calor húmedo } 0.249 \frac{kcal}{kg \text{ de aire seco } ^\circ C}$$

$$\text{Volumen seco } 0.091 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

$$\text{Volumen húmedo } 0.943 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

CAPITULO II

ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

2.1 Acondicionamiento de aire

La operación unitaria de acondicionamiento de aire tiene como objeto el diseño de proceso y de los equipos necesarios para producir un aire que llene las condiciones requeridas de humedad, temperatura, confort y limpieza que requiera un usuario industrial o comercial. La comodidad de las personas bajo el punto de vista del aire acondicionado depende de cuatro factores principales, que son:

- a) la temperatura del aire.
- b) la humedad del aire
- c) el movimiento del aire
- d) la pureza del aire

Para establecer estándares de temperatura, humedad, velocidad y pureza del aire es indispensable encontrar valores óptimos para que el cuerpo humano tenga una sensación de comodidad. Debido a las grandes diferencias fisiológicas y psicológicas de los individuos encontrar valores comunes de comodidad es difícil. La mejor forma de solucionar este problema es mediante la carta de temperatura efectiva. La temperatura efectiva es un índice empírico del grado de calor que percibe un individuo cuando se expone a varias combinaciones de temperatura, humedad y movimiento de aire. Muy baja humedad produce la sensación de sequedad en la piel, la boca y la nariz, la humedad alta hace que la transpiración se acumule y que el cuerpo se cubra de sudor, la ropa esté húmeda y se produzcan malos olores las altas velocidades del aire causan chiflones, corrientes, resfriados y otras molestias. Cuando la humedad y la velocidad de aire, junto con la temperatura se controlan adecuadamente, el índice de temperatura efectiva realmente mide la comodidad.

La carta de comodidad muestra aproximadamente, en porcentaje, la cantidad de personas que se sienten cómodas con cada combinación. Las prácticas de acondicionamiento de aire indican que la velocidad del aire debe estar entre 3 a 10 metros por minuto cuando las personas están sin hacer alguna actividad física, arriba de 12 metros por minuto el aire causa sensación de chiflón y se usa solamente en lugares donde se hace ejercicio físico.

Desde luego es evidente que las personas que viven en lugares fríos están cómodas a temperaturas efectivas más bajas que los que viven en climas cálidos. La temperatura efectiva deseable en verano difiere de la del invierno, siendo la deseable en verano de 20 a 24°C con temperaturas de bulbo seco de 22 a 29 y con humedades relativas que vayan de 40 a 60% y en invierno las temperaturas efectivas van de 19 a 22°C con humedades de 35%.

Existen tablas que muestran las condiciones interiores durante el verano, partiendo del tipo de actividad de los ocupantes, del tiempo que los ocupantes están dentro del salón por acondicionar y de la localización del lugar. Sin embargo, la mejor manera de determinar estas condiciones es efectuando un análisis de los factores que rigen la temperatura efectiva en combinación con la carta de comodidad.

La cantidad de aire recomendada para la ventilación depende del número de personas, de la actividad física que estas realicen, de la contaminación, los olores y del humo. La tabla siguiente muestra algunos valores típicos usados para el diseño de acondicionamiento de aire¹.

¹Eduardo Hernández Goribar - Fundamento de aire acondicionado y refrigeración- Limusa – México – 1984

Aplicación	Humo de cigarros	m ³ / min por persona	m ³ / min mínimos de aire por m ² de techo
Departamentos	poco	0.85	0.1
Bancos	poco	0.3	0.1
Peluquerías	considerable	0.4	0.1
Salones de belleza	ocasional	0.3	0.1
Bares	mucho	0.85	0.1
Salas de juegos	excesivo	1.5	0.1
Corredores			0.075
Tiendas de departamento		0.2	0.015
Garajes			0.3
Fábricas	nada	0.3	0.04
Cafeterías	considerable	0.3	0.1
Habitaciones de hotel	mucho	0.85	0.1
Cocinas de restaurantes			1.2
Quirófanos de hospitales	nada	0.85	0.6
Laboratorios	nada	0.6	0.1
Restaurantes	considerable	0.85	0.075
Teatros	nada	0.2	
Salones de clase	poco	0.3	0.1
Oficinas generales	poco	0.4	0.07
Oficinas privadas	considerable	0.8	0.075
Tocadores (baños públicos)			0.6
Salones de reunión	mucho	1.4	0.4
Funerarias (salones)	nada	0.3	0.1

Fig. 2-1. Tabla de datos de ventilación recomendada para diferentes lugares

Fuente: Hernández G.E., Fundamentos de Aire acondicionado y refrigeración, Editorial Limusa, México, 1984.

La cantidad de aire requerido depende de la contaminación del aire por los olores y humos. La relación entre el volumen del espacio, el número de personas y la contaminación, proporciona la pauta para determinar la ventilación necesaria. La tabla siguiente proporciona los estándares aceptados en ventilación, que los diseñadores han obtenido por experiencia.

2.1.1 Carta de comodidad

Los parámetros usados para definir la calidad del aire acondicionado son los llamados parámetros de confort.

La temperatura efectiva es un índice empírico del grado de calor que percibe un individuo cuando se expone a varias combinaciones de temperatura, humedad y movimiento del aire.

En la carta de temperatura efectiva se muestra una relación entre los factores que permiten una cantidad de aire.

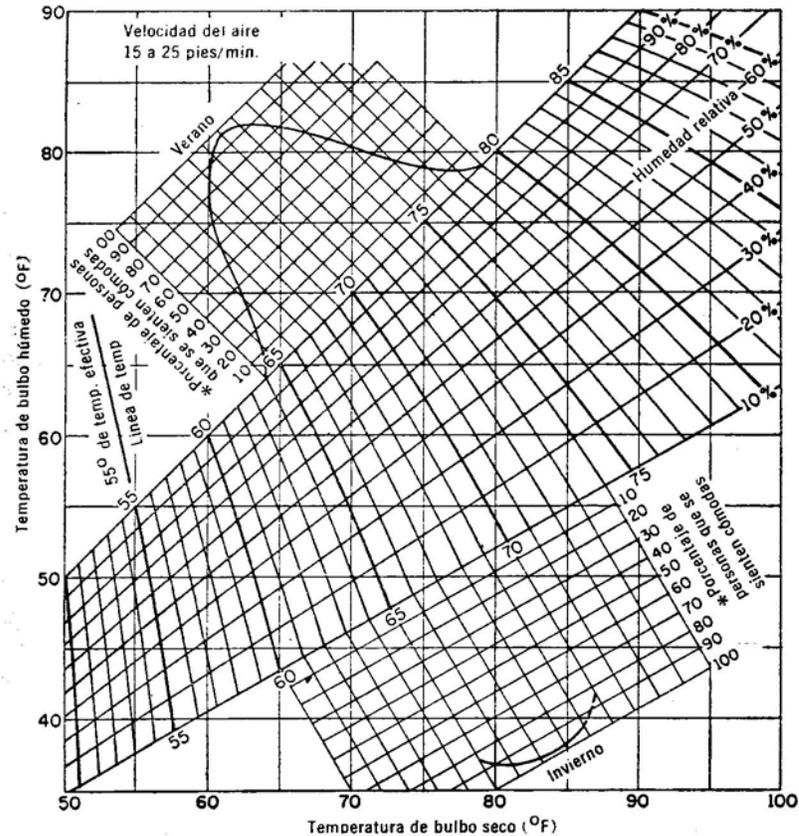


Fig. 2-2. Carta de comodidad

Fuente: Hernández G.E., Fundamentos de Aire acondicionado y refrigeración, Editorial Limusa, México, 1984.

2.1.1.1 Factores que determinan la temperatura efectiva

Algunos de los factores que pueden cambiar la temperatura efectiva son:

a) Aclimatación diferente.

Las personas que viven en climas fríos están más cómodas a temperatura efectiva más baja que los que viven en lugares cálidos.

La temperatura efectiva cómoda depende de la temperatura exterior

La temperatura deseable entre el verano y el invierno es muy diferente, como puede apreciarse en la carta.

Temperatura efectiva deseable: invierno, 67 a 71°F; verano, 69 a 73°F.

b) Duración de la ocupación

Una importante variación de la temperatura efectiva es la duración de las personas dentro del volumen controlado.

Mientras más poco tiempo se ocupe el volumen controlado debe haber un mayor cambio de temperatura; el cambio es con respecto a la temperatura exterior.

c) Efectos de choque

Este efecto se debe a la entrada rápida del exterior a un lugar controlado. Este problema es más grave en verano. Para evitar el choque, en los pasillos y corredores se mantiene una temperatura efectiva media entre el exterior y el interior

d) Actividad

La actividad es un importante factor para determinar la temperatura efectiva, y la recomendación para elegir una temperatura efectiva varía de acuerdo con la actividad.

Ejemplo 10

Un salón está a 74°F de bulbo seco y una humedad relativa de 60%, Se quiere conocer la temperatura necesaria para obtener la misma temperatura efectiva con aire a 40% de humedad relativa.

1. Traducción

Condiciones iniciales del aire del salón:

$$T = 74^{\circ}\text{F} , \quad Y_r = 60\%$$

Se desea conocer

$$T \text{ con } Y_r = 40\%$$

2. Planteamiento

Este problema se puede resolver usando la carta de comodidad

3. Cálculos

La condición de 74°F y 60% está sobre la línea de temperatura efectiva de 70°F; para no cambiar la temperatura efectiva de 70°F se prolonga hasta cortar la línea de humedad relativa de 40% y se encuentra que la temperatura de bulbo seco es de 77°F

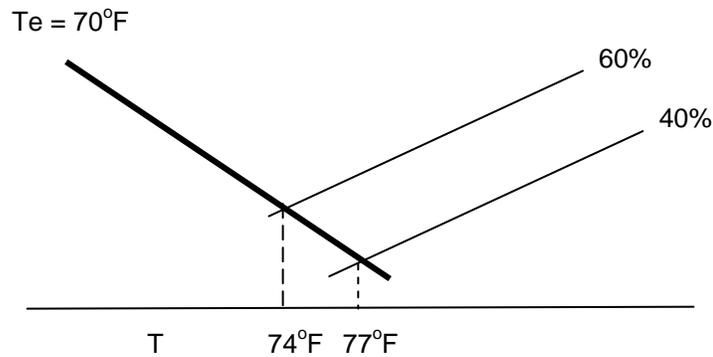


Fig. 2-3. Carta de comodidad

4. Resultado

La temperatura necesaria del aire en el salón es de 77°F

2.2 Procesos sencillos de acondicionamiento de aire

En la carta de humedad o psicrométrica se pueden seguir algunos de los procesos más sencillos para acondicionar aire

2.2.1 Calentamiento o enfriamiento de un flujo de aire a humedad y presión constante

En este proceso un gas A puede enfriarse o calentarse haciéndolo pasar por un cambiador de calor para llegar a las condiciones finales B o C.

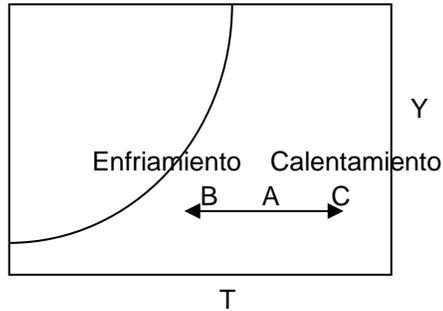


Fig. 2-4. Calentamiento o enfriamiento de un flujo de aire en la carta psicrométrica

2.2.2 Humidificación adiabática de un flujo de aire

En este proceso un aire A se hace pasar por una torre de humidificación para que adiabáticamente llegue a las condiciones B.

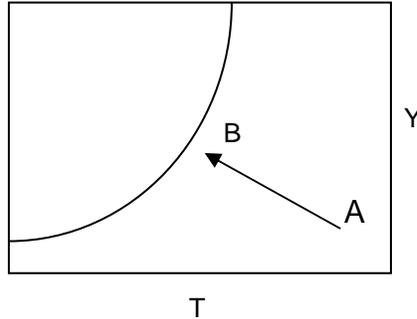


Fig. 2-5. Proceso de humidificación adiabática en la carta psicrométrica

2.2.3 Mezcla de dos flujos de aires

En este proceso dos aires a diferentes condiciones de humedad y temperatura A y B se mezclan para dar un aire en C

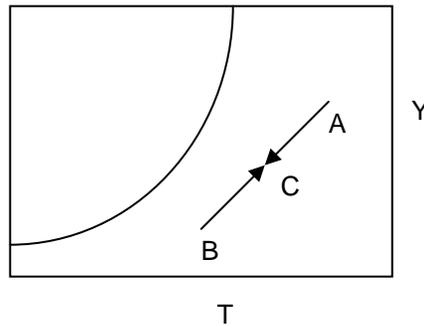


Fig. 2-6. Mezcla de dos flujos de aire en la carta psicrométrica

2.2.4 Flujo de aire sobre una superficie seca y más fría que el aire

En este proceso la mezcla se pone en contacto con una superficie seca y más fría que la temperatura de bulbo seco de la mezcla. El flujo de aire disminuye su temperatura.

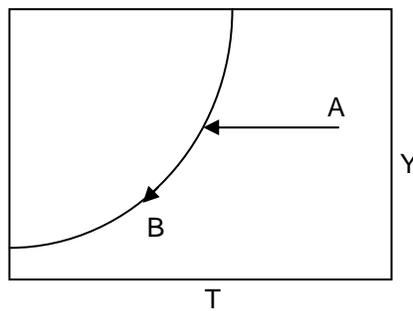


Fig. 2-7. Enfriamiento y deshumidificación del aire en la carta psicrométrica

2.2.5 Enfriamiento y deshumidificación de un flujo de aire

La *deshumidificación* es necesaria muy a menudo en procesos de aire acondicionado o en procesos industriales.

La humedad puede removerse por absorción en un líquido o en sólidos (procesos llamados de “*absorción química*”) o enfriando por debajo del punto de rocío.

El proceso se lleva a cabo en dos etapas: Primero, *enfriando hasta el punto de rocío*; después, hasta *condensar* y eliminar el agua necesaria, para alcanzar el punto de rocío del estado final. Una vez separada la humedad, se puede *recalentar* hasta la condición final, sin añadir ni absorber agua.

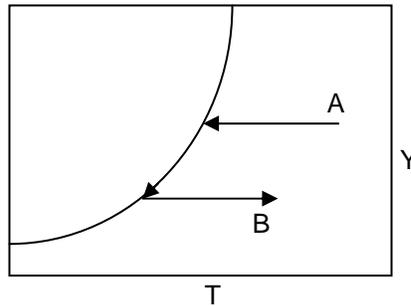


Fig. 2-8. Enfriamiento y deshumidificación del aire en la carta psicrométrica

2.2.6 Calentamiento y humidificación de un aire

Cuando el aire pasa a través de un humidificador, el aire se humidifica y puede calentarse o permanecer a la misma temperatura. Durante este proceso, el aire incrementa su humedad específica y entalpía, y la temperatura de bulbo seco aumenta o disminuye según la temperatura inicial del aire y del agua. Si se suministra suficiente agua en relación con el aire, éste se acercara a la saturación.

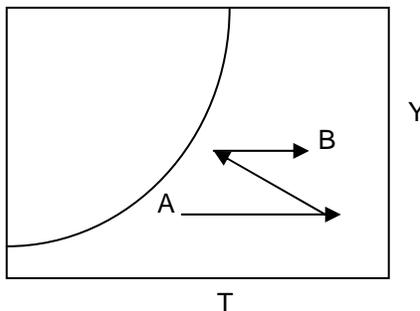


Fig. 2-9. Calentamiento y humidificación del aire en la carta psicrométrica

Ejemplo 11

Se quiere mezclar $1000\text{m}^3/\text{h}$ de aire a 50°C y 30°C de bulbo húmedo con aire a 15°C y una humedad relativa del 50%. Si la mezcla resultante está a 25°C .

Calcule:

- A) La humedad del aire resultante
- B) El flujo volumétrico del aire adicionado
- C) El flujo volumétrico de aire resultante

1. Traducción

$Y = ?$

$C_{a2} = ?$

$C_{a3} = ?$

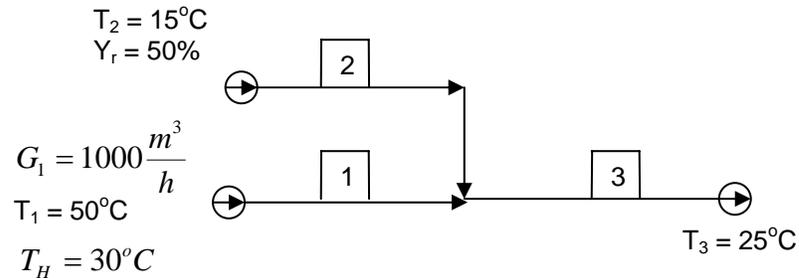


Fig. 2-10. Diagrama de la mezcla de dos flujos de aire

2. Planteamiento

Este problema se puede resolver por medio de la carta psicrométrica. Si se localizan las condiciones de la corriente (1) y se unen con las condiciones de la corriente (2), la mezcla resultará sobre la línea que une los dos puntos y allí a 25°C , se encontrarán las condiciones de la mezcla.

2.2 Balance de masa

$$G_{S1} + G_{S2} = G_{S3}$$

$$G_{S1}Y_1 + G_{S2}Y_2 = G_{S3}Y_3$$

3. Cálculos

3.1 Humedades

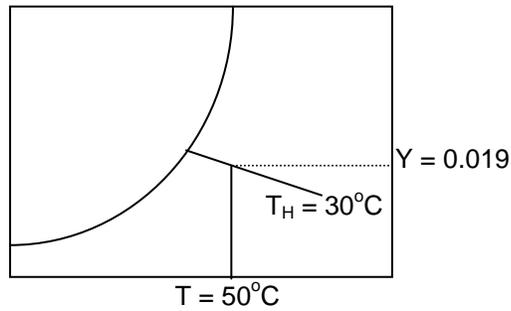


Fig. 2-11. Humedad del flujo uno de aire en la carta psicrométrica

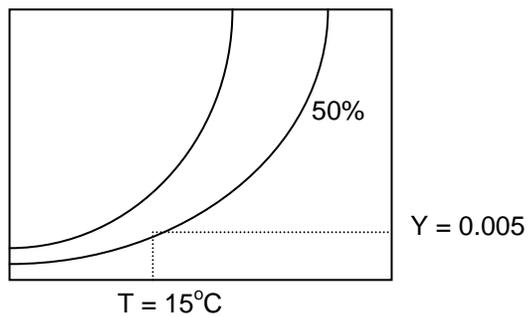


Fig. 2-12. Humedad del flujo dos de aire en la carta psicrométrica

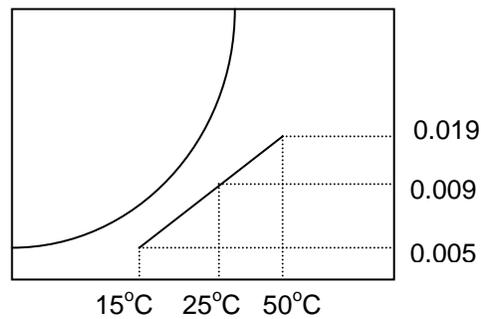


Fig. 2-13. Humedad de la mezcla de los dos flujos de aire en la carta psicrométrica

3.3 Volumen húmedo del aire en la corriente (1)

$$V_{H_1} = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.019}{18} \right) 0.082 \times 323 = 0.94 \frac{m^3}{kg}$$

3.4 Aire seco contenido en el volumen inicial

$$G_{s1} = \frac{1000}{0.94} = 1064 \frac{kg}{h}$$

3.5 Balance de masa

$$G_{s1} + G_{s2} = G_{s3}$$

$$1064 + G_{s2} = G_{s3} \quad (I)$$

$$1064(0.019) + G_{s2}(0.005) = G_{s3}(0.009) \quad (II)$$

Resolviendo simultáneamente

$$G_{s2} = 2660 \frac{kg}{h} \quad ; \quad G_{s3} = 3724 \frac{kg}{h}$$

3.6 Volumen húmedo del aire en la corriente (2)

$$V_{H_2} = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.005}{18} \right) 0.082 \times 288 = 0.818 \frac{m^3}{kg}$$

Flujo volumétrico del aire que se debe acondicionar

$$C_{a_2} = 2660 (0.818) = 2175.8 \frac{m^3}{h}$$

3.7 Volumen húmedo del aire en la corriente resultante (3)

$$V_{H_3} = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.009}{18} \right) 0.082 \times 298 = 0.852 \frac{m^3}{kg}$$

Flujo volumétrico del aire resultante

$$C_{a_3} = 3724 (0.852) = 3172.8 \frac{m^3}{h}$$

4. Resultados

La humedad del aire resultante es de $0.009 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$

El flujo volumétrico de aire adicionado es de $2175.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

El flujo volumétrico de aire resultante es de $3172.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

Ejemplo 12

Un sistema de acondicionamiento de aire se construye para cambiar completamente el aire de un laboratorio cada diez minutos sin recirculación. El laboratorio es de dos pisos de 15 x 60 x 3m y el aire debe suministrarse a 24°C con un 40 % de saturación. El sistema de acondicionamiento de aire toma aire externo, lo refrigera y después lo recalienta en un intercambiador, usando vapor de agua a 3.5 kg / cm² manométricas. Cuando el aire externo está a 38°C y con 90 % de humedad, determine el volumen de aire que debe manejar el sistema y la temperatura a la cual se debe enfriar el aire. Determine también las toneladas de refrigeración (una tonelada de refrigeración = 3024 kcal/h) así como los kilogramos de agua requeridos para el calentamiento si la presión de trabajo es de 1 atm.

1. Traducción

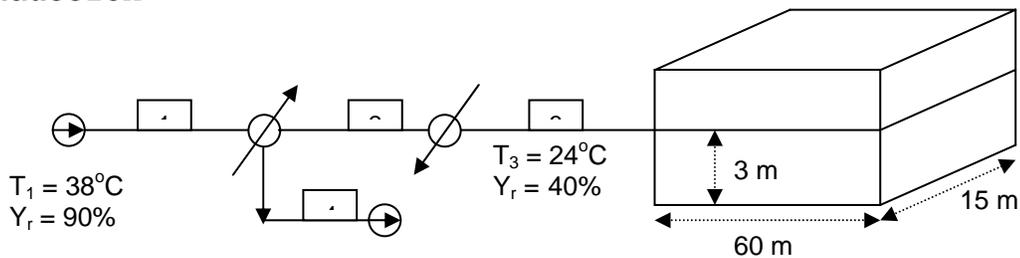


Fig. 2-14. Diagrama de un sistema de acondicionamiento de aire

2. Planteamiento

2.1 Volumen de aire

$$V = (L \times A \times h) 2$$

2.2 Proceso

El proceso de deshumidificación del aire se puede observar gráficamente en la carta psicrométrica

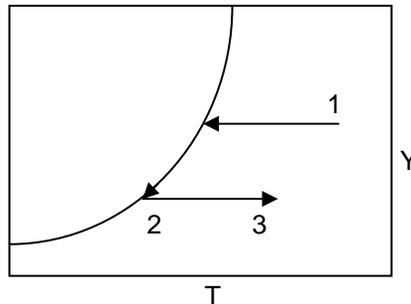


Fig.2-15. Proceso de deshumidificación del aire en la carta psicrométrica

2.3 Balances

$$G_{S1} = G_{S2}$$

$$G_{S1} Y_1 = G_{S3} Y_3 + L_4$$

2.4 Balances de energía

$$G_{S1} H_1 = G_{S2} H_2 + L_4 H + Q_R$$

$$Q_C = G_S (H_3 - H_2)$$

3. Cálculos

3.1 Volumen

$$V = (15 \times 60 \times 3)^2 = 5400 \text{ m}^3/10 \text{ min} = 32400 \text{ m}^3/\text{h}$$

3.2 Condiciones del aire entrante

Del diagrama

$$Y_1 = 0.0395 \quad , \quad C_H = 0.258 \quad , \quad H_1 = 33.39 \text{ kcal/kg A.S}$$

3.3 Condiciones del aire saliente

Del diagrama

$$Y_3 = 0.0075 \quad , \quad C_H = 0.2434 \quad , \quad H_3 = 10.32 \quad , \quad V_H = 0.849 \text{ m}^3/\text{kg A.S}$$

3.4 Aire requerido

$$G_S = 32400 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{\text{kg A.S.}}{0.849 \text{ m}^3} = 38162 \frac{\text{kg A.S.}}{\text{h}}$$

3.5 Enfriamiento

Los datos de enfriamiento se obtienen siguiendo el proceso en una carta de humedad.

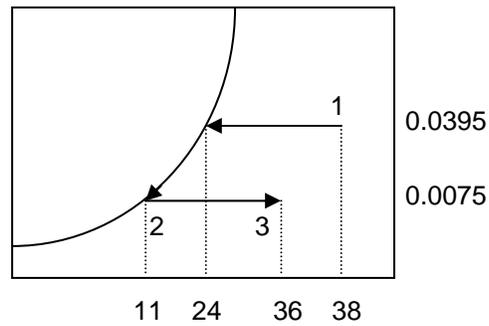


Fig. 2-16. Condiciones de humedad y temperatura en la carta psicrométrica

El aire se debe enfriar hasta 11°C

$$H_2 = 7.15 \text{ kcal/kg}$$

Agua condensada

$$L_4 = 38162 (0.0395 - 0.0075) = 1221 \frac{\text{kg de agua}}{h}$$

3.6 Toneladas de refrigeración

$$Q_r = 38162 (33.39 - 7.15) - 1221 (1)(11) = 987753 \frac{\text{kcal}}{h} \quad 327 \text{ ton de refrigeración}$$

$$Q_c = 38162 (10.32 - 7.15) = 117638 \frac{\text{kcal}}{h}$$

Presión absoluta del vapor = 4.53 kg/cm²

Temperatura del vapor saturado 140°C

Calor latente del vapor 536 kcal/kg

Vapor requerido

$$117\ 638 = G_v(536)$$

$$G_v = 220 \text{ kg/h}$$

4. Resultados

Se requiere enfriar el aire hasta 11°C

Las toneladas de refrigeración requeridas son 327

El vapor de calentamiento necesario es de 220 kg/h

Ejemplo 13

Para un cierto proceso de humedad y temperatura controladas se necesitan 7000 kg de aire seco con 20 % de humedad relativa y 55°C. El aire de proceso se puede obtener acondicionando aire con 20% de humedad y 21°C, calentándolo primero y luego humidificando lo adiabáticamente hasta la humedad deseada, y finalmente recalentándolo hasta 55°C

El proceso de humidificación se lleva a cabo en una cámara de rociado. El aire saliente de esta cámara está a 4°C más caliente que la temperatura de saturación adiabática.

Presión de trabajo 1 atm.

Calcular:

¿A qué temperatura debe precalentarse?

¿A qué temperatura saldrá de la cámara?

¿Cuánta agua se debe adicionar?

1. Traducción

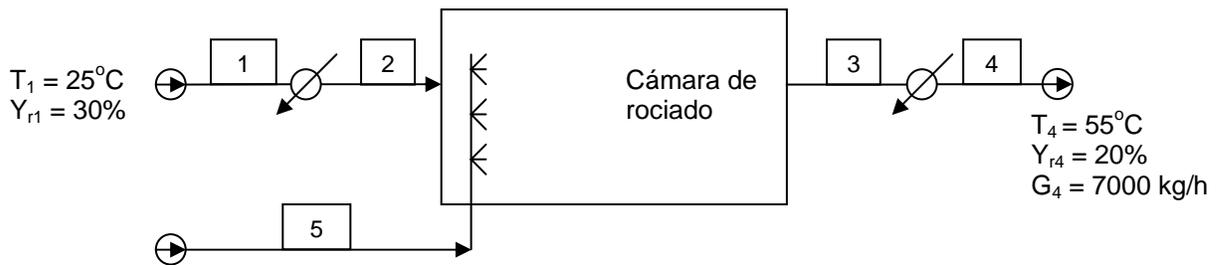


Fig. 2-17. Diagrama de proceso de acondicionamiento de aire en una cámara de rociado

2. Planteamiento

El paso del aire se puede seguir en la carta psicrométrica. En ella Y_4 , es la humedad del aire a 20 % y 55°C ; Y_2 es la humedad del aire saliente del precalentador.

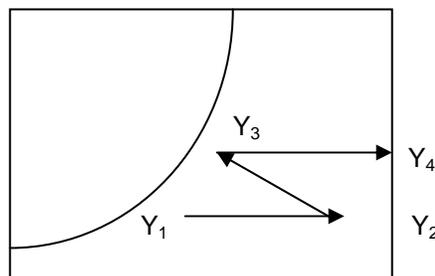


Fig. 2-18. Proceso de humidificación del aire en la carta psicrométrica

2.2 Balances de materia

$$\text{Agua } G_S Y_1 - L_5 = G_S Y_4$$

$$\text{Agua evaporada } L_5 = G_S (Y_4 - Y_1)$$

2.3 Balance de calor

$$Q = G_S (H_2 - H_1) + G_S (H_4 - H_3)$$

$$Q = G_S C_{H1} (T_2 - T_1) + G_S C_{H4} (T_4 - T_3)$$

El proceso de 2 a 3 es adiabático.

3. Cálculos

3.1 Humedad inicial y humedad final

La humedad Y_1 y Y_4 se obtienen de la carta psicrométrica

$$Y_1 = 0.003 \quad ; \quad Y_4 = 0.02 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de A. S.}}$$

3.2 Temperatura y humedad en el humidificador adiabático

La temperatura de salida del humidificador T_3 se obtiene con la humedad de 0.02, pero 4°C antes del final de la línea de enfriamiento adiabático.

En la carta de humedad, la temperatura adiabática es de 26°C

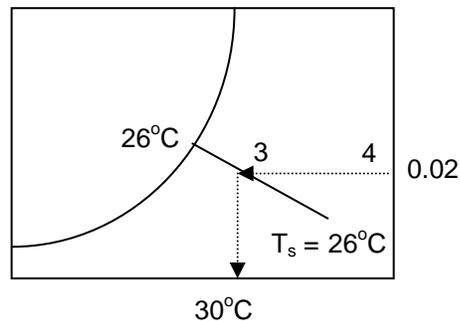


Fig. 2-19. Localización de la temperatura de aire a la salida al humidificador en la carta psicrométrica

3.3 Temperatura de entrada al humidificador.

El aire original tiene una humedad de 0.003. Para llegar a la línea adiabática de 26°C se debe precalentar hasta 71°C

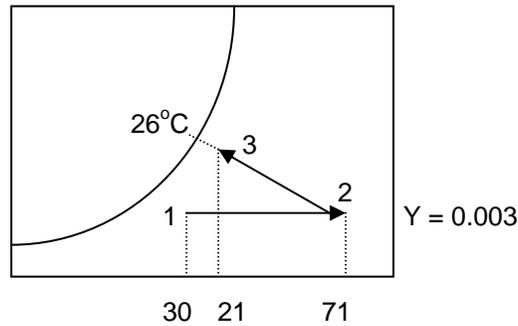


Fig. 2-20. Localización de la temperatura del aire de entrada al humidificador en la carta psicrométrica

3.4 Calores húmedos

$$C_{H1} = 0.242 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de A. S. } ^\circ\text{C}}, \quad C_{H4} = 0.25 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de A. S. } ^\circ\text{C}}$$

3.5 Calor necesario

$$Q = 7000 (0.242) (71 - 21) + 7000 (0.25) (55 - 30)$$

$$Q = 128\,450 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

3.6 Agua necesaria

$$L_5 = 7000 \frac{\text{kg de aire seco}}{\text{h}} (0.02 - 0.003) \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$L_5 = 119 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$$

4. Resultados

El aire se debe precalentar hasta 71°C.

El aire sale de la cámara a 30°C

Se requieren $128450 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$

Se debe adicionar $119 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$

CAPITULO III

HUIDIFICACION Y DESHUMIDIFICACION

3.1 Procesos de humidificación y deshumidificación

La humidificación y deshumidificación del aire o de otro gas se puede efectuar de muy diversas maneras, las cuales se podrían observar en una carta psicrométrica.

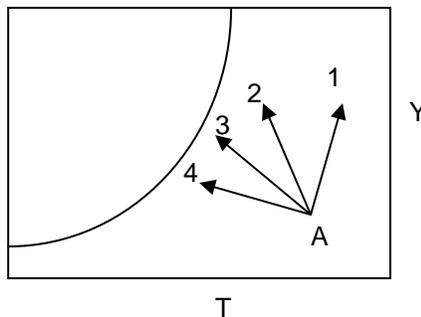


Fig. 3-1. Procesos de humidificación en la carta psicrométrica

En la gráfica anterior se presentan algunos de los procesos posibles para humidificar un aire.

El proceso A – 1 es uno que puede darse al agregar vapor a un aire.

El proceso A – 2 se da cuando se pone en contacto el aire con agua más caliente que él

El proceso A – 3 es el proceso en el cual el aire se pone en contacto con agua que está a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

El proceso A –4 es típico de una humidificación con agua a menor temperatura que la de bulbo húmedo.

La práctica industrial de la humidificación del aire se lleva a cabo casi exclusivamente en las columnas de humidificación adiabática, que es el proceso A – 3, sin embargo consideraremos a continuación otros métodos de humidificación que siendo de importancia práctica menor, podrían utilizarse para humidificar.

3.1.1 Adición de vapor de agua

Si acondicionamos la masa G_v de vapor saturado con entalpía H_v a una masa de aire que tiene una humedad Y_1 , una entalpía H_1 y una temperatura de bulbo seco T_1 tendremos:

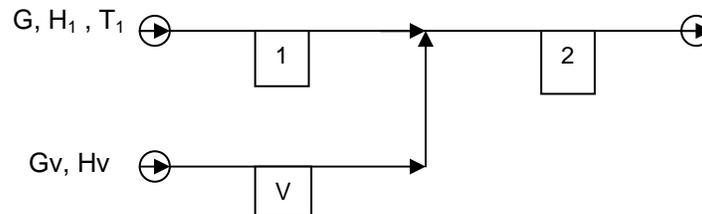


Fig. 3-2. Diagrama de humidificación de aire mediante adición de vapor

$$\text{Balance de aire seco} \quad G_{s1} = G_{s2}$$

$$\text{Balance de agua} \quad G_v + G_s Y_1 = G_s Y_2$$

$$\text{Balance de energía} \quad G_v H_v + G_s H_1 = G_s H_2$$

Ejemplo 14

Una corriente de $1000 \frac{m^3}{h}$ de aire que está a $25^\circ C$ y que tiene una humedad de $0.009 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$ se va a humidificar hasta que tenga una humedad final de $0.02 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$ mediante la adición de vapor de agua saturado a 1 atm. Suponiendo que se homogeneiza perfectamente la mezcla, sin haber condensación de vapor y sin pérdidas de calor exterior. ¿Cuál será la cantidad de vapor adicionado y cuál la temperatura final del sistema?

1. Traducción.

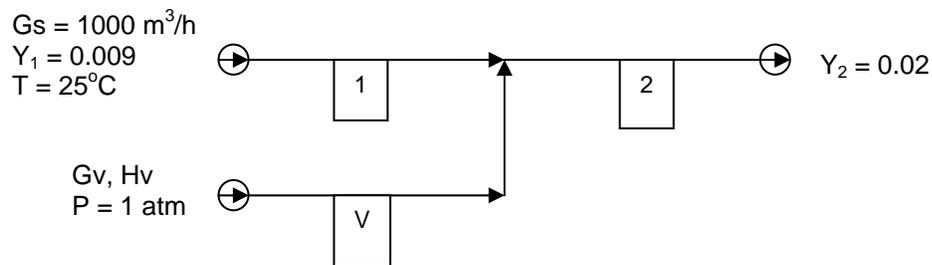


Fig. 3-3. Diagrama de humidificación de aire mediante adición de vapor

2. Planteamiento.

2.1 Balances

$$\begin{aligned} \text{Balance de aire seco:} & \quad G_{S1} = G_{S2} \\ \text{Balance de agua:} & \quad G_v + G_s Y_1 = G_s Y_2 \\ \text{Balance de energía:} & \quad G_v H_v + G_s H_1 = G_s H_2 \end{aligned}$$

3. Cálculos

3.1 Aire seco en el sistema

Volumen húmedo del aire entrante

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.009}{18} \right) 0.082 \times 298 = 0.855 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$$

$$G_s = 1000 \frac{m^3}{h} \times \frac{kg \text{ de aire seco}}{0.855 m^3} = 1169.5 \frac{kg \text{ de aire seco}}{h}$$

3.2 Balance de agua

Masa de vapor de agua que se debe adicionar.

$$G_v + 1169.5 (0.009) = 1169.5 (0.02) \quad G_v = 12.86 \frac{\text{kg de vapor}}{\text{h}}$$

3.3 Balance de energía

Entalpía del agua (de tablas de vapor a 1 atm.)

$$H_v = 638.5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Entalpía del aire entrante

$$H_1 = (0.024 + 0.46 \times 0.009)(25) + 597 (0.009) \quad H_1 = 11.47 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco}}$$

Entalpía de la mezcla

$$12.86 (638.5) + 1169.5 (11.47) = 1169.5 (H_2)$$

$$H_2 = 18.49 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco}}$$

Temperatura final del sistema

$$18.49 = (0.24 + 0.46 \times 0.02) T + 597 (0.02) \quad T = 26.28^\circ\text{C}$$

4. Resultados.

Se debe adicionar $12.86 \frac{\text{kg de vapor}}{\text{h}}$

La mezcla saldrá a 26.28°C

3.1.2 Adición de un líquido en condiciones cualesquiera, evaporándose parte del líquido.

Cuando a una masa de aire que está a las condiciones H_1, Y_1, T_1 se le adiciona una masa de agua que está a T_2 , las condiciones del aire de salida será:

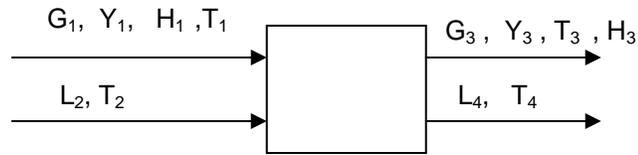


Fig. 3-4. Diagrama de humidificación de aire con adición de un líquido

Balance de aire seco: $G_{s1} = G_{s3}$

Balance de agua: $G_s Y_1 + L_2 = G_s Y_3 + L_4$

Balance de energía: $G_s H_1 + L_2 H_2 = G_s H_3 + L_4 H_4$

Ejemplo 15

5000 m³ de aire/h a 1 atm. de presión, 10°C de bulbo seco y 5°C de bulbo húmedo se humidifican poniéndolos en contacto con 4000 litros de agua/h que se encuentran inicialmente a 18°C. El aire sale a 15°C y saturado.

Calcular:

- La cantidad de agua evaporada
- La temperatura del agua saliente

1. Traducción

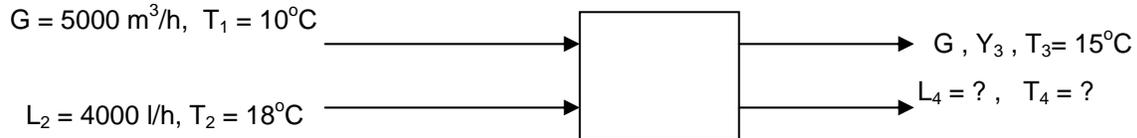


Fig. 3-5. Diagrama de humidificación de aire con adición de un líquido

2. Planteamiento

Balace de aire seco: $G_{S1} = G_{S3}$

Balace de agua: $G_{SY1} + L_2 = G_{SY3} + L_4$

Balace de energía: $G_{SH1} + L_2H_2 = G_{SH3} + L_4H_4$

3. Cálculos

3.1 Humedad del aire entrante

De la carta psicrométrica $Y_1 = 0.0033$

3.2 Volumen húmedo del aire entrante

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.0033}{18} \right) 0.082 \times 283 \quad V_H = 0.804 \frac{\text{m}^3}{\text{kg de aire seco}}$$

3.3 Masa de aire seco entrante y masa de agua entrante

$$G_s = \frac{5000 \text{ m}^3}{\text{h}} \left(\frac{\text{kg de aire seco}}{0.804 \text{ m}^3} \right) = 6219 \frac{\text{kg de aire seco}}{\text{h}} \quad L_2 = 4000 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$$

3.4 Entalpía del aire entrante

$$H_1 = (0.24 + 0.46 \times 0.0033) 10 + 597 \times 0.0033$$

$$H_1 = 4.38 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de A. S.}}$$

3.5 Entalpía del agua entrante

$$H_2 = C_p (T - T_0) = 1 (18 - 0) \quad H_2 = 18 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

3.6 Humedad y entalpía del aire saliente

De la carta psicrométrica $Y_3 = 0.011$

$$H_3 = (0.24 + 0.46 \times 0.011) 15 + 597 \times 0.011$$

$$H_3 = 10.2429 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de A.S.}}$$

3.7 Balance de agua:

masa de agua saliente

$$6219 (0.0033) + 4000 = 6219 (0.011) + L_4 \quad L_4 = 3952.11 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$$

Agua evaporada

$$\text{agua evap.} = L_3 - L_4$$

$$\text{agua evap.} = 4000 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}} - 392.11 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$$

$$\text{agua evap.} = 47.89 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$$

3.8 Balance de energía:

Entalpía del agua saliente

$$6219 (4.38) + 4000(18) = 6219(10.2429) + 3952.11 H_4$$

$$H_4 = 8.99 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Temperatura del agua saliente

$$H_4 = C_p(T - T_0) \quad 8.99 = 1(T - 0) \quad T = 8.99^\circ\text{C}$$

4. Resultados

Se evaporan 47.88 $\frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$

La temperatura del agua saliente es 8.99°C

3.1.3 Humidificación adiabática con agua que está a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

En este proceso no hay pérdidas ni ganancias de calor. En el proceso se introduce más agua de la necesaria para la humidificación del aire y el agua en exceso se recircula.

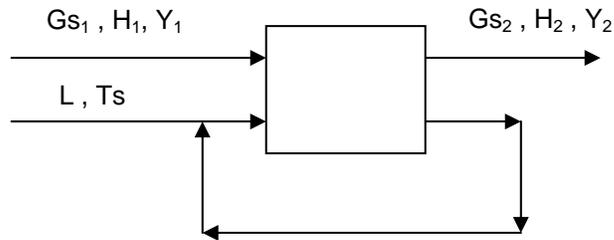


Fig. 3-6. Diagrama de humidificación adiabática del aire con agua

Balances

Balace de aires eco $G_{s1} = G_{s2}$

Balace de agua $G_{s1} Y_1 + L = G_{s2} Y_2$

Agua evaporada $L = G_s (Y_2 - Y_1)$

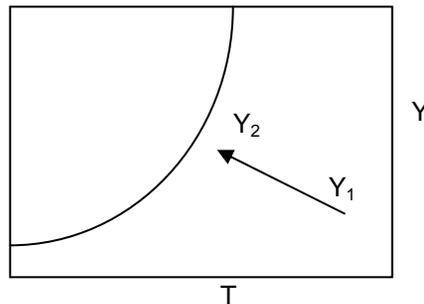


Fig. 3-7. Humidificación adiabática de aire en la carta psicrométrica

3.1.3.1 El proceso de humidificación adiabática se puede llevar a cabo en dos tipos de equipos

- a) Torres empacadas
- b) Cámaras de aspersión

Las torres empacadas se emplean para flujos pequeños de aire, mientras que las cámaras de aspersión para flujos elevados

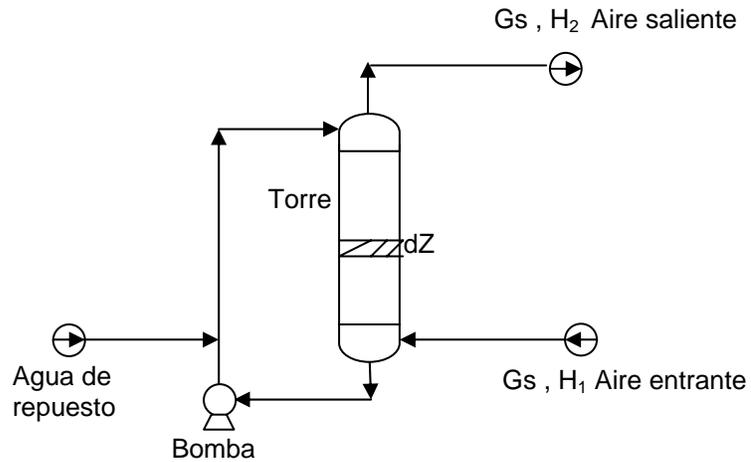


Fig. 3-8. Torre empacada

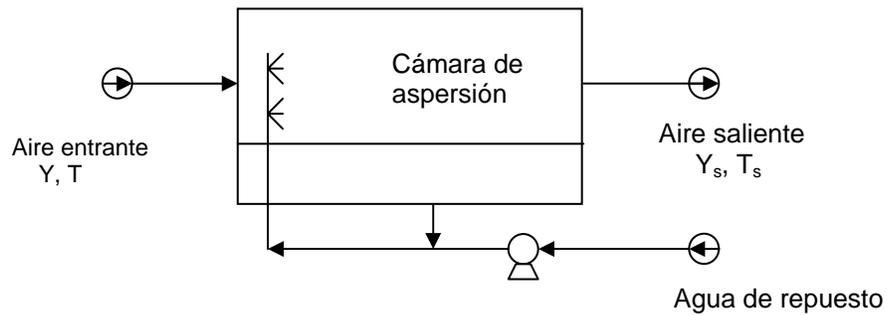


Fig. 3-9. Cámara de aspersión

3.1.3.2 Cálculo del equipo

Tomando una torre empacada se tiene:

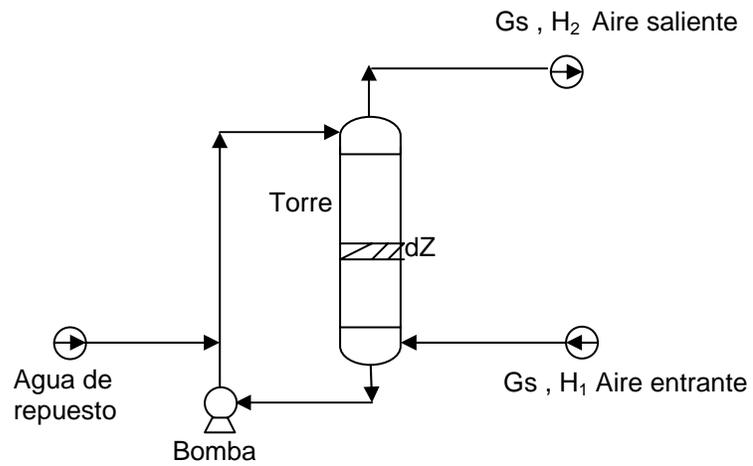


Fig. 3-10. Torre empacada

Estos equipos se pueden diseñar desde el punto de vista de transferencia de calor o de transferencia de masa.

3.1.3.2.1 Diseño desde el punto de vista de transferencia de calor

Calor ganado por convección en un dZ de la torre

$$\frac{G}{A} C_H dT_G = h_{Ga} (T_G - T_S) dZ$$

Integrando

$$\int_{T_{G1}}^{T_{G2}} \frac{dT}{(T_G - T_S)} = \int_0^Z \frac{h_{Ga} A}{G_S C_H} dZ$$

$$\ln \frac{T_{G2} - T_S}{T_{G1} - T_S} = \frac{h_{Ga} A}{G_S C_H} Z$$

G_s = gasto de aire seco kg A.S./h

A = área transversal en m²,

Z = altura empacada en m

T_s = temperatura de saturación adiabática del aire.

T_G = temperatura del aire en °C

C_H = calor húmedo del aire

h_{Ga} = coeficiente volumétrico de transferencia de calor por convección del aire en $\frac{kcal}{hm^3 \cdot C}$

La ecuación anterior también se puede poner como:

$$V_T = \frac{G_S}{h_{Ga}} C_H \ln \frac{T_{G2} - T_S}{T_{G1} - T_S} \quad \text{en donde } V_T \text{ es el volumen del equipo}$$

3.1.3.2.2 Diseño desde el punto de vista de la transferencia de masa

La masa transferida en un dZ es:

$$\frac{G_S}{A} dY = K_y a (Y_i - Y) dZ$$

Integrando:

$$\int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{Y_i - Y} = \frac{K_y a A}{G_S} \int_0^Z dZ$$

pero como Y_i = Y_s humedad en la interfase

$$\ln \frac{Y_s - Y_2}{Y_s - Y_1} = \frac{K_y a A Z}{G_S} = \frac{K_y a V_T}{G_S}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden aplicar tanto a torres empacadas como a cámaras de aspersión.

Ejemplo 16

Una cámara de humidificación tiene tres metros de largo y 0.6 m^2 de sección transversal. Se emplea para humidificar 1000 kg/h de aire que está inicialmente a 25°C , una atmósfera y con una humedad relativa de 30% y que ha de llevarse hasta 60°C con una humedad relativa de 20% mediante un precalentamiento, una humidificación y un recalentamiento. Del humidificador el aire sale 1.5°C por encima de la temperatura de saturación. Calcular:

Calcular:

- La cantidad de calor necesario para la operación
- El número de unidades de transferencia
- La altura de la unidad de transferencia
- El coeficiente de transferencia de calor de la cámara de humidificación.

1. Traducción

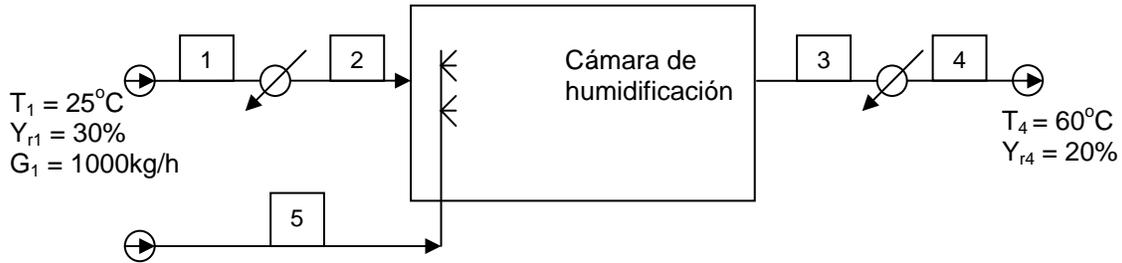


Fig. 3-11. Diagrama de humidificación de aire en una cámara de humidificación

2. Planteamiento

El paso del aire se puede seguir en la carta psicrométrica. En ella Y_4 , es la humedad del aire a 20% y 60°C , Y_2 es la humedad del aire saliente del precalentador.

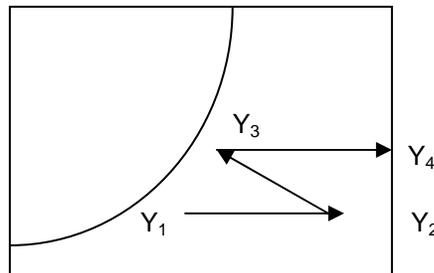


Fig. 3-12. Proceso de humidificación del aire en la carta psicrométrica

3. Cálculos

3.1 Humedades de los aires

Humedad del aire de entrada al proceso

$$Y_1 = 0.0057 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

Humedad del aire de salida del proceso

$$Y_4 = 0.0254 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

3.2 Temperatura de salida del aire del humidificador T_3

La temperatura del aire que corresponde a 1.5°C por encima de la temperatura de saturación para la humedad Y_4 es

$$T_3 = 30.5^\circ\text{C}$$

Por lo tanto la temperatura de bulbo húmedo del aire será de 29°C y esa es la temperatura a la que recirculará el agua por la torre

3.3 Temperatura de entrada del aire al humidificador

Temperatura de salida del precalentador. T_2

La intersección de la línea de bulbo húmedo 29°C con la recta de humedad $Y = 0.057$ nos da la temperatura de entrada del aire al humidificador T_2 que es de:

$$T_2 = 76^\circ\text{C}$$

3.3 Calor necesario para la operación.

El calor requerido para el proceso está dado por el calor de precalentamiento y el calor de recalentamiento.

Calor de precalentamiento

$$C_H = 0.24 + (0.0057 \times 0.46) = 0.243 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Q = 1000 (0.243) (76 - 25) = 12393 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Calor de recalentamiento

$$C_H = 0.24 + (0.0254 \times 0.46) = 0.251 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Q = 1000 (0.251) (60 - 30.5) = 12424 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{total}} = 24817 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

3.4 Unidades de transferencia

$$NUT = \ln \frac{T_{G2} - T_s}{T_{G1} - T_s} \quad NUT = \ln \frac{76 - 29}{30.5 - 29} = 3.45$$

3.5 Altura de la unidad de transferencia

$$HUT = \frac{Z}{NUT} \quad HUT = \frac{3}{3.45} = 0.87 \text{ m}$$

3.6 Coeficiente de transferencia de calor

$$h_{Ga} = \frac{G_s C_H}{A HUT}$$

$$C_H \text{ medio} = \frac{0.243 + 0.251}{2} = 0.247 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$h_{Ga} = \frac{1000 \times 0.247}{0.6 \times 0.87} = 473 \frac{\text{kcal}}{\text{hm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

4. Resultados

El calor necesario es de $24817 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$

Las unidades de transferencia son 3.45

La altura de la unidad es de 0.87 m

El coeficiente es de $473 \frac{\text{kcal}}{\text{hm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}$

3.1.4 Torres empacadas

Las torres empacadas empleadas como humidificadores mediante el uso de empaques o rellenos buscan principalmente el establecimiento de una gran interfase, a fin de poner en contacto íntimo las fases gaseosa y líquida. La cantidad de transferencia de materia depende directamente de la superficie interfacial y de la naturaleza de los componentes.

Las torres empacadas se usan en contacto continuo a contracorriente. Son columnas verticales y están rellenas con empaques. El líquido se distribuye en el empaque y desciende a través de él exponiendo una gran superficie de contacto con el gas.

Recibe el nombre de empaque, las piezas que se colocan dentro del equipo y que se utilizan para aumentar el área interfacial.

En general un buen empaque debe cubrir las especificaciones siguientes:

*Proporcionar una gran superficie interfacial entre el líquido y el gas. La superficie de empaque por unidad de volumen de espacio empacado debe ser grande, pero no en un sentido microscópico.

*Debe poseer buenas características de flujo. Esto es, que el empaque debe permitir el paso de grandes volúmenes de flujo a través de pequeñas secciones de la torre, sin provocar grandes caídas de presión en la fase gaseosa.

*Debe ser químicamente inerte a los fluidos de proceso.

* Su estructura debe permitir el fácil manejo e instalación.

*Debe tener un costo relativamente bajo.

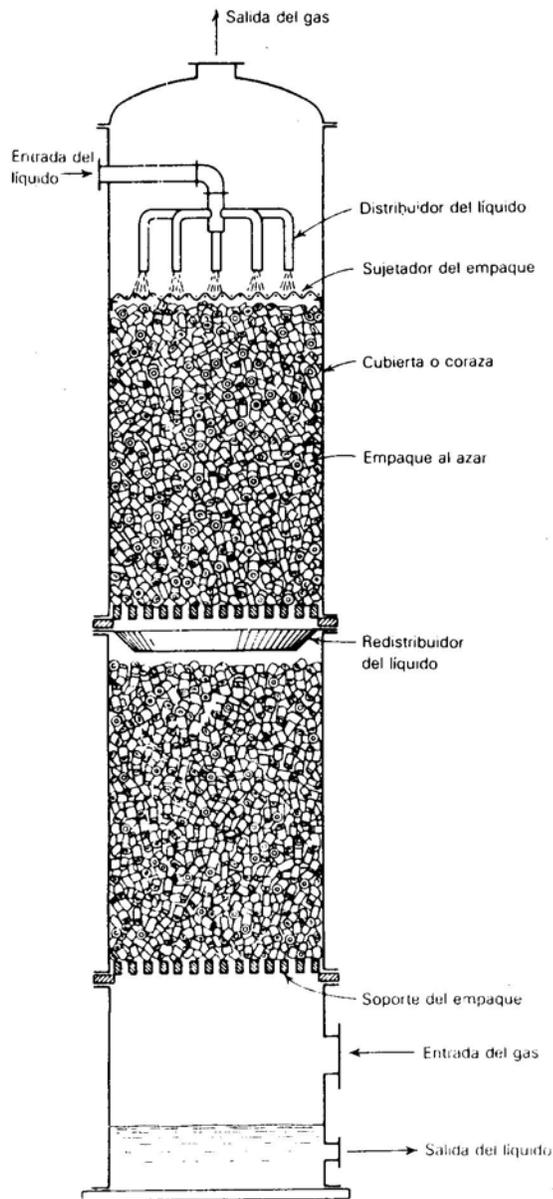


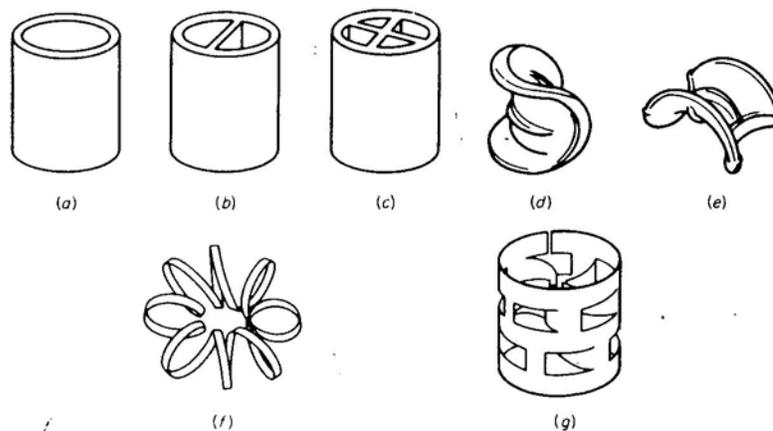
Fig. 3-13. Torre empacada

Fuente: Treybal R.E., Operaciones de transferencia de masa; Mc Graw-Hill book Co.; México 1978.

El empaque se puede acomodar de dos formas: al azar y en forma regular:

El empaque al azar se coloca en el interior de la torre sin ningún arreglo en particular, por el contrario, el empaque regular se coloca siguiendo un patrón determinado.

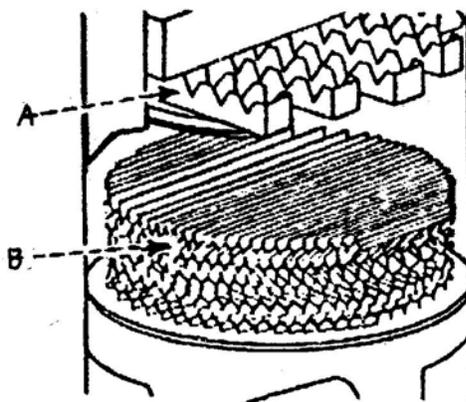
En un principio como empaque se usaban materiales tales como: trozos de vidrio, grava, pedazos de coque. Posteriormente se emplearon los empaques geométricos manufacturados, tales como los anillos Rasching, Pall y Lessing o las sillas Berl, Intalox y los telleretes.



*Fig. 3-14. Formas de los diferentes tipos de empaques
a) anillo Rasching, b) anillo Lessing, c) anillo de partición,
d) silla Berl, e) silla Intalox, f) tellerettes, g) anillo Pall*

Fuente: Ludwing E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A.,1997.

Hoy en día, se emplean frecuentemente los empaques estructurados, de alta eficiencia ya sea tejidos o no tales como los de mallas segmentadas o en forma de espiral, que reciben el nombre de acuerdo a los fabricantes. Estos empaques son de gran tamaño y ocupan totalmente el área interna de la torre.



*Fig. 3-15. Empaques estructurados usados en las torres empacadas
(A distribuidor de líquido, B rejilla)*

Fuente: Ludwing E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A.,1997.

Los empaques geométricos pequeños se fabrican de arcilla, cuarzo o porcelana . Los más usados industrialmente son los Rasching. Durante la instalación el empaque se arrojan dentro de la torre, que está llena de agua y se acomodan al azar. Los empaques distribuidos en forma regular ofrecen menor caída de presión pero menor área de contacto. Los empaques empleados tales como los anillos Rasching de 3 pulgadas deben irse apilando cuidadosamente.

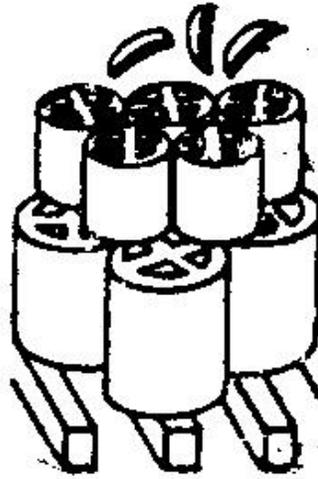


Fig. 3-16. Los empaques al azar y en arreglo regular

Fuente:Ludwing E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A.,1997.

El tamaño del empaque suelto está relacionado con el diámetro de la torre. En general el diámetro del empaque está entre $1/8$ a $1/20$ del diámetro de la torre.

En el equipo más usual, el líquido entra por la parte superior de la torre . El líquido se vierte sobre un distribuidor y de allí llega a la parte superior del empaque al que debe humedecer uniformemente.

El gas entra por debajo de la torre y también a través de un distribuidor llega al empaque y fluye hacia arriba entre los intersticios y a contracorriente con el líquido. El empaque provoca una gran área de contacto y fomenta el contacto íntimo entre las fases haciendo que el soluto que viene con el gas se disuelva en el líquido. Por el fondo de la torre se obtiene un líquido rico en soluto y por el domo un gas empobrecido.

3.1.4.1 Altura del empaque

La altura que debe tener el empaque para lograr la transferencia de masa deseada se calcula por medio de ecuaciones semejantes a:

$$Z = \frac{\tilde{G}}{AKy_a} \int_{y_1^B}^{y_2^B} \frac{d\tilde{y}_B}{\tilde{y}_B - \tilde{y}_B^*}$$

ó $Z = \text{HOG NOG}$

En donde HOG es la altura total de la unidad de transferencia del lado del gas y es igual a:

$$\text{HOG} = \frac{\tilde{G}}{AKy_a}$$

y NOG es el número de unidades de transferencia de mas basada en el lado gas y en la diferencia de potencial total, o sea:

$$\text{NOG} = \int_{y_1^B}^{y_2^B} \frac{d\tilde{y}_B}{\tilde{y}_B - \tilde{y}_B^*}$$

3.1.4.2 Diámetro de la torre.

Las velocidades másicas del gas y del líquido influyen en la altura del empaque o relleno. De tal manera que al aumentar estas velocidades disminuye la altura necesaria del empaque requerido para lograr una separación dada y por ello, se debe operar a velocidades tan altas como sea posible, a no ser que, la pérdida de presión a través del relleno sea un factor económico significativo.

3.1.4.3 Caídas de presión

En las torres empacadas se producen caídas de presión en el gas que son debidas al empaque mismo, al roce contra las paredes del recipiente y al flujo del líquido que pasa por la torre. En general, si graficamos ΔP contra el caudal del gas tendremos para un gasto dado de líquido el siguiente comportamiento.

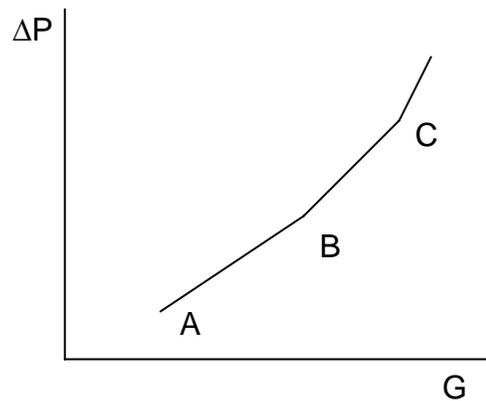


Fig. 3-17. Gráfica del comportamiento del líquido en torres empacadas

Del punto A al B las caídas de presión se pueden calcular por medio de gráficas o por ecuaciones tales como:

$$\Delta P = \alpha \left(10^{\beta \frac{L}{A}} \right) \left(\frac{\left(\frac{G}{A} \right)^2}{\rho_G} \right)$$

En donde α , β son propiedades del empaque y L/A y G/A son masa velocidades.
Ver **APENDICE 4**

El punto B se conoce como el punto de carga. En él, una parte de la energía del gas se usa para frenar el flujo de líquido en la torre, por lo que se reduce la sección efectiva de flujo de gas. En el punto C se produce el fenómeno llamado inundación, en el cual la torre se vuelve inestable, ya que el líquido es retenido por el gas y no desciende, inundándose la torre y deteniéndose la transferencia de masa.

En este punto la inundación presenta el límite de la velocidad posible del gas para un flujo dado de líquido. En otras palabras, se presenta la inundación cuando la pérdida de presión del gas es tan lenta, que el peso del líquido no es suficiente para que este circule a contracorriente con el gas.

La velocidad de inundación puede calcularse mediante la gráfica de Lobo.
Ver **APENDICE 5**

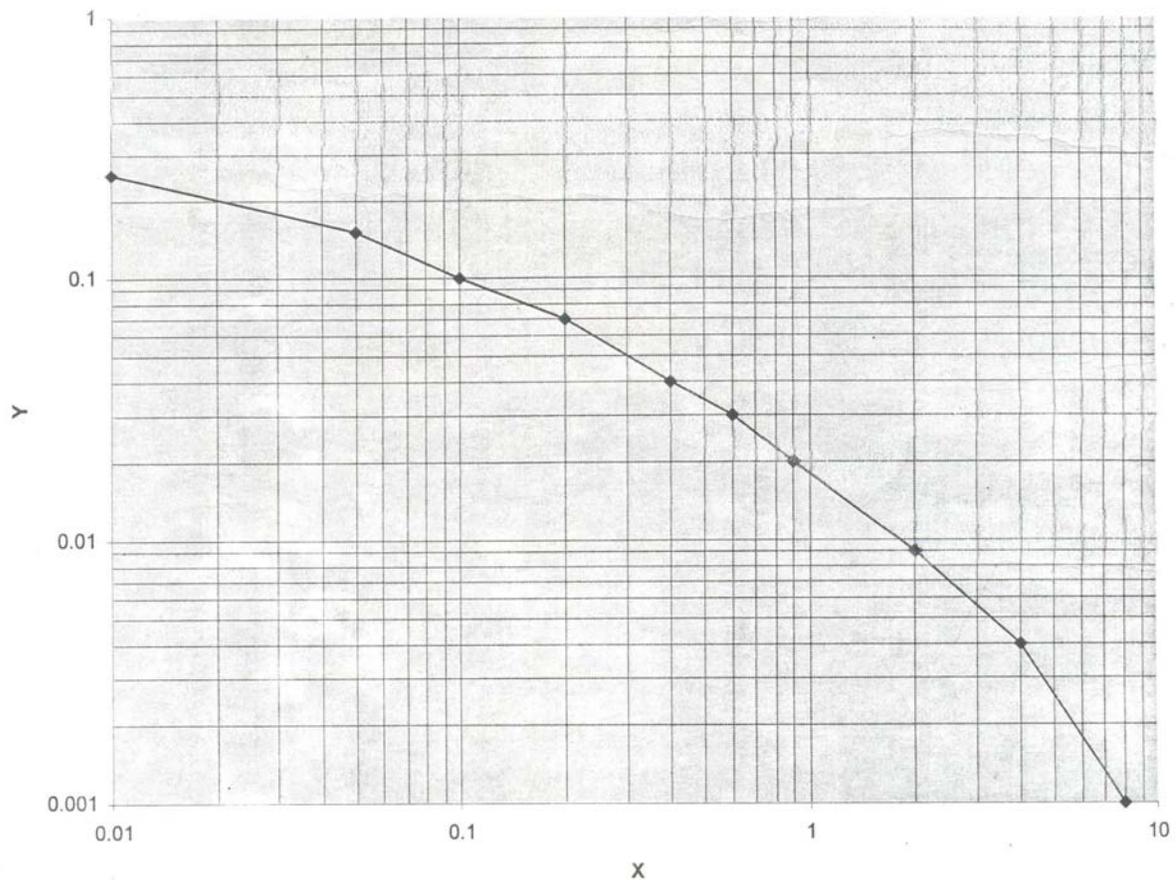


Fig. 3-18. Gráfica de Lobo para el cálculo de la inundación en torres empacadas con empaques al azar

La velocidad de inundación puede calcularse también por medio de la ecuación siguiente:

$$\ln \frac{\left(\frac{G}{A}\right)^2 \left(\frac{a p}{\varepsilon^3}\right) \mu^{0.2}}{g \rho_G \rho_L} = -4 \left(\frac{L}{G}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{\frac{1}{8}}$$

En donde a y ε son propiedades de los empaques ver **APENDICE 6**, G es la masa del gas y L la del líquido, ρ la densidad del gas y del líquido y μ la viscosidad del líquido, g es la aceleración de la gravedad en las unidades correspondientes.

3.1.5 Torres empacadas empleadas como humidificadores

Para la humidificación pueden emplearse torres empacadas semejantes a las que se emplean en la absorción o en la destilación.

La altura de las torres se obtiene mediante la ecuación general
 $Z = HUT \times NUT$

En donde Z es la altura del empaque, NUT el número de unidades de transferencia y HUT es la altura de la unidad de transferencia.

Los empaques utilizados pueden ser los tradicionales tales como anillos Rasching, sillas Berl llamados empaques al azar, o los empaques estructurales. El diámetro de estas torres se calcula mediante la inundación, pudiéndose emplear la gráfica de Lobo para determinar la inundación. Ver **APENDICE 4**

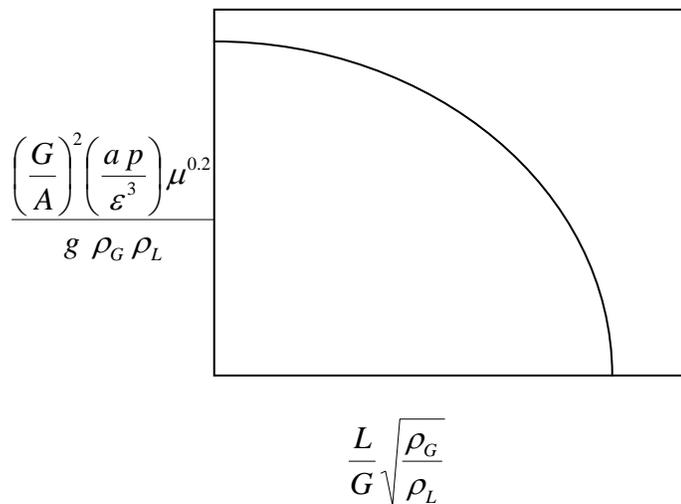


Fig. 3-19. Gráfica de lobo para determinar la inundación

La velocidad de inundación puede calcularse también por medio de la ecuación siguiente:

$$\ln \left(\frac{G}{A} \right)^2 \frac{\left(\frac{a p}{\epsilon^3} \right) \mu^{0.2}}{g \rho_G \rho_L} = -4 \left(\frac{L}{G} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{8}}$$

En donde a y ϵ son propiedades de los empaques ver **APENDICE 6**. G es la masa del gas y L la del líquido, ρ la densidad del gas y del líquido y μ la viscosidad del líquido, g es la aceleración de la gravedad en las unidades correspondientes.

3.1.5.1 Correlaciones

Los coeficientes o alturas de las unidades de transferencia dependen de los datos experimentales que existan. Algunos de esos datos expresados como correlaciones son:

A. Correlación de McAdams para anillos Rasching de una pulgada

$$h_{Ga} = 1.78 \left(\frac{G}{A} \right)^{0.7} \left(\frac{L}{A} \right)^{0.07} e^{0.0023 T_s}$$

En donde $\left(\frac{G}{A} \right)$ va de 350 a 1020 $\frac{lb}{h \text{ ft}^2}$

y $\left(\frac{L}{A} \right)$ va de 540 a 7600 $\frac{lb}{h \text{ ft}^2}$

y T_s es la temperatura en la interfase que va de 115 a 205 °F

B. Correlación de Yoshida

Para anillos de 3,5 y 7 pulgadas

$$h_{Ga} = 0.117 \left(\frac{G}{A} \right) \left(\frac{L}{A} \right)^{0.2}$$

$$k_{ya} = 0.45 \left(\frac{G}{A} \right) \left(\frac{L}{A} \right)^{0.2}$$

En donde $\left(\frac{G}{A} \right)$ va de 137 a 586 $\frac{lb}{h \text{ ft}^2}$ y $\left(\frac{L}{A} \right)$ va de 200 a 4160 $\frac{lb}{h \text{ ft}^2}$

Ejemplo 17

Se quiere producir 600 m³/h de un aire a 55°C con una humedad relativa del 30%. El aire atmosférico está a 19°C, 15°C de bulbo húmedo y 1 atmósfera. Para producir el aire se utilizará un proceso con precalentación, humidificación y recalentamiento. Por razones de diseño el aire saliente del humidificador saldrá a 2°C por arriba de la temperatura de saturación adiabática.

Diseñe el humidificador requerido si la torre tiene anillos Rasching.

1. Traducción

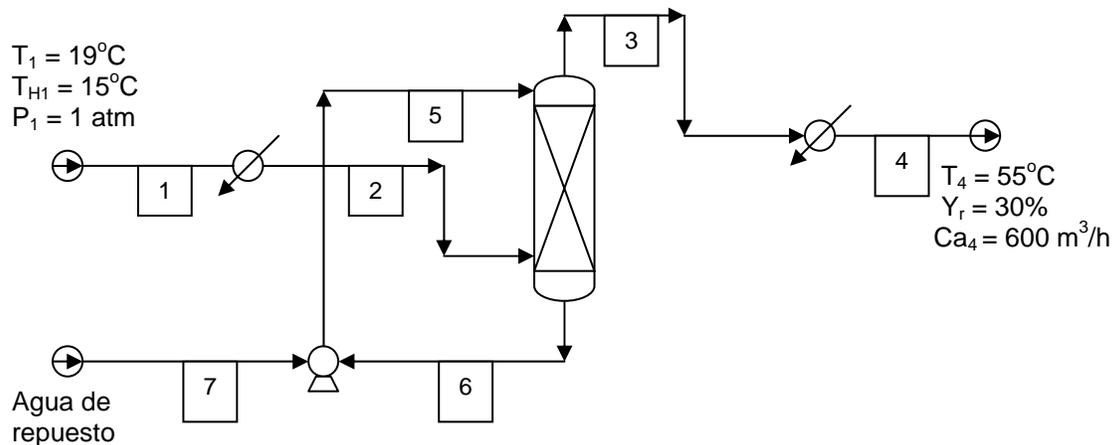


Fig. 3-20. Diagrama de flujo para humidificar aire

2. Planteamiento.

2.1 balances

$$G_{S1} = G_{S4} = G_{S2}$$

$$G_{S1}Y_1 + L_7 = G_{S4}Y_4$$

$$G_{S1}H_1 + Q = G_{S2}H_2 \quad \text{precalentador}$$

$$G_{S3}H_3 + Q = G_{S4}H_4 \quad \text{recalentador}$$

2.2 Diseño del humidificador empacado

$$Z = \frac{G_s C_H}{A h_{Ga}} \ln \frac{T_2 - T_s}{T_3 - T_s}$$

2.3 Diámetro del humidificador

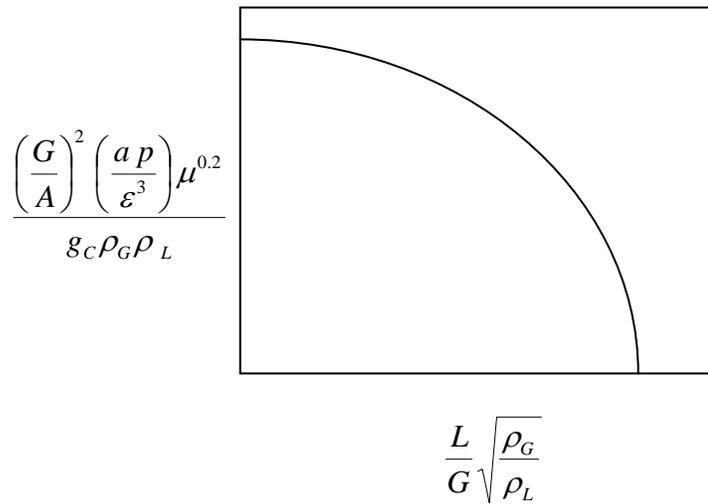


Fig. 3-21. Gráfica de lobo para calcular la inundación

2.4 Correlación de Mc Adams para anillos Rasching de una pulgada

$$h_{Ga} = 1.78 \left(\frac{G}{A}\right)^{0.7} \left(\frac{L}{A}\right)^{0.07} e^{0.0023 T_s}$$

3. Cálculos

3.1 Propiedades del aire de la carta de humedad

Aire de entrada al proceso

$$Y_1 = 0.009 ; C_{H1} = .244 ; H_1 = 10.011 ; T_1 = 19^\circ\text{C}$$

Aire de salida del proceso

$$Y_4 = 0.03 ; C_{H4} = 0.253 ; H_4 = 31.869 ; T_4 = 55^\circ\text{C} ; V_{H4} = 0.972$$

3.2 Propiedades del aire al salir del humidificador

Temperatura de salida del humidificador

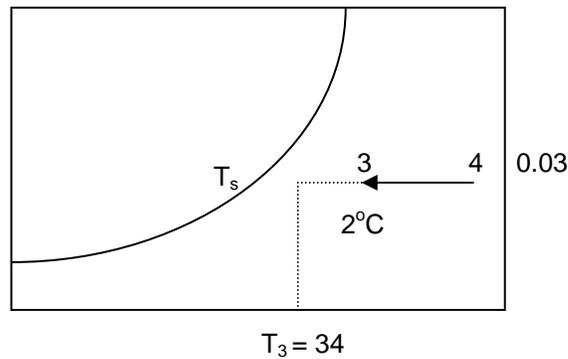


Fig. 3-22. Diagrama de la carta psicrométrica

De la carta de humedad

$$Y_3 = 0.03 ; \quad T_3 = 34^\circ\text{C} ; \quad C_{H_3} = 0.253 ; \quad H_3 = 26.539 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

3.3 Propiedades del aire al entrar al humidificador

Temperatura de entrada al humidificador

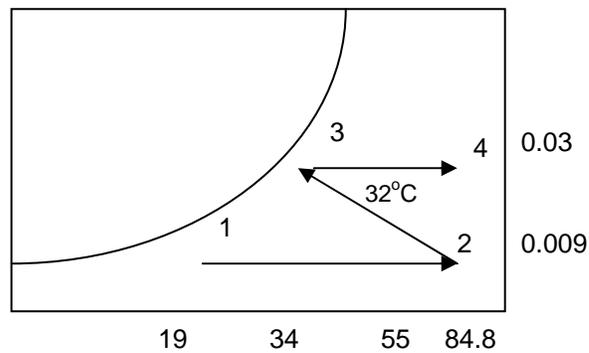


Fig. 3-23. Diagrama de la carta psicrométrica para determinar las propiedades del aire

De la carta de humedad

$$Y_2 = 0.009 , \quad T_2 = 84.869 ; \quad C_{H_2} = 0.244 ; \quad H_2 = 26.092 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

3.4 Aire seco que se requiere producir en el proceso

$$Gs_4 = 600 \frac{m^3}{h} \left(\frac{kg \text{ de aire seco}}{0.972 m^3} \right) = 617.28 \frac{kg \text{ de aire seco}}{h}$$

3.5 Agua evaporada

$$L_7 = Gs_4 Y_4 - Gs_1 Y_1$$

$$L_7 = 617.28 (0.03 - 0.009)$$

$$L_7 = 12.96 \frac{kg \text{ de agua}}{h}$$

3.6 Calor de precalentamiento

$$Q = Gs (H_2 - H_1)$$

$$Q = 617.28 (26.09 - 10.011)$$

$$Q = 9926.47 \frac{kcal}{h}$$

3.7 Calor de recalentamiento

$$Q = Gs (H_4 - H_3)$$

$$Q = 617.28 (31.869 - 26.539)$$

$$Q = 3290.10 \frac{kcal}{h}$$

3.2 Número de unidades de transferencia

$$NUT = \ln \frac{84 - 32}{34 - 32} = 3.258$$

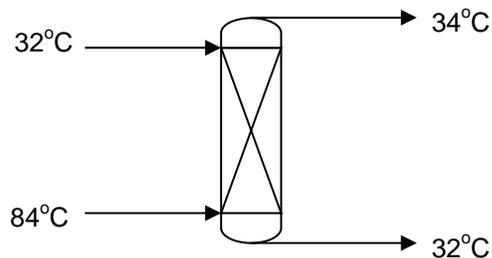


Fig. 3-24. Diagrama de torre empacada para localizar las temperaturas

3.9 Diámetro de la torre.

$$\text{Gasto de aire seco } G = 617.28 \frac{\text{kg de aire seco}}{h}$$

$$\text{Agua evaporada } L_7 = 12.96 \frac{\text{kg de agua}}{h}$$

Para diseñar el humidificador se utilizara una cantidad de agua

$$\text{Equivalente a 20 veces la evaporada } L = 260 \frac{\text{kg de agua}}{h}$$

$$\text{Volumen húmedo del aire entrante a } 84^\circ\text{C} \quad V_H = 1.024 \frac{m^3}{\text{kg de aire seco}}$$

$$\text{Densidad del aire entrante } \rho_G = 0.978 \frac{\text{kg}}{m^3}$$

$$\text{Densidad del agua a } 32^\circ\text{C} \quad \rho_L = 989 \frac{\text{kg}}{m^3}$$

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{260}{617.28} \sqrt{\frac{0.978}{989}} = 0.0132$$

$$\text{En el diagrama de Lobo se obtiene lo siguiente} \quad 0.23 = \frac{\left(\frac{G}{A}\right)^2 \left(\frac{a}{\epsilon^3}\right) \mu^{0.2}}{g_c \rho_G \rho_L}$$

Si empleamos anillos rasching de 1 pulgada tenemos:

(Datos tomados del **APENCICE 6**)

$$a = 190 \frac{m^2}{m^3}$$

$$\epsilon = 0.73$$

La viscosidad del agua a 32°C es de 0.85 cps.

$$0.23 = \frac{\left(\frac{G}{A}\right)^2 \left(\frac{190}{0.73^3}\right) (0.85)^{0.2}}{1.27 \times 10^8 \times 0.978 \times 989}$$

$$\left(\frac{G}{A}\right)^2 = 5.96 \times 10^7$$

$$\frac{G}{A} \text{ inundacion} = 7720 \frac{\text{kg}}{h m^2}$$

$$\frac{G}{A} \text{ operacion} = 7720 (0.7) = 5404 \frac{\text{kg de aire}}{\text{h m}^2}$$

$$A = \frac{G}{\frac{G}{A}} = \frac{617}{5404} = 0.114 \text{ m}^2$$

$$D = 0.38 \text{ m}$$

Para propósito de diseño haremos el diámetro de 0.4 m = 16 in.

$$A = 0.125 \text{ m}^2$$

$$\frac{G}{A} \text{ operacion real} = \frac{617}{0.125} = 4936 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2} = 1007.7 \frac{\text{lb}}{\text{h ft}^2}$$

$$\frac{L}{A} = \frac{260}{0.125} = 2080 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2} = 424.65 \frac{\text{lb}}{\text{h ft}^2}$$

3.10 Coeficiente de transferencia

Utilizando la correlación de McAdams

$$h_{Ga} = 1.78 (1007.7)^{0.7} (424.65)^{0.07} e^{0.0023(90)} = 422.8 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^3 \text{ } ^\circ\text{F}} = 6778 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ h } ^\circ\text{C}}$$

3.11 Altura de la torre

$$C_H = 0.244 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Z = \frac{4936 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2} \times 0.244 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}}{6778 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ h } ^\circ\text{C}}} \times 3.25 = 0.57 \text{ m}$$

4. Resultados

La torre tiene una altura de 60 cm

La torre tiene un diámetro de 40 cm

La torre está empacada con anillos rasching de 1 pulgada

3.1.6 Cámaras de rociado

Esencialmente son torres de rociado horizontales que pueden arreglarse de manera semejante a la siguiente figura:

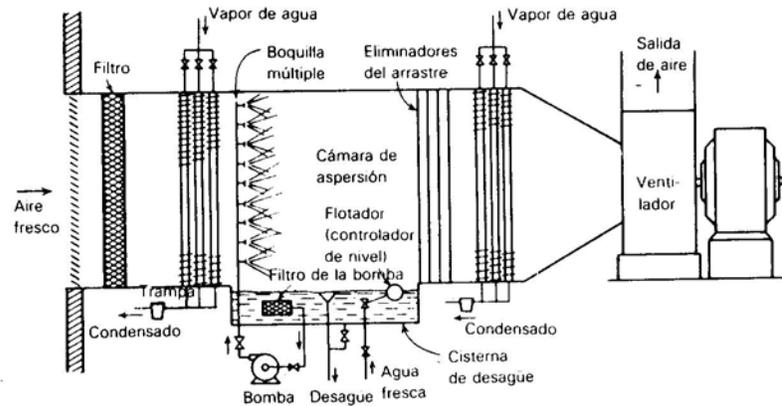


Fig. 3-25. Arreglo esquemático de una cámara de aspersión

Fuente: Treybal R.E., Operaciones de transferencia de masa; Mc Graw-Hill book Co.; México 1978.

Se usan muy frecuentemente para las operaciones de humidificación adiabática con el agua recirculante. Los gastos de gas van de 600 a 900 lb/h ft². Las cámaras están provistas con precalentadores y poscalentadores así como con eliminadores de niebla para evitar el arrastre de las partículas. Con una adecuada cantidad de líquido atomizado se requerirán de varios bancos de rociadores en serie para llevar al gas a las condiciones deseadas.

En esas cámaras la velocidad del aire es de 0.3 a 1.5 $\frac{m}{s}$.

El agua utilizada es generalmente de 20 a 50 veces la que se evapora.

Una ecuación de tipo experimental es:

$$h_{Ga} = 0.0078 (x)^{1.5} \text{ en donde}$$

$$h_{Ga} \text{ va de } 20 \text{ a } 160 \frac{BTU}{ft^3 h ^\circ F}$$

$$X = \frac{\text{lb de agua pulverizada}}{h \text{ ft}^2 \text{ de seccion}}$$

Se suelen colocar de 8 a 10 toberas por metro cuadrado en un arreglo parecido al siguiente

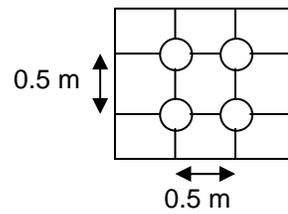


Fig. 3-26. Distribución de las toberas en un metro cuadrado para colocarse en una cámara de aspersión

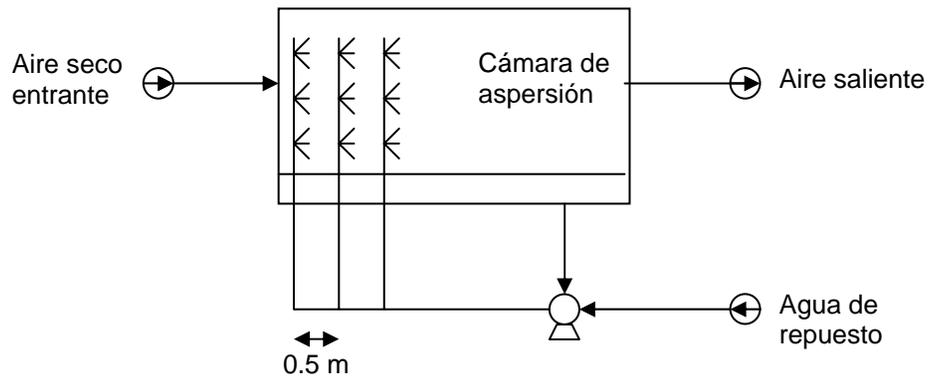


Fig. 3-27. Arreglo esquemático de distribución de las toberas de una cámara de aspersión

Ejemplo 18

Si en el ejemplo anterior se tratasen 6000 m³/h de aire. ¿Cuál sería el humidificador por aspersion indicado?

1. Traducción

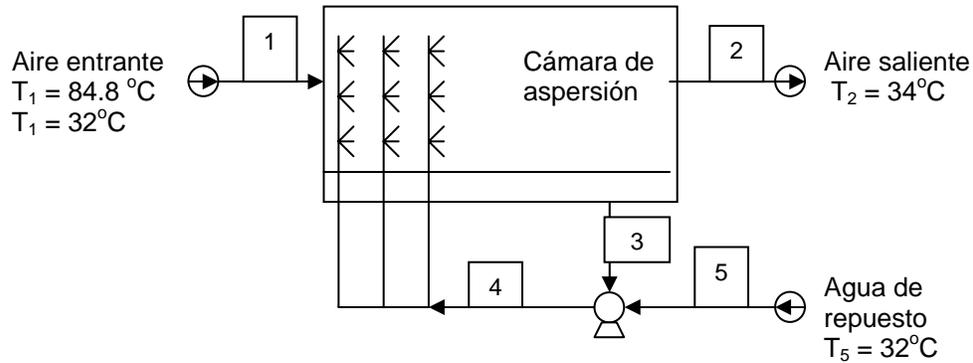


Fig. 3-28. Diagrama de flujo para humidificar aire

2. Planteamiento

2.1 Balances

Aire seco $G_{s1} = G_{s2}$

Agua $G_{s1}Y_1 + L_5 = G_{s2}Y_2$

Agua evaporada $L_5 = G_s (Y_2 - Y_1)$

2.2 Ecuación de diseño

$$Z = \frac{G_s}{A h_{Ga}} C_H \ln \frac{T_1 - T_s}{T_2 - T_s}$$

2.3 Coeficiente para rociadores

$$h_{Ga} = 0.0078 (x)^{1.5}$$

3. Cálculos

3.1 Número de unidades de transferencia

Del ejemplo anterior

$$NUT = \ln \frac{84 - 32}{34 - 32} = 3.258$$

3.2 Gastos másicos y volumétricos de los fluidos

Gasto másico del aire con $V_{H2} = 0.972 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$

$$G_s = 6000 \frac{m^3}{h} \left(\frac{kg \text{ de aire seco}}{0.972 m^3} \right) \quad G_s = 6172.83 \frac{kg \text{ de aire seco}}{h}$$

Gasto volumétrico del aire con $V_{H1} = 1.027 \frac{m^3}{kg \text{ de aire seco}}$

$$C_a = \left(6172.83 \frac{kg \text{ A.S}}{h} \right) \left(1.027 \frac{m^3}{kg \text{ A.S}} \right) \left(\frac{1h}{3600s} \right) \quad C_a = 1.76 \frac{m^3}{s}$$

Gasto másico de agua evaporada

$$L_5 = G_s (Y_2 - Y_1)$$

$$L_5 = 6173 \frac{kg \text{ de aire seco}}{h} \left(0.03 \frac{kg \text{ de Agua}}{kg \text{ A.S}} - 0.009 \frac{kg \text{ de Agua}}{kg \text{ A.S}} \right)$$

$$L_5 = 129.63 \frac{kg \text{ de agua}}{h}$$

Considerando que el agua utilizada de operación va de 20 a 50 veces el agua evaporada.

Si $L = 20$ veces el agua evaporada

$$L = (20) \left(129.63 \frac{kg \text{ de agua}}{h} \right) \quad L = 2592.6 \frac{kg \text{ de agua}}{h} = 5716 \frac{lb \text{ de agua}}{h}$$

3.3 Coeficiente y longitud

$$\text{Si suponemos un } h_{Ga} \text{ de } 100 \frac{BTU}{h \text{ ft}^3 \text{ } ^\circ F} = 1598 \frac{kcal}{h \text{ m}^3 \text{ } ^\circ C}$$

$$x = \left(\frac{100}{0.0078} \right)^{\frac{1}{1.5}} \quad x = 547.77 \frac{\text{lb de agua}}{h \text{ ft}^2}$$

$$A = \frac{5716 \frac{\text{lb de agua}}{h}}{547.77 \frac{\text{lb de agua}}{h \text{ ft}^2}} = 10.43 \text{ ft}^2 = 0.9689 \text{ m}^2$$

$$\frac{G}{A} = \frac{6172.83 \frac{\text{kg de aire seco}}{h}}{0.9689 \text{ m}^2} = 6370.96 \frac{\text{kg de aire seco}}{h \text{ m}^2}$$

Cálculo de la longitud (Z) con G_s/A , h_{Ga} , C_H , NUT

$$Z = \frac{6370.96 (0.244)}{1598} \times 3.258 = 3.169 \text{ m}$$

La velocidad del aire debe ser de 0.3 a 1.5 $\frac{m}{s}$

Cálculo de la velocidad del aire con flujo volumétrico del aire (Ca) y área de flujo (A)

$$v = \frac{Ca}{A} \quad v = \frac{1.76 \frac{\text{m}^3}{s}}{0.9689 \text{ m}^2} = 1.81 \frac{m}{s}$$

Como la velocidad es demasiado alta se hará otro tanteo

Segundo tanteo

$$\text{Si suponemos un } h_{Ga} = 50 \frac{BTU}{h \text{ ft}^3 \text{ } ^\circ F} = 800 \frac{kcal}{h \text{ m}^3 \text{ } ^\circ C}$$

$$x = \left(\frac{50}{0.0078} \right)^{\frac{1}{1.5}} \quad x = 345 \frac{\text{lb de agua}}{h \text{ ft}^2}$$

Si $L = 50$ veces el agua evaporada

$$L = (50) \left(129.63 \frac{\text{kg de agua}}{h} \right) \quad L = 6481.5 \frac{\text{kg de agua}}{h} = 14291.7 \frac{\text{lb de agua}}{h}$$

$$A = \frac{143291.7 \frac{\text{lb de agua}}{h}}{345 \frac{\text{lb de agua}}{h \text{ ft}^2}} = 41.42 \text{ ft}^2 = 3.848 \text{ m}^2$$

$$\frac{G}{A} = \frac{6172.83 \frac{\text{kg de aire seco}}{h}}{3.848 \text{ m}^2} = 1604 \frac{\text{kg de aire seco}}{h \text{ m}^2}$$

Cálculo de la longitud (Z)

$$Z = \frac{1604 (0.244)}{800} \times 3.258 = 1.59 \text{ m}$$

Calculo de la velocidad del aire

$$v = \frac{Ca}{A} \quad v = \frac{1.76 \frac{\text{m}^3}{s}}{3.848 \text{ m}^2} = 0.457 \frac{\text{m}}{s}$$

La velocidad del aire esta en el rango aceptable.

3.5 Distribución del equipo

Area de flujo de $2 \times 2 = 4 \text{ m}^2$

Nueve toberas en cada banco.

Tres bancos, 27 toberas

Gasto de agua por tobera

$$6481.5 \frac{\text{litros}}{h} \times \frac{1}{27 \text{ toberas}} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min.}} = 4 \frac{\text{litros}}{\text{minuto}} \text{ tobera}$$

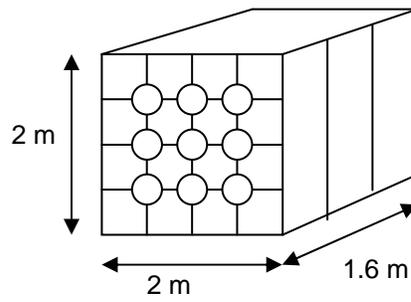


Fig. 3-29. Arreglo esquemático de distribución de las toberas de una cámara de aspersión

4. Resultados

Se requiere una cámara de 4 m^2 de sección y 1.6 m de largo.

Se utilizarán tres bancos de 9 toberas.

Cada tobera arrojará 4 litros de agua por minuto.

3.1.7 Enfriamiento de aire o calentamiento de aire por contacto directo con agua.

El aire se puede humidificar, deshumidificar, calentar o enfriar por contacto directo con agua en equipos que reciben diferentes nombres según su aplicación final. Para ello se pone en contacto el aire con agua que está a diferentes temperaturas y que no se recircula al equipo.

Tomemos por ejemplo el caso del enfriamiento de aire por contacto directo con agua que está a una temperatura menor que la de rocío.

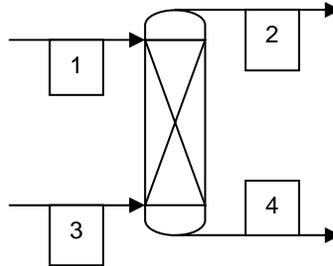


Fig. 3-30. Diagrama de una torre empacada

Balances

Aire seco $G_{s1} = G_{s2}$

Agua $G_{s1}Y_1 + L_3 = G_{s2}Y_2 + L_4$

agua evaporada o condensada $L_4 - L_3 = G_s (Y_1 - Y_2)$

en donde

G_s es el gasto de aire seco en kg/h

L es el gasto de agua en kg/h

Y es la humedad del aire en kg de vapor de agua / kg de aire seco

Energía $G_{s1}H_1 + L_3H_3 = G_{s2}H_2 + L_4H_4$

en donde H es la entalpía de las corrientes $G_s (H_1 - H_2) = L_4H_4 - L_3H_3$

Si $L_4 \cong L_3$ entonces $G_s (H_1 - H_2) = L (H_4 - H_3)$

pero como H_3 y H_4 son la entalpía del agua

$H_3 = C_{pL} (T_3 - T_o)$ y $H_4 = C_{pL} (T_4 - T_o)$

en donde T_o es la temperatura base para computar las entalpías, generalmente cero grados centígrados.

entonces: $G_s (H_1 - H_2) = LC_{pL} (T_4 - T_3)$ línea de operación

3.1.7.1 Ecuación de diseño de los equipos

Tomando un diferencial del equipo dZ

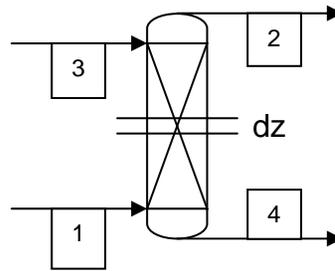
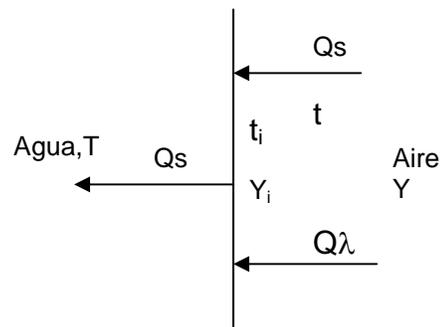


Fig. 3-31. Diagrama de una torre empacada

A. En el caso de enfriamiento y deshumidificación de aire tendremos:



Al enfriarse y deshumidificarse el aire cede calor sensible y calor latente, mientras que el agua se calienta.

Balace de un diferencial de altura dZ

$dL = G_s dY$ agua transferida

$$\frac{G_s}{A} C_H dt = h_{Ga} (t - t_i) dZ \quad \text{calor sensible transferido}$$

$$\frac{G_s}{A} (\lambda dY) = kya (Y - Y_i) \lambda dZ \quad \text{calor latente transferido}$$

$$\frac{G_s}{A} dH = \frac{G_s}{A} (C_H dt + \lambda dY) = [h_{Ga} (t - t_i) + \lambda kya (Y - Y_i)] dZ \quad \text{calor total}$$

Pero para el sistema aire agua

$$C_H = \frac{h_{Ga}}{kya}$$

Entonces:

$$\frac{G_s}{A} dH = k_y a [(C_H t + \lambda Y) - (C_H t_i + \lambda Y_i)] dZ$$

$$\frac{G_s}{A} dH = k_y a (H - H_i) dZ$$

$$Z = \frac{G_s}{A k_y a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H - H_i}$$

En donde t es la temperatura del aire, a la humedad Y y entalpía H y t_i es la temperatura del aire en la interfase a la humedad Y_i y entalpía H_i

La integración o número de unidades de transferencia se deben obtener mediante métodos gráficos.

La gráfica de equilibrio para el sistema está dado por un diagrama que muestra la relación entre la temperatura del agua y la entalpía del aire.

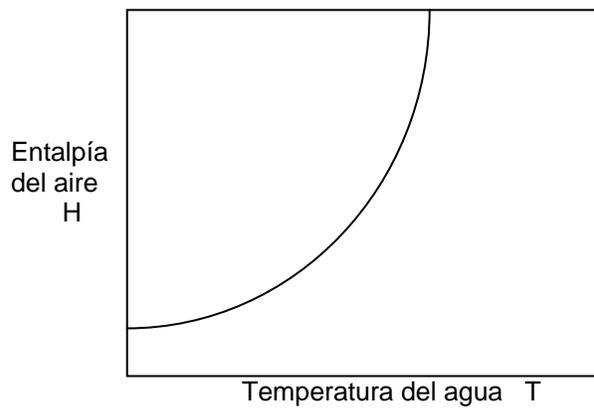


Fig. 3-32. Línea de equilibrio en diagrama entalpía temperatura

Ese diagrama se calcula a partir de los datos del sistema y a la presión dada.

Sobre ese diagrama se coloca la línea de operación del proceso.

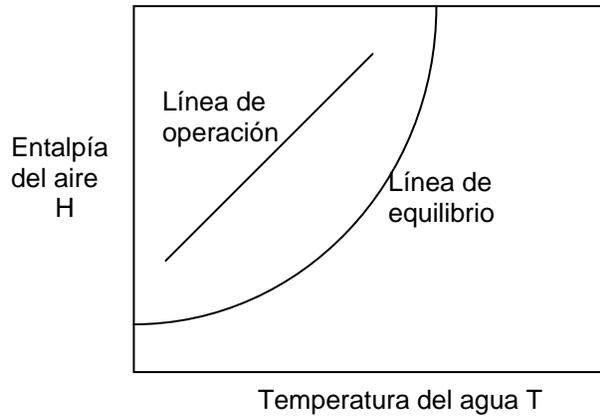


Fig. 3-33. Línea de equilibrio y de operación en el diagrama entalpía temperatura

Para encontrar la entalpía y la temperatura en la interfase se requiere graficar la línea de unión que se obtiene a partir de:

$$h_{La} (T_i - T) = k_{ya} (H - H_i) \text{ calor transferido de la interfase al líquido}$$

$$\frac{h_{La}}{k_{ya}} = \frac{H_i - H}{T_i - T}$$

En donde T es la temperatura del agua y H la entalpía del aire, k_{ya} el coeficiente de transferencia de masa en la fase gaseosa y h_{La} el coeficiente de transferencia de calor en la fase líquida.

Mediante la línea de unión es posible obtener las condiciones en la interfase.

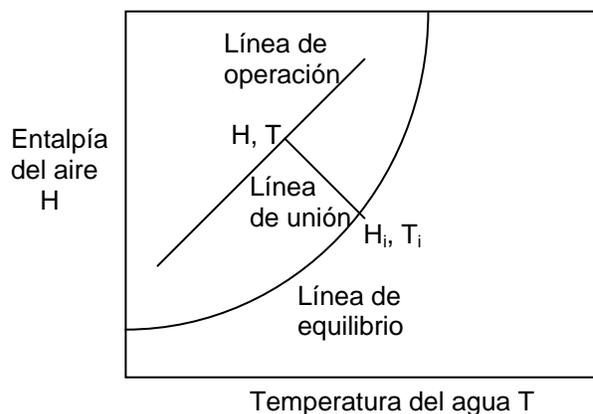
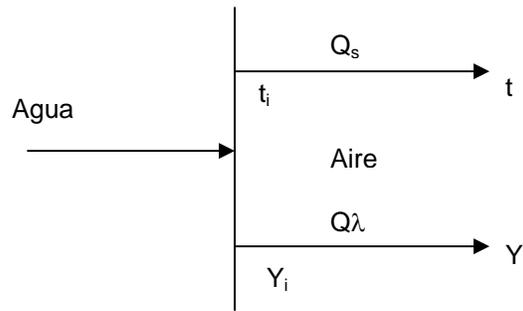


Fig. 3-34. Línea de equilibrio, de operación y de unión en el diagrama entalpía temperatura

Por lo general $h_{La} \gg h_{Ga}$ por lo que las líneas de unión tienden a ser casi verticales.

B. En el caso de la humidificación y calentamiento del aire las condiciones serían



En este caso la ecuación de diseño sería:

$$Z = \frac{G_s}{A k_y a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H}$$

y la línea de unión:

$$-\frac{h_{La}}{k_y a} = \frac{H - H_i}{T - T_i}$$

por lo que la posición de las líneas sería la siguiente:

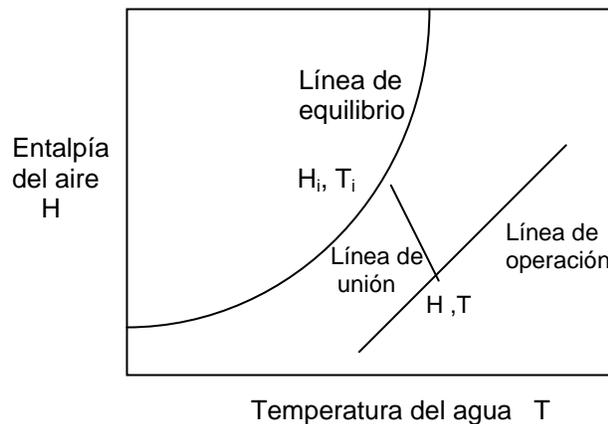


Fig. 3-35. Línea de equilibrio, de operación y de unión en el diagrama entalpía temperatura

Ejemplo 19

En una torre de humidificación se manejan $4850 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}$ de aire. La temperatura del aire a la entrada es de 45°C y su temperatura de bulbo húmedo es de 21°C . La temperatura del agua a la entrada es de 45°C y la salida es de 32°C . Experimentalmente se sabe que la pendiente de la línea de unión es 2. Encuentre la altura de dicha torre si la pendiente de la línea de operación es de 1.5 y si el coeficiente $k_y a$ es de $1500 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^3 \Delta Y}$

1. Traducción

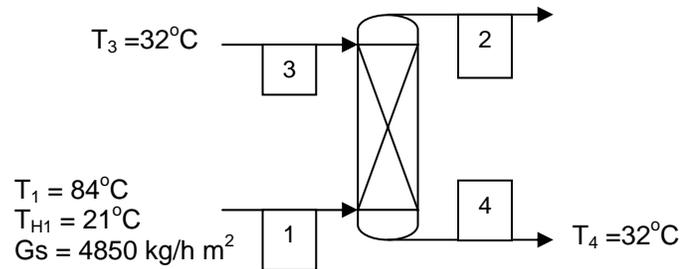


Fig. 3-67. Torre de humidificación

2. Planteamiento

2.1 Ecuación de diseño

$$Z = \frac{G_s}{A k_y a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H}$$

2.2 Ecuación de la línea de operación

$$G_s(H_2 - H_1) = L C_{pL}(T_3 - T_4) \quad \text{línea de operación}$$

2.3 Ecuación de la línea de unión

$$-\frac{h_{La}}{k_y a} = \frac{H - H_i}{T - T_i}$$

3. Cálculos

3.1 Condiciones del aire entrante

$$Y_1 = 0.006 \text{ Kg de vapor de agua/kg de A.S.}$$

$$C_{H1} = 0.2428 \text{ kcal/kg A.S.}^\circ\text{C}$$

$$H_1 = 14.5 \text{ kcal/kg A.S.}$$

3.2 Línea de equilibrio a 1 atm

T °C	H kcal/kg A.S.
10	6.9
15	9.9
20	13.6
25	18.13
30	23.6
35	30.47
40	39.4
45	50.7

Con estos datos se puede graficar la línea de equilibrio.

3.3 Línea de operación.

$$\frac{L C p_L}{G_s} = 1.5 = \frac{H_2 - 14.56}{45 - 32}$$

$$H_2 = 34 \text{ kcal/kg A.S.}$$

Con estos datos se puede graficar la línea de operación

3.4 Línea de unión.

$$-\frac{h_{La}}{k_y a} = \frac{H - H_i}{T - T_i} = -2 = \frac{14.56 - H_i}{32 - T_i}$$

Si damos otros valores obtendremos los puntos por donde puede pasar esa línea de unión.

$$\text{Si } T_i = 25 \quad H_i = 28.52 \quad \text{si } T_i = 30 \quad H_i = 18.56$$

Con estos puntos se puede graficar la línea de unión.

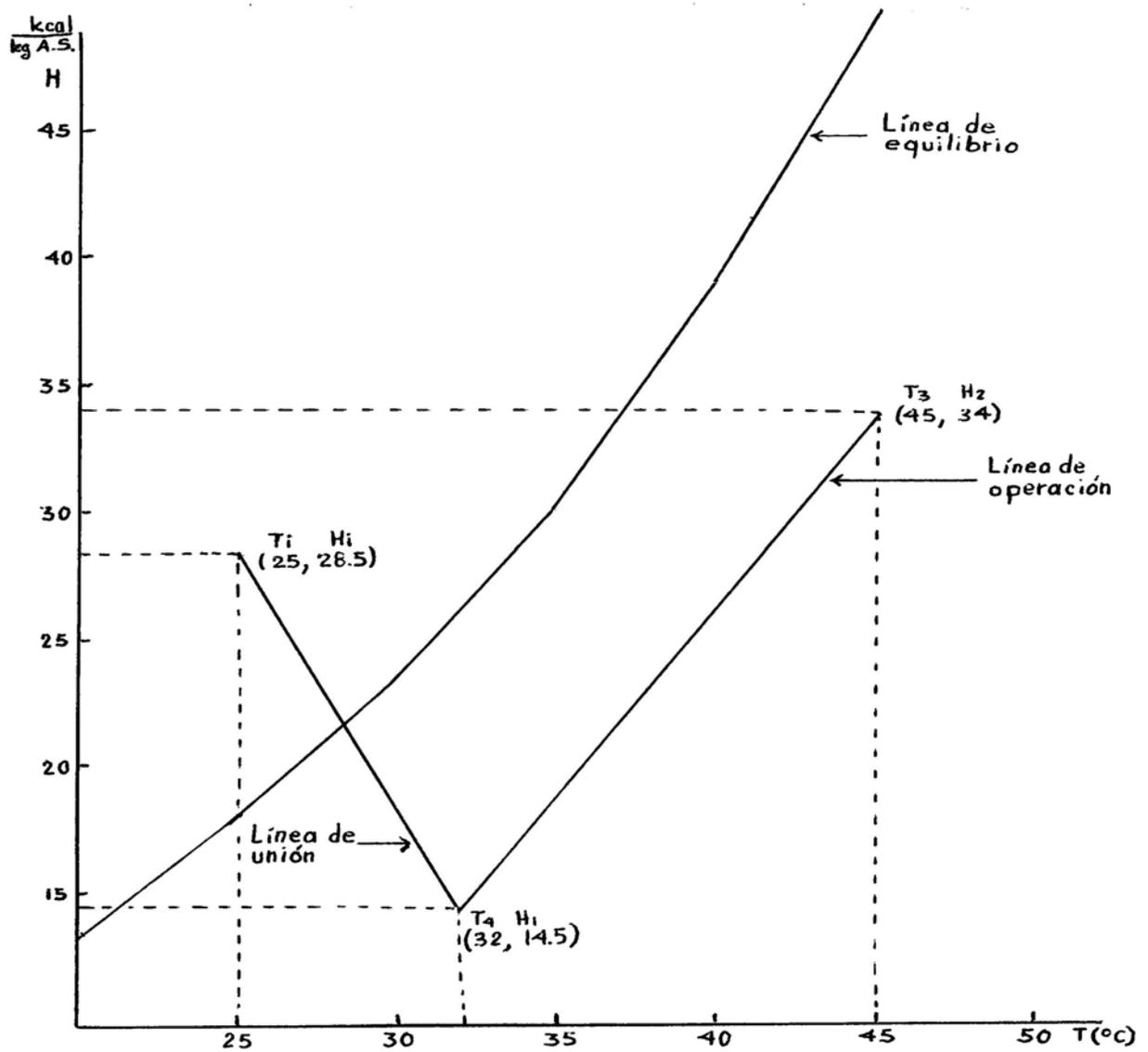


Fig. 3-37. Diagrama entalpía - temperatura para el sistema aire-agua a la presión de 760 mm de Hg

3.5 Numero de unidades de transferencia

Con la ayuda del diagrama, la línea de equilibrio, la de operación y la de unión se obtiene lo siguiente:

T agua	H aire	H_i	$\frac{1}{H_i - H}$	$\frac{1}{H_i - H}$ media	ΔH	Area
32	14.56	22.9	0.136			
35	19.06	25.8	0.148	0.142	4.5	0.639
40	26.56	33.2	0.150	0.149	7.5	1.1175
45	34.04	41.7	0.130	0.14	7.48	1.0472

Σ 2.8037

3.6 Altura de la torre.

$$Z = \frac{4850}{1500} \times 2.8037 = 9.065m$$

4. Resultado

La altura de la torre es de 9.065 m

3.1.8 Determinación de la temperatura global de la fase gaseosa

En los diagramas de entalpía del aire contra temperatura del agua también se puede seguir la trayectoria del aire mediante un método propuesto por Mickley .

A partir de las ecuaciones de transferencia de calor y masa tenemos que:

$$Gs C_H dt = h_{Ga} (t_i - t) dZ \quad \text{calor sensible}$$

$$Gs dH = k_y a (H_i - H) dZ \quad \text{calor total}$$

Dividiendo una entre la otra

$$\frac{dt}{dH} = \frac{t_i - t}{H_i - H}$$

Esta relación nos da la pendiente de la trayectoria del aire durante un dZ de la torre : El método gráfico de Mickley consiste en aplicar esa pendiente durante un intervalo de la torre. Esto se logra mediante lo siguiente:

1. Del punto F correspondiente a la entalpía de entrada del aire a su temperatura se va al punto C sobre la línea de operación y de allí con la pendiente de unión se va a D.
2. Unir D con F y así se tiene la pendiente de la línea del aire. Esta pendiente se mantendrá por un intervalo tal como el FG.
3. Del punto nuevo del aire G se va horizontalmente hasta la línea de operación H y de allí con la línea de unión hasta el equilibrio I.
4. Unir I con G. La línea representa la nueva pendiente del aire la cual puede seguir durante un corto intervalo tal como JG.
5. Del nuevo punto J del aire se traza una horizontal hasta la línea de operación K y de allí con la línea de unión se llega al equilibrio en L.
6. Unir L con J para tener la nueva pendiente de operación del aire la que puede seguir durante el intervalo JN.
7. Continuar este procedimiento hasta que la línea del aire llega a alcanzar la entalpía de salida. Punto Z. Allí se lee la temperatura de ese aire.

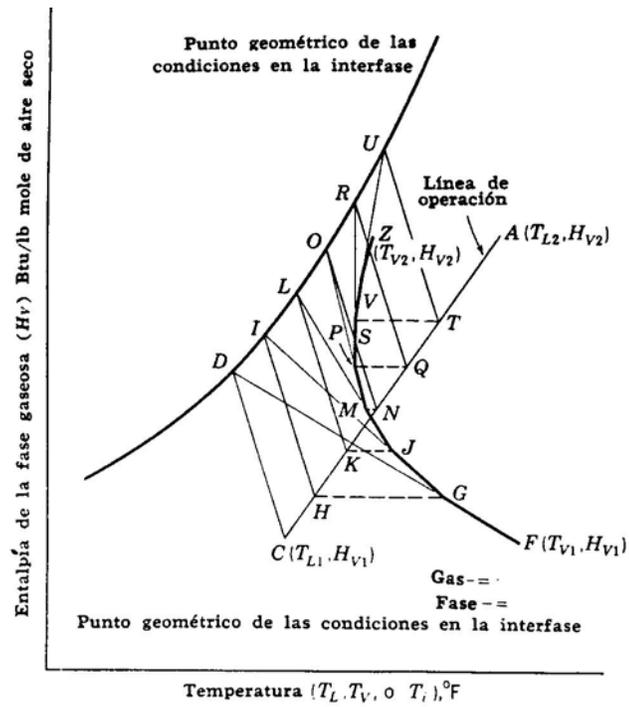


Fig. 3-38. Construcción gráfica de una curva de condiciones de la fase gaseosa

Fuente: 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, 1997.

Ejemplo 20

Para el problema anterior ¿Cuál será la temperatura de salida del aire?

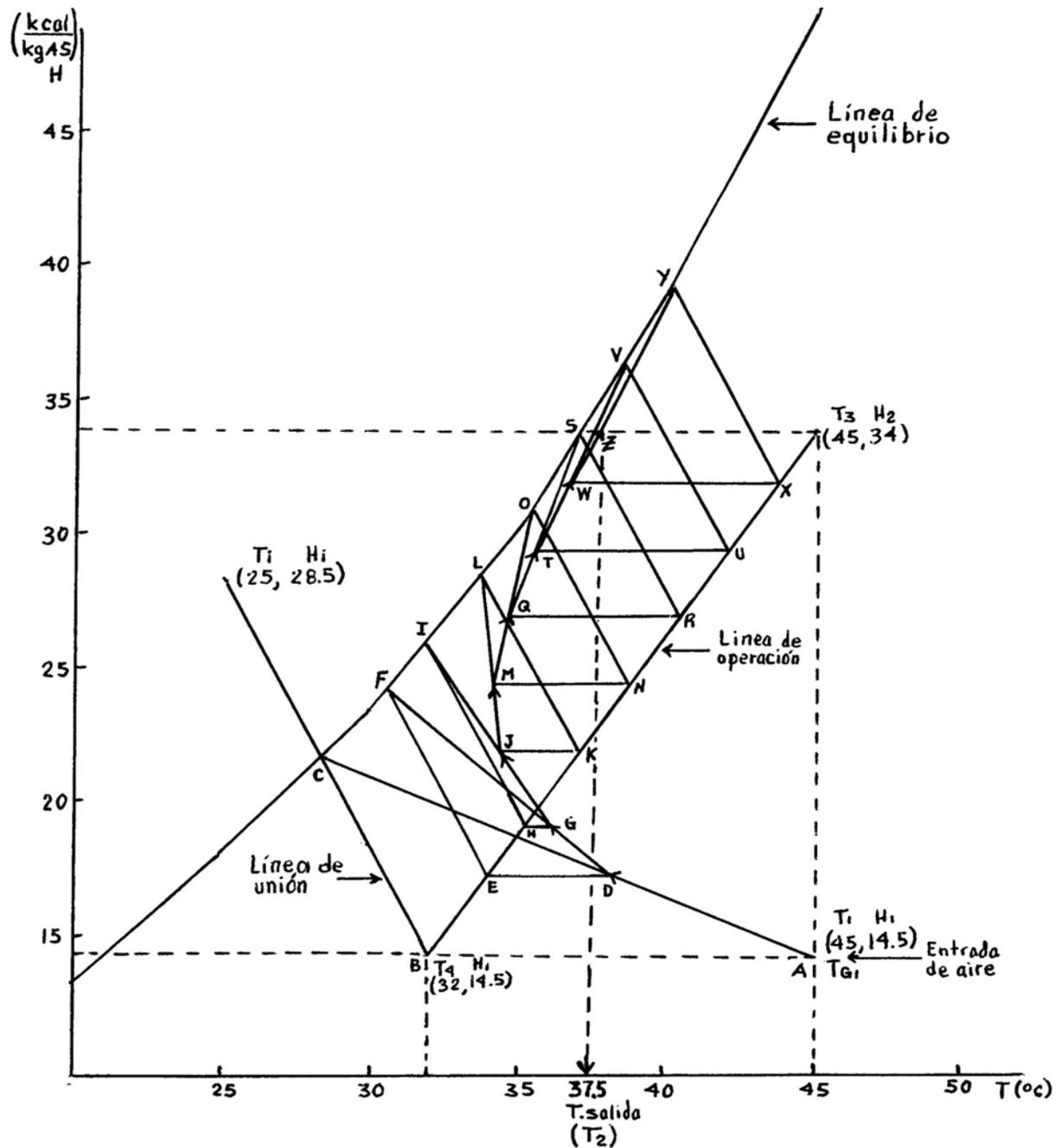


Fig. 3-39. Diagrama de la curva de la condición de la fase gaseosa

Resultado

La temperatura del aire de salida es de 37.5°C

Ejemplo 21

¿Cuál es la humedad del aire de salida del problema anterior?

1. Planteamiento

$$H = (Cp_g + Cp_v Y)(t - t_o) + \lambda Y$$

$$Y = \frac{H - Cp_g t}{Cp_v t + \lambda}$$

2. Cálculos

$$Y = \frac{34 - 0.24(37.5)}{0.46(37.5) + 596}$$

$$Y = 0.040 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

3. Resultado

La humedad del aire de salida es de $0.040 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$

Ejemplo 22

Se necesita enfriar y deshumidificar aire poniéndolo en contacto con agua en una torre empacada. La torre debe diseñarse para las siguientes condiciones:

Entrada:

Temperatura del aire 38°C de bulbo seco y 25°C de bulbo húmedo

Temperatura del agua 10°C

Gasto del aire 1500 kg de aire seco/h

Salida:

Temperatura del agua 18°C

Calcule el número de unidades de transferencia si se usan 1000 kg/h de agua y si la resistencia a la transferencia de calor de la fase líquida es despreciable con respecto a la transferencia de calor en la fase gaseosa.

Calcule la temperatura de salida del aire si la presión atmosférica es de 586 mm de Hg.

1. Traducción.

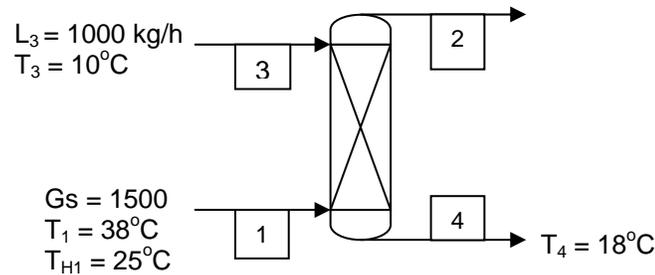


Fig. 3-40. Torre de deshumidificación

2. Planteamiento

2.1 Ecuación de diseño

$$Z = \frac{Gs}{Aky_a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H - H^*}$$

2.2 Línea de operación

$$Gs(H_1 - H_2) = LCp_L(T_4 - T_3)$$

2.3 Línea de unión

$$\frac{H_i - H}{T_i - T} = - \frac{h_{La}}{ky_a} = - \frac{h_{La} C_H}{h_{Ga}} = \infty$$

3. Cálculos

3.1 Condiciones del aire de entrada

A 586 mm de Hg

$$Y_1 = 0.021 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$C_{H1} = 0.24 + 0.46(0.021) = 0.25 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco } ^\circ\text{C}}$$

$$H_1 = 0.25(38 - 0) + 597(0.021) = 22.037 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco}}$$

3.2 Línea de equilibrio a 586 mm de Hg

T del agua °C	H del aire $\frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco}}$
10	8.35
15	12
20	16.6
25	22
30	29
35	37.91
40	49.41
45	64.40
50	84.1

3.3 Línea de operación

$$\frac{LCp_L}{Gs} = \frac{1000}{1500} = 0.666 = \frac{22.037 - H_2}{18 - 10}$$

$$H_2 = 16.709 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco}}$$

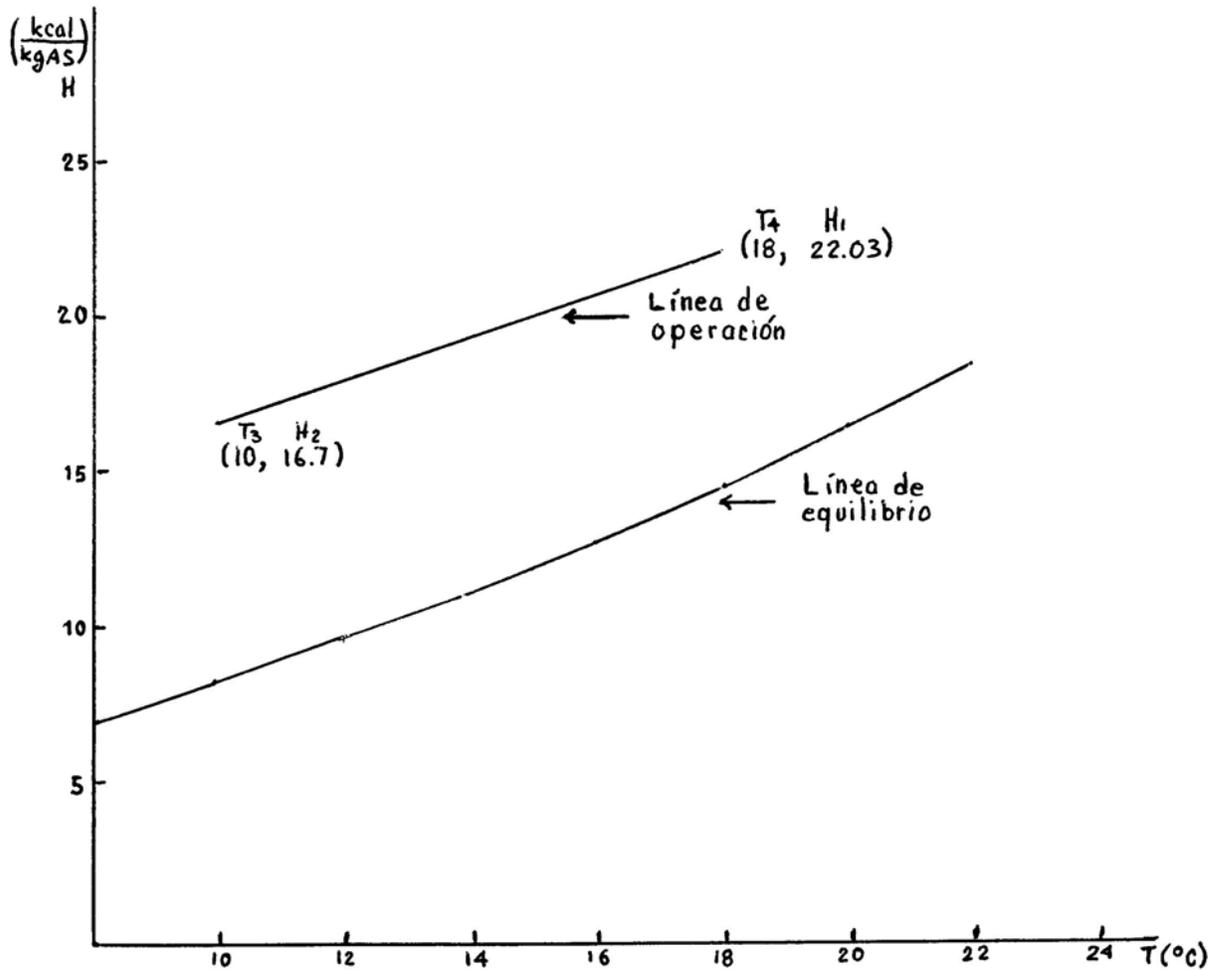


Fig. 3-41. Diagrama entalpía - temperatura para el sistema aire-agua a la presión de 586 mm de Hg

3.4 Número de unidades de transferencia

A partir del diagrama se construye la tabla siguiente:

T agua	H	H*	$\frac{1}{H - H^*}$	$\frac{1}{H - H^*}$ media	ΔH	Area
18	22	14.8	0.1388			
16	20.7	12.9	0.1282	0.1335	1.3	0.1735
14	19.3	11.2	0.1234	0.1258	1.4	0.1761
12	18	9.8	0.1219	0.1226	1.3	0.1593
10	16.7	8.3	0.1190	0.1204	1.3	0.1565

$\Sigma 0.6654$

3.5 Temperatura de salida del aire.

Mediante el método de Mickley

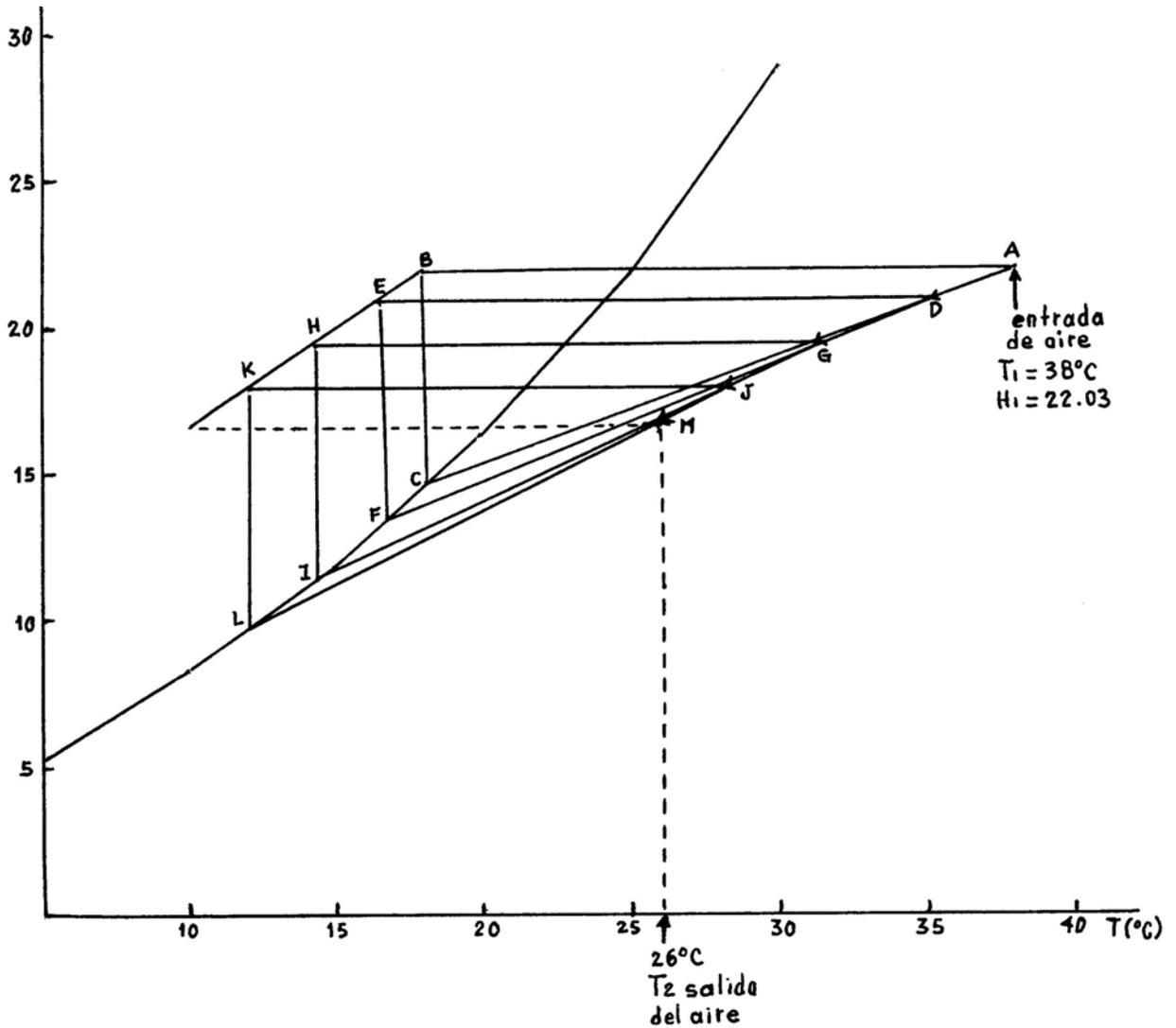


Fig. 3-42. Gráfica de la curva de la condición de la fase gaseosa

Observando la gráfica se tiene que $T_2 = 26$

La línea del aire está dada por la trayectoria A D G J M.

3.6 Humedad del aire saliente.

$$H = C_{Ht} + Y\lambda$$

$$H = (0.24 + 0.46Y) 26 + 597Y = 16.709$$

$$Y = \frac{H - Cp_g t}{Cp_v t + \lambda}$$

$$Y = \frac{16.709 - 0.24(26)}{0.46(26) + 597}$$

$$Y_2 = 0.017 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

4. Resultados.

El número de unidades se transferencia es 0.6654

La temperatura del aire saliente es de 26°C

La humedad del aire saliente es de 0.017 $\frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$

Ejemplo 23

Se va a emplear una torre de humidificación para tratar aire que entra a 35°C con 26°C de bulbo húmedo mediante una lluvia de agua que está a 60°C y que sale a 38°C . La masa velocidad del aire $\frac{G}{A}$ es de $2000 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}$ y la del agua $\frac{L}{A}$ será del doble.

Experimentalmente al tratar con una torre semejante de humidificación por rociado se obtuvieron los datos siguientes:

Torre humidificadora

Diámetro 0.8 m.

Altura 1.5 m y 6 aspersores

$$\frac{L}{A} = 1463 - 3900 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2} ; \quad \frac{G}{A} = 1000 - 3600 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}$$

$$NOG = \frac{0.01 \left(\frac{L}{A} \right)}{\left(\frac{G}{A} \right)^{0.457}}$$

Si estos datos son válidos ¿Cuál será la altura de la columna requerida?

Presión de operación 1 atm

1. Traducción

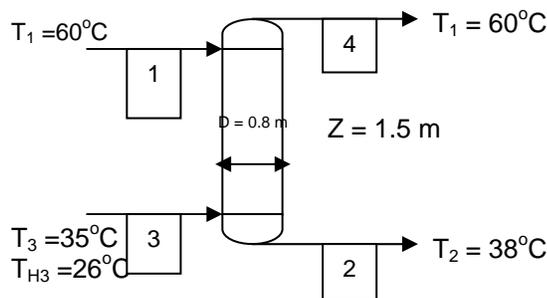


Fig. 3-43. Torre de humidificación

2. Planteamiento

2.1 Balances

$$\text{Agua} \quad GsY_3 + L_1 = GsY_4 + L_2$$

$$\text{Energía} \quad GsH_3 + L_1H_1 = GsH_4 + L_2H_2$$

2.2 Línea de operación

$$Gs(H_4 - H_3) = LCp_L(T_1 - T_2)$$

2.3 Ecuación de diseño

$$Z = \frac{Gs}{Aky_a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H^* - H}$$

3. Cálculos

3.1 Aire entrante

A la presión de 1 atm.

$$Y_3 = 0.018 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$C_{H3} = 0.24828 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco } ^\circ\text{C}}$$

$$H_3 = 19.43 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco}}$$

3.2 Línea de operación

$$2 = \frac{H_4 - 19.43}{60 - 38}$$

$$H_4 = 63.43 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de aire seco}}$$

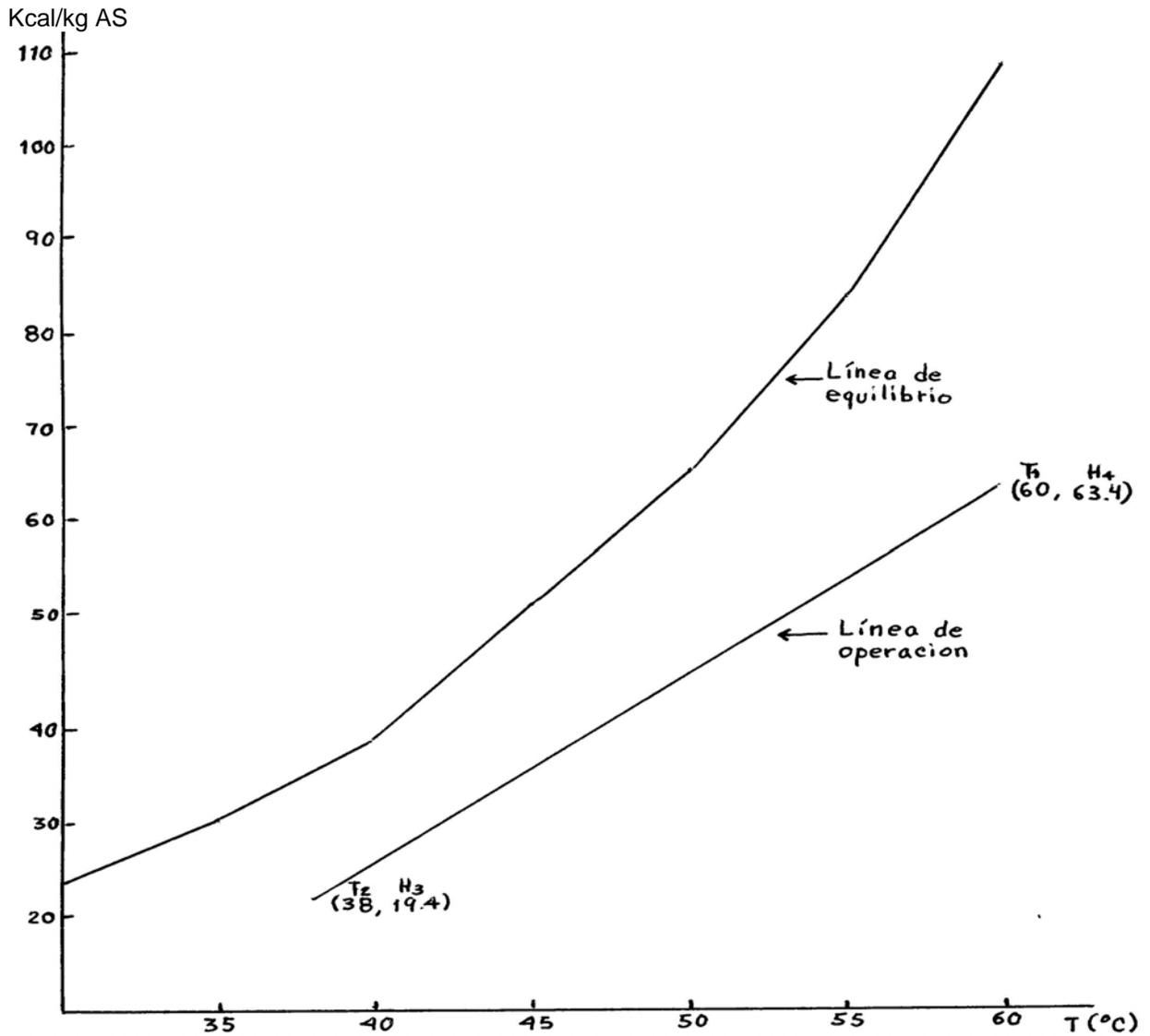


Fig. 3-44. Diagrama entalpía-temperatura para el sistema aire-agua a la presión de 1 atm.

3.3 Número de unidades de transferencia

Del diagrama se obtiene la siguiente tabla

T agua	H	H*	$\frac{1}{H^* - H}$	$\frac{1}{H^* - H}$ media	ΔH	Area
38	19.4	35	0.0641			
40.5	24	40	0.0625	0.0633	4.6	0.29118
45.5	34	51	0.0588	0.06065	10	0.6065
50.5	44	66	0.0454	0.0521	10	0.521
55.5	54	86	0.03125	0.038325	10	0.38325
60	63.8	109	0.02212	0.026685	9.8	0.261513

$$NOG = 2.0634$$

3.4 Altura de la torre

$$Z = \frac{2000}{kya} (2.0634)$$

Como no se conoce Kya no se puede obtener Z pero:

$$kya = \frac{Gs}{AZ} NOG$$

$$\text{y } NOG = \frac{0.01 \left(\frac{L}{A} \right)}{\left(\frac{G}{A} \right)^{0.457}} \quad \text{por lo tanto}$$

$$kya = \frac{Gs}{AZ} \frac{0.01 \left(\frac{L}{A} \right)}{\left(\frac{G}{A} \right)^{0.457}}$$

$$kya = \frac{2000}{1.5} \left[\frac{0.01 (4000)}{(2000)^{0.457}} \right] = 1653 \frac{kg}{h m^3 \Delta Y}$$

Por lo tanto la altura de la torre requerida es de:

$$Z = \frac{2000}{1653} (2.0634) = 2.49 \text{ m}$$

4. Resultado

La altura de la torre es de 2.49 m

CAPITULO IV

TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

4.1 Torres de enfriamiento

Cuando se requiere enfriar grandes cantidades de agua se emplean equipos llamados torres de enfriamiento de agua. Estos equipos no son otra cosa que torres empacadas. En el proceso de enfriamiento de agua el aire se calienta y humedece por lo que el enfriamiento de agua en torres empacadas no es sino un caso particular de la humidificación. Por lo tanto las ecuaciones que se aplican para el diseño de estos equipos son:

$$Z = \frac{Gs}{Aky_a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H - H_i}$$

o

$$Z = \frac{Gs}{Aky_a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H^* - H}$$

Ya sea que se utilicen coeficientes y fuerzas directoras parciales o totales.

Las torres de enfriamiento de agua pueden ser de varios tipos, a saber:

Torres de tiro forzado.

Torres de tiro inducido.

Torres atmosféricas.

Torres hiperbólicas.

Las torres de tiro inducido y de tiro forzado utilizan ventiladores para mover el aire a través de los empaques de la torres. En las torres atmosféricas el aire debido al viento atraviesa el empaque de la torre.

En torres de tipo hiperbólico el aire penetra debido a una chimenea que causa un tiro de aire por diferencias de densidad en el interior de la torre.

En todas las torres de enfriamiento hay ciertos parámetros que son útiles para el dimensionamiento a saber:

Capacidad de la torre. Es decir la cantidad de calor que puede extraer del agua por hora.

Rango. Es la diferencia de temperatura entre el agua entrante y saliente de la torre.

Acercamiento. Diferencia entre la temperatura de salida del agua de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire entrante a la torre. El acercamiento posible está entre 5 y 10°C. Es imposible enfriar un agua por debajo de la temperatura de bulbo húmedo del aire entrante.

Agua de repuesto. En el proceso de enfriamiento por contacto directo parte del agua entrante se evapora para humidifica el aire, otra parte sustancial es arrastrada por el aire saliente. Otra parte del agua se purga en el sistema para evitar la acumulación de sólidos en el sistema. Toda esta agua deberá reponerse para mantener el inventario del agua.

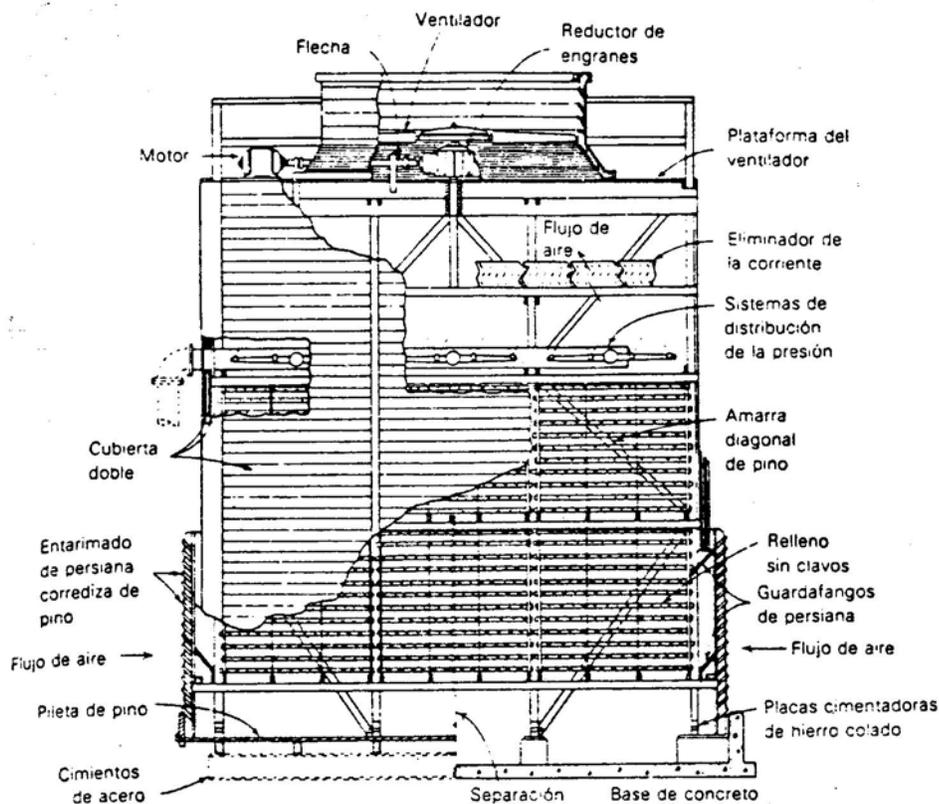


Fig.4-1 Torre de enfriamiento de tiro inducido

Fuente: Treybal R.E., Operaciones de transferencia de masa; Mc Graw-Hill book Co.; México 1978.

4.1.1 Empaques de las torres de enfriamiento de agua

Para manejar grandes cantidades de agua y de aire se requieren empaques con un espacio vacío muy grande, generalmente mayor del 90% con el fin de que la caída de presión del lado del gas sea lo menor posible, en consecuencia la interfase aire-agua no incluye sólo la superficie de la película líquida que humedecen los empaques, sino también la superficie de las gotas que caen como lluvia desde una fila de empaque a la siguiente, ya que el empaque en una torre de enfriamiento tiene el propósito de detener la caída de las gotas y hacer que el agua permanezca el mayor tiempo posible dentro del equipo.

Los empaques más empleados son los de rejillas, enrejados o tarimas de madera, plástico u otro material, los cuales forman pisos.

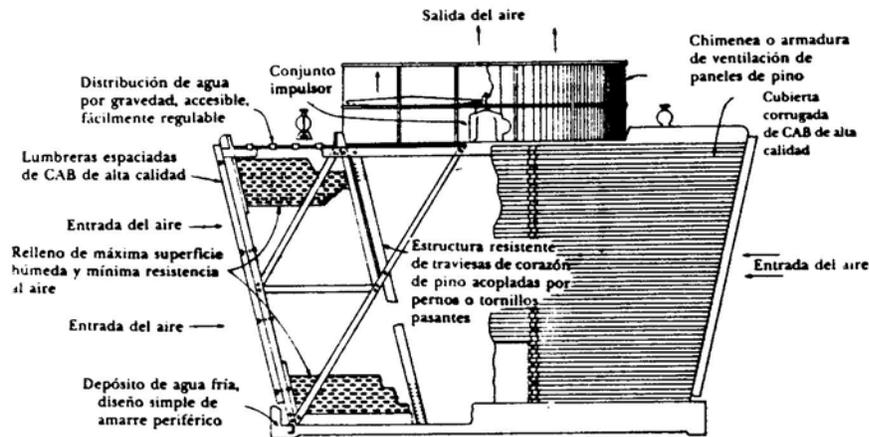


Fig. 4-2. Torre de enfriamiento por convección forzada con tiro inducido por un ventilador

4.2 Método Kelly para el cálculo de torres de enfriamiento de agua

En este método el investigador (Chem., Eng. Pág 263, Vol. 52, No 7, 1956) obtuvo el comportamiento de torres industriales rellenas con empaques de rejillas encontrando que las torres se podrían calcular mediante:

$$\frac{LCp_L}{A} dT = kya (H^* - H) dZ$$

$$Z = \frac{LCp_L}{AKya} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H^* - H}$$

En donde T es la temperatura del agua y H la entalpía del aire, L la masa de agua, A el área transversal de la torre y Kya el coeficiente total volumétrico de transferencia de masa del lado del aire.

La ecuación anterior se puede poner como:

$$\frac{Z A Kya}{LCp_L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H^* - H} = NOG$$

En donde NOG es el número de unidades de transferencia de masa total del lado del gas.

Ahora bien:

$V = Z A$ siendo V el volumen del equipo y para agua $C_{pL} = 1$

Entonces:

$$\frac{K y a V}{L} = NOG$$

Kelly encontró que se podrían correlacionar el NOG contra L/G para los diversos empaques utilizados y encontró que:

$$\frac{K y a V}{L} = NOG = 0.7 + AN \left(\frac{L}{G} \right)^{-n}$$

Siendo N el número de pisos, A y n constantes de los empaques y L/G la pendiente de la línea de operación.

El investigador también encontró que la caída de presión en las torres que utilizaban los empaques seleccionados se podrían calcular por:

$$\Delta P = NB \left(\frac{G}{A} \right)^2 \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right) + NC \sqrt{S_F} \left(\frac{L}{A} \right) G_E^2 \left(\frac{0.675}{\rho_G} \right)$$

En donde B, C y S_F son constantes del empaque y G_E es la masa velocidad efectiva que se puede obtener a partir de la gráfica siguiente

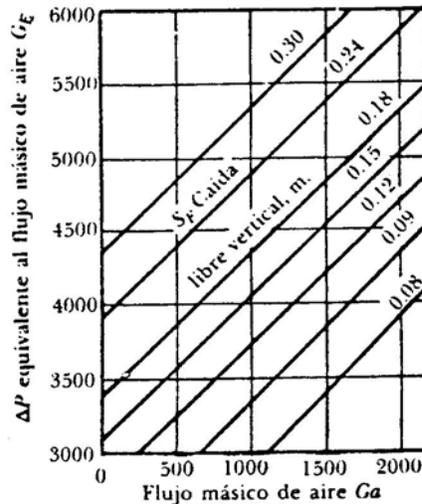


Fig. 4-3. Gráfica de la curva de pérdidas de presión

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants; Gulf Publishing Co.; Houston, U.S.A. 1997

Los datos y constantes para los diversos empaques se encuentran en los apéndices.

En donde G/A y L/A están en lb / hft^2 .

S_F es la caída libre vertical de una gota en ft.

P_G es la densidad media del aire a las condiciones de operación en lb / ft^3

ΔP es la caída de presión en pulgadas de agua

Las torres de enfriamiento mecánicas se designan por lo general para L/G de 0.75 a

1.5 y los valores de $\frac{K y a V}{L}$ van de 0.5 a 2.5

La caída de presión a través de los eliminadores de niebla varían desde 0.101 pulgadas de agua para un G / A de 800 a 0.7 a un G / A de 2000 $lb/h ft^2$.

Las caídas de presión producidas por las entradas a las persianas son de 0.02 pulgadas de agua para velocidades de entrada de 400 ft / min a 0.32 pulgadas para velocidades de 1600 ft / min comportándose como una línea recta entre esos dos extremos.

Los caballos requeridos para mover los ventiladores pueden calcularse mediante

$$BHP = \frac{Ca \Delta P_T}{6356(0.5)}$$

en donde Ca son los ft^3 / min de aire a la entrada del ventilador.

ΔP_T la caída de presión total de la torre en pulgadas de agua.

$\eta = 0.5$ es una eficiencia calculada media del 50% en los ventiladores.

Las torres económicas requieren de entre 0.05 y 0.08 hp / ft² de área transversal y no se usan motores mayores de 75 hp.

El área transversal de las torres de enfriamiento suelen obtenerse mediante la cantidad de agua que se introduce por metro cuadrado de área transversal y se pueden obtener mediante la siguiente gráfica.

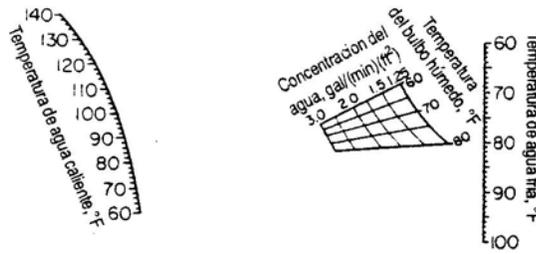


Fig. 4-4. Gráfica para determinar las dimensiones de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente

Fuente: Perry, J. H., y C. H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5a. Ed., Mc Graw Hill, Nueva York, 1973 tabla 3-3.

Tipo de empaque	A'	n	S _f m	B × 10 ⁻⁸	C' × 10 ⁻¹²
A	0.060	0.62	0.091	0.34	0.11
B	0.070	0.62	0.122	0.34	0.11
C	0.092	0.60	0.119	0.40	0.14
D	0.119	0.58	0.183	0.40	0.14
E	0.110	0.46	0.151	0.60	0.15
F	0.100	0.51	0.276	0.26	0.07
G	0.104	0.57	0.212	0.40	0.10
H	0.127	0.47	0.114	0.75	0.26
I	0.135	0.57	0.147	0.52	0.16
J	0.103	0.54	0.212	0.40	0.10

Fig. 4-5. Tabla de valores de A, n, B, C y S para empaques enrejados

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants; Gulf Publishing Co.; Houston, U.S.A. 1997

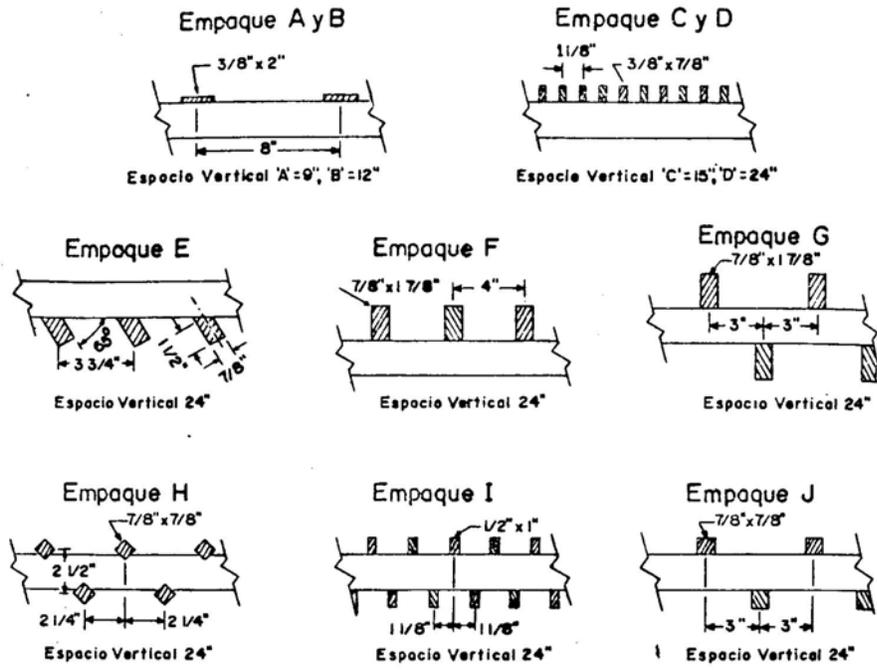


Fig. 4-6. tipos de empaque.

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A. 1997

Ejemplo 24

Una planta requiere 1000 kg/min de agua fría para eliminar 15000 kcal/min de los condensadores de una columna de destilación. El agua sale del condensador a 43°C y se debe enfriar en una torre de enfriamiento de agua de tiro inducido. Las condiciones de diseño son:

Aire ambiente 30°C de bulbo seco y 24°C de bulbo húmedo.

El agua se enfriará hasta 6°C por arriba de la temperatura de bulbo húmedo del aire (acercamiento)

Se usará una relación de aire a agua de 1.5 veces el mínimo. Para el empaque seleccionado se ha encontrado que $K_{ya} = 3000 \frac{\text{kg}}{\text{hm}\Delta Y}$ si

$$\text{el } \frac{G}{A} = 7000 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}$$

Obtener:

La altura empacada y la sección transversal necesaria.

El agua de repuesto requerida.

Considere que la torre está instalada en la Ciudad de México.

1. Traducción.

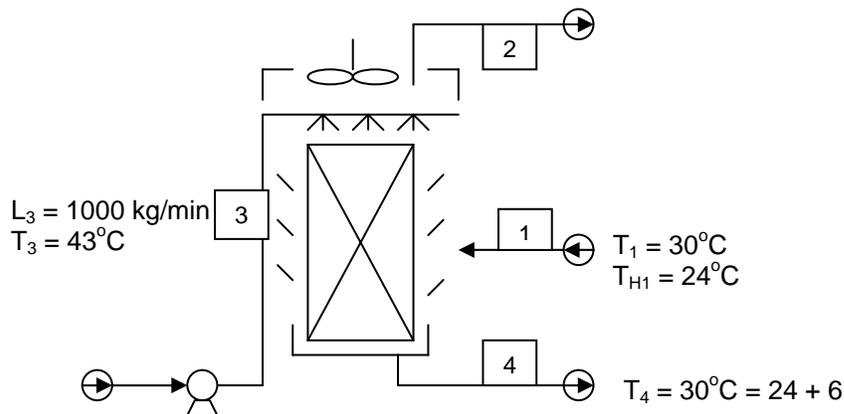


Fig. 4-7. Diagrama de flujo para enfriar agua

2. Planteamiento

2.1 Balances

$$\text{Aire seco} \quad G_{S1} = G_{S2}$$

$$\text{Agua} \quad G_{S1}Y_1 + L_3 = G_{S2}Y_2 + L_4$$

$$\text{Agua evaporada} \quad G_S(Y_2 - Y_1) = L_3 - L_4$$

$$\text{Energía} \quad G_{S1}H_1 + L_3H_3 = G_{S2}H_2 + L_4H_4$$

2.2 Ecuación de la línea de operación

$$G_S(H_2 - H_1) = L_{CpL}(T_3 - T_4)$$

2.3 Ecuación de diseño

$$Z = \frac{G_S}{A k_y a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H^* - H}$$

3. Cálculos

3.1 Datos del aire de entrada.

De la carta psicrométrica a 586 mm de Hg

$$Y_1 = 0.022 \quad , \quad C_{H1} = 0.2501 \quad , \quad H_1 = 20.63 \quad , \quad V_H = 1.1506 \frac{m^3}{kg \text{ A.S.}}$$

3.2 Gasto caudal másico de aire

Para determinar el caudal másico mínimo de aire leemos la pendiente de la recta de unión A con el punto de la curva de saturación que corresponde a la temperatura de entrada del agua en la torre B'.

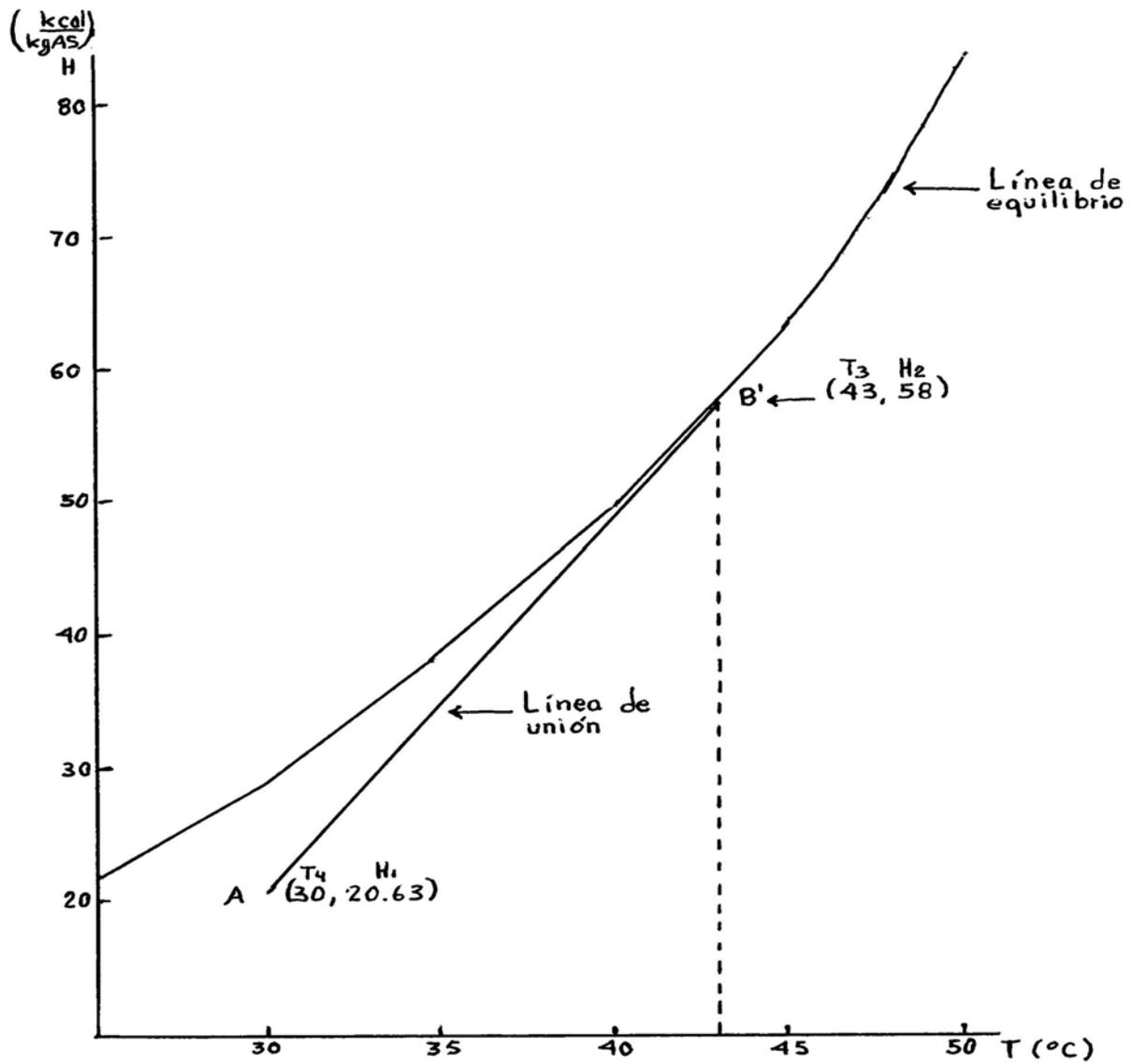


Fig. 4-8. Diagrama entalpía temperatura para el sistema aire-agua a la presión de 586 mm de Hg

El valor de esta pendiente es

De la gráfica H_2 máxima es de 58 kcal/kg

Por lo tanto:

$$\frac{LC p_L}{G_s} = \frac{58 - 20.63}{43 - 30} = 2.87$$

$$G_{\min} = \frac{60000 \frac{kh}{h}}{2.87} = 20905.92 \frac{kg}{h}$$

El caudal másico a emplear será:

$$G_{op} = 20905.92 \frac{kg}{h} \quad (1.5)$$

$$G_{op} = 31358.88 \frac{kg \text{ de aire seco}}{h}$$

3.3 Pendiente de la línea de operación

$$\frac{LC p_L}{Gs} = \frac{6000(1)}{31358.88} = 1.9$$

3.4 Línea de operación

$$\frac{LC p_L}{Gs} = \frac{H_2 - H_1}{T_3 - T_4}$$

$$1.9 = \frac{H_2 - 20.63}{43 - 30}$$

$$H_2 = 45.33$$

Con este dato se puede trazar la línea de operación

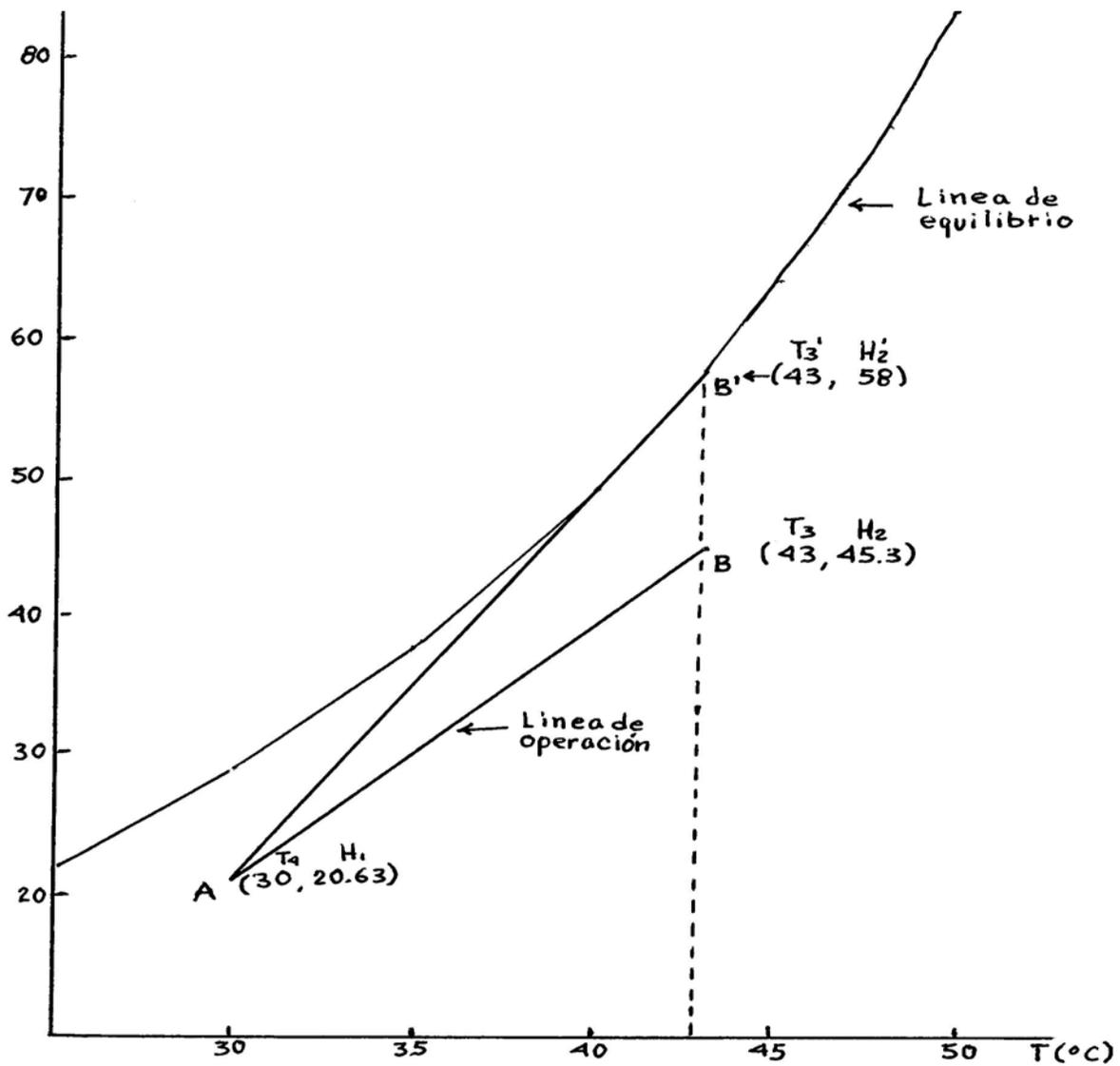


Fig. 4-9. Diagrama entalpía temperatura para el sistema aire-agua a la presión de 586 mm de Hg

3.4 Número de unidades de transferencia

A partir del diagrama se puede construir la siguiente tabla para obtener la integración por el método de trapecios:

T (°C)	H	H*	$\frac{1}{H^* - H}$	Media	ΔH	área
30	20.63	29	0.1194			
35	30.3	38	0.1298	0.1033	9.67	1.2048
40	39.5	49.4	0.01	0.0844	9.2	0.64308
43	45.3	58	0.0787	0.0611	5.8	0.25723

NOG=2.105

3.5 Area y diámetro de la torre

$$A = \frac{G}{\frac{G}{A}} = \frac{31358.88}{7000} = 4.47 \text{ m}^2$$

Si la torre fuera cilíndrica el diámetro sería de:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 4.47}{\pi}} = 2.38 \text{ m}$$

3.6 Altura de la torre

$$Z = \frac{G_s}{A K y a} \times NOG$$

$$Z = \frac{7000}{3000} \times 2.105 = 4.911 \text{ m} \cong 5 \text{ m}$$

4. Resultados

La torre tendrá una altura de 5m y un diámetro de 2.4 m

Ejemplo 25

Diseñe una torre para enfriar 3 m³/min. de agua desde 40°C hasta 25°C utilizando aire que tiene una temperatura de bulbo seco de 23°C y una temperatura de bulbo húmedo de 20°C. Utilice el método Kelly. La presión de operación es de 760 mm de Hg. La altura máxima del empaque debe ser de alrededor de 6 m.
¿Qué empaque se deberá utilizar? , ¿Cuál será el L/G requerido?

1. Traducción.

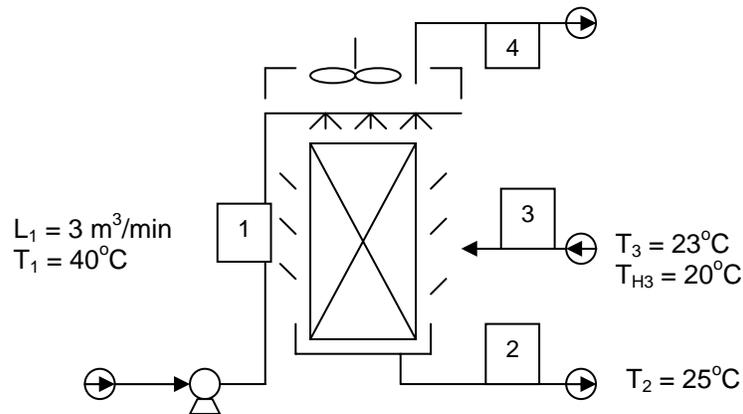


Fig. 4-10. Diagrama de flujo para enfriar agua

2. Planteamiento.

2.1 Método de Kelly

$$\frac{KyaV}{L} = NOG = 0.07 + AN \left(\frac{L}{G} \right)^{-n}$$

2.2 Línea de operación

$$Gs dH = L Cp dT$$

$$Gs (H_4 - H_3) = L Cp_L (T_1 - T_2)$$

3. Cálculos

3.1 Condiciones del aire entrante

De la carta psicrométrica

$$Y_3 = 0.014$$

$$H_3 = 14.026 \text{ kcal/kg}$$

3.2 Rango y acercamiento

$$\text{Rango } T_1 - T_2 = 40 - 25 = 15^\circ\text{C} = 59^\circ\text{F}$$

$$\text{Acercamiento } T_2 - T_{H3} = 25 - 20 = 5^\circ\text{C} = 41^\circ\text{F}$$

3.3 Línea de equilibrio y de operación

Suponiendo un $L/G = 0.75$

$$0.75 = \frac{H_4 - 14}{40 - 25}$$

$$H_4 = 25.25 \text{ kcal/kg}$$

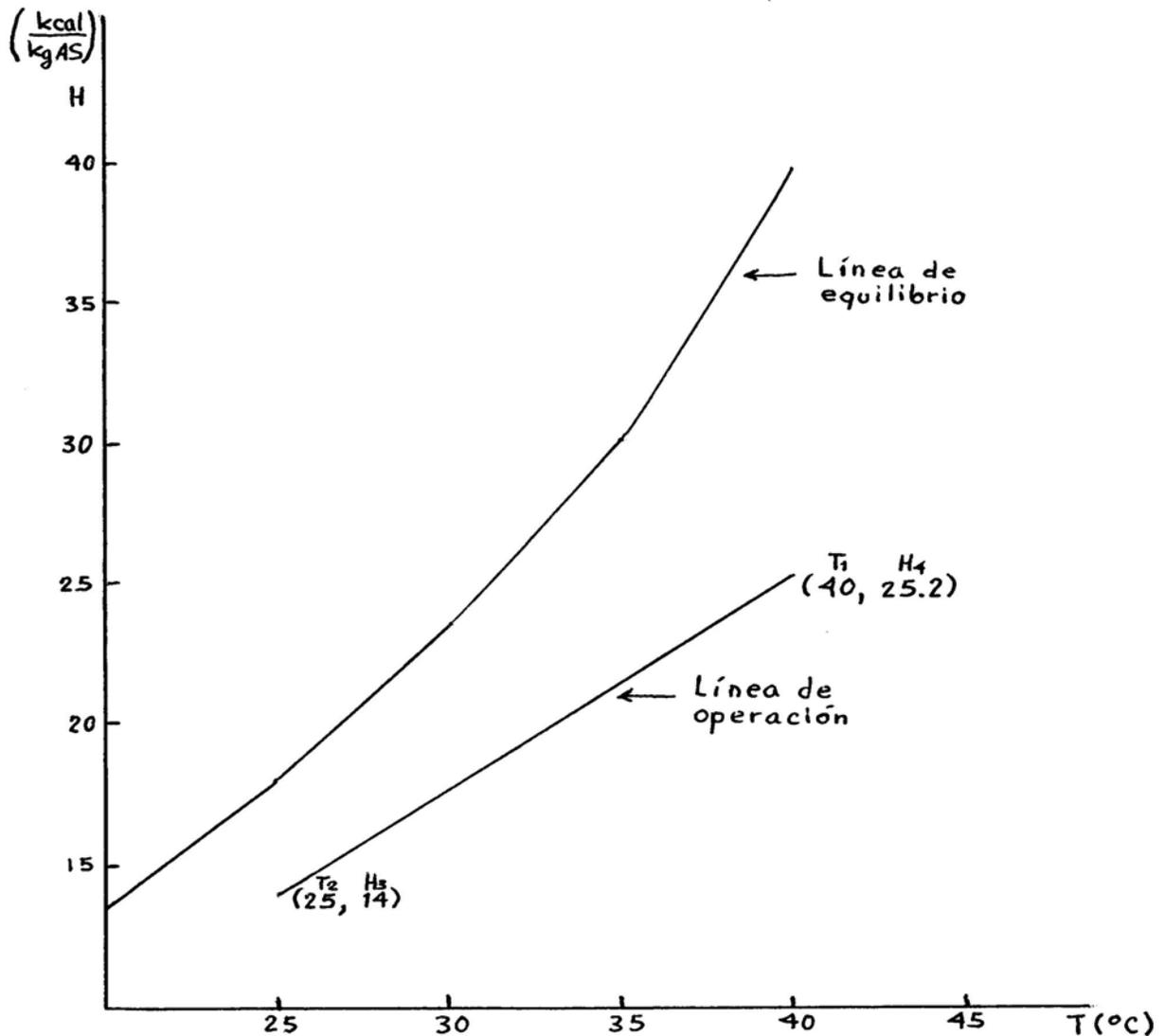


Fig. 4-11. Diagrama entalpía temperatura para el sistema aire-agua a la presión de 760 mm de Hg

3.4 Número de unidades de transferencia

Del diagrama:

T °C	H $\frac{kcal}{kg}$	H*	$\frac{1}{H^* - H}$	Media	ΔH	área
25	14	18.3	0.232			
30	17.7	23.6	0.169	0.2005	3.7	0.74185
35	21.5	30.47	0.111	0.14	3.8	0.532
40	25.3	39.4	0.070	0.0905	3.8	0.3439

$$NUT = 1.61$$

3.5 Altura de la torre

Si se escoge empaque F

$$A = 0.100 \quad B = 0.57 \times 10^{-8} \quad n = 0.51 \quad C = 0.26 \times 10^{-12} \quad S_F = 3.64$$

Distancia entre pisos 24" = 2 ft

$$1.61 = 0.07 + 0.1 N (0.75)^{-0.51} \quad N = 13.29$$

Altura de la torre 13.29 X 2 ft = 26.59 ft = 8m

Esta altura excede la requerida

Si se utiliza el mismo L/G y un empaque I

$$A = 0.135 \quad n = 0.57$$

Distancia entre pisos 24" = 2 ft

$$1.61 = 0.07 + 0.135 N (0.75)^{-0.57} \quad N = 9.68$$

Altura = 9.68 x 2 ft = 19.36 ft = 5.89 m

4. Resultado

La torre tendrá una altura de 5.89 m.

Se utilizará un empaque I y un L/G de 0.75

Para resolver estos problemas con frecuencia se tienen que hacer muchos tanteos, lo que implica cambiar de empaques y o variar la pendiente de operación. Lo anterior se puede obviar si se utilizan gráficas propuestas en el libro de Ludwig – Design of Chemical and Petrochemical plants – Ed. Gulf. Ver **APENDICE 7**

Las gráficas tienen la forma y disposición siguiente:

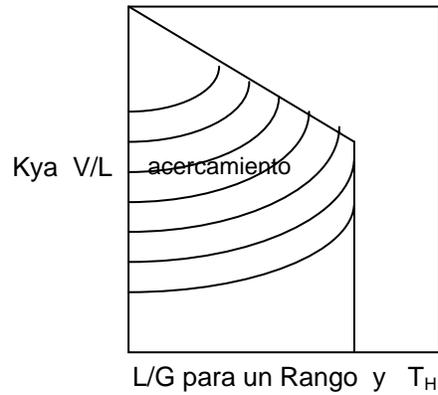


Fig. 4-12. Esquema de la grafica de Pitchar

De las gráficas presentes se debe utilizar aquella que más se acerque a las condiciones de nuestro problema. Con la gráfica y el empaque seleccionado se puede calcular el NUT para dos valores de L / G , esto dará dos puntos. Uniendo esos dos puntos con una línea recta y extrapolando al acercamiento requerido se puede obtener el L / G de operación buscado y el NUT de operación.

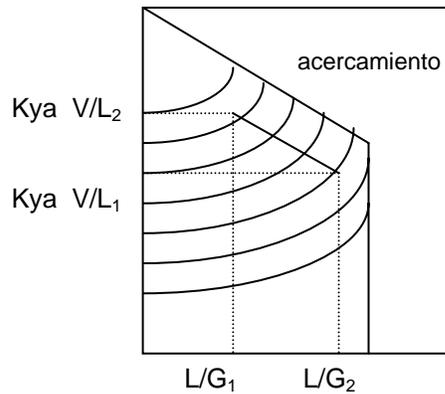


Fig. 4-13. Esquema la grafica de Pitchar

Ejemplo 26

Haga el diseño de una torre de enfriamiento para tratar 20 m³/min de agua desde 43°C hasta 29°C utilizando aire a una atmósfera, el cual tiene una temperatura de bulbo húmedo de 24°C. Utilice el empaque A de Kelly. La altura de la torre deberá ser de alrededor de 6m.

1. Traducción

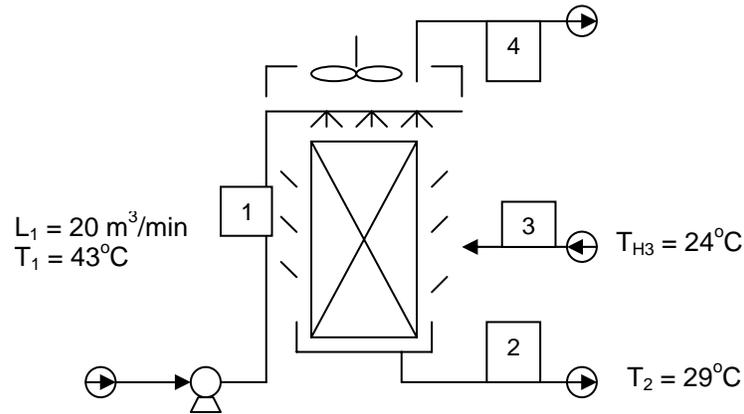


Fig. 4-14. Diagrama de flujo para enfriar agua

2. Planteamiento

2.1 Método de Kelly

$$\frac{KyaV}{L} = 0.07 + AN \left(\frac{L}{G} \right)^{-n}$$

$$\Delta P = NB \left(\frac{G}{A} \right)^2 \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right) + NC \sqrt{S_F} \left(\frac{L}{A} \right) G_E^2 \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right)$$

3. Cálculos.

3.1 Rango y acercamiento

$$\text{Rango} = 43 - 29 = 14^\circ\text{C} = 25^\circ\text{F}$$

$$\text{Acercamiento} = 29 - 24 = 5^\circ\text{C} = 9^\circ\text{F}$$

3.2 Datos del empaque A

$$A = 0.06, \quad n = 0.62, \quad S_F = 3, \quad B = 0.34 \times 10^{-8}, \quad C = 0.11 \times 10^{-12}$$

Distancia entre pisos = 0.75 ft = 0.23 m

3.3 Selección del L/G

si la altura es de 6 m = 20 ft

el número de pisos es de 20/0.75 = 26

Si $\frac{L}{G} = 0.75$ entonces:

$$\frac{KyaV}{L} = 0.07 + (0.06)(26)(0.75)^{-0.62} \quad \frac{KyaV}{L} = 1.93$$

Si $L/G = 2$ entonces:

$$\frac{KyaV}{L} = 0.07 + (0.06)(26)(2)^{-0.62} \quad \frac{KyaV}{L} = 1.08$$

3.4 Con los puntos anteriores se selecciona una de las gráficas de Pinchar (ver **APENDICE 7-C**)

La que más se acerca en este caso es la carta con rango de 25 °F y bulbo húmedo de 75°F

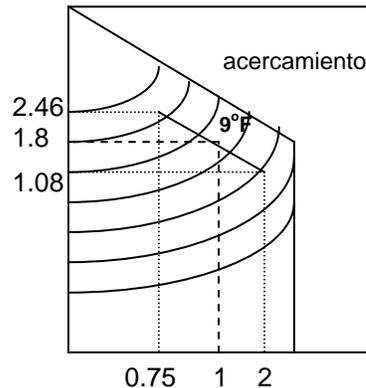


Fig. 4-15. Esquema la grafica de inchar

De la carta se obtiene que el L/G recomendable es de 0.93 con un

$$\frac{KyaV}{L} = 1.7$$

3.7 Cantidad de aire

Caudal de agua 20m³/min = 5000GPM

Densidad del agua a 43°C = 995 kg / m³

$$L = 20 \frac{m^3}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{h} \times \frac{995 \text{ kg}}{m^3} = 1194000 \frac{\text{kg}}{h} = 2626800 \frac{\text{lb}}{h} \text{ de agua}$$

por lo tanto

$$G = 1194000 \text{ kg/h de aire seco}$$

3.6 Area transversal de la torre

A partir de la gráfica de concentración

Con temperatura del agua entrante de $43^\circ\text{C} = 110^\circ\text{F}$

Temperatura del agua saliente $29^\circ\text{C} = 84^\circ\text{F}$

Temperatura de bulbo húmedo $24^\circ\text{C} = 75^\circ\text{F}$

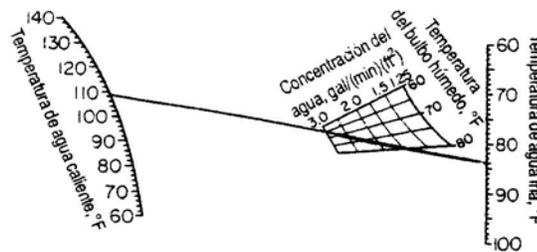


Fig. 4-16. Gráfica para determinar las dimensiones de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente

Fuente: Perry, J. H., y C. H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5a. Ed., Mc Graw Hill, Nueva York, 1973 tabla 3-3.

De la gráfica se encuentra que la concentración de agua permisible es de

$$2.5 \frac{\text{galones}}{\text{min ft}^2}$$

por lo tanto el área es de:

$$\text{área} = \frac{5000 \frac{\text{gal}}{\text{min}}}{2.5 \frac{\text{gal}}{\text{min ft}^2}} = 2000 \text{ ft}^2$$

$$\frac{G}{A} = \frac{2626800 \frac{\text{lb}}{h}}{2000 \text{ ft}^2} = 1313 \frac{\text{lb}}{h \text{ ft}^2} = \frac{L}{A} = 6415 \frac{\text{kg}}{h \text{ m}^2}$$

3.8 Caída de presión por empaque

$$\Delta P = NB \left(\frac{G}{A} \right)^2 \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right) + NC \sqrt{S_F} \left(\frac{L}{A} \right) G_E^2 \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right)$$

$$\frac{G}{A} = \frac{2626800 \frac{lb}{h}}{2000 \text{ ft}^2} = 1313 \frac{lb}{h \text{ ft}^2}$$

$$\frac{L}{A} = 1313 \frac{lb}{h \text{ ft}^2}$$

Suponiendo que el aire sale saturado y con bulbo húmedo de 75 °F

$Y = 0.019$ kg agua / kg aire seco

$$V_H = 0.86 \frac{m^3}{kg} = 13.86 \frac{ft^3}{lb}$$

$$\rho_g = 0.072 \frac{lb}{ft^3} \text{ a } 75^\circ\text{F} \quad \text{y} \quad Y = 0.019 \frac{lb \text{ de agua}}{lb \text{ de aire seco}}$$

a partir de la gráfica se obtiene G_E con $S_F = 0.3$

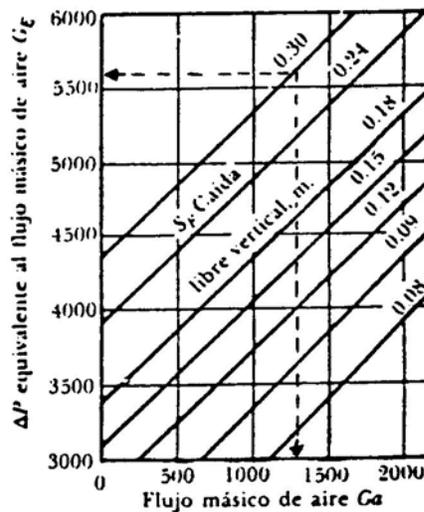


Fig. 4-17. Gráfica de la curva de pérdidas de presión

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants; Gulf Publishing Co.; Houston, U.S.A.; 1997.

Las líneas discontinuas en la gráfica indican que:
 $G_E = 3600$ y $G/A = 1313$

$$\Delta P = 26(0.34 \times 10^{-8})(1313)^2 \left(\frac{0.0675}{0.072} \right) + 26(0.11 \times 10^{-12}) \sqrt{3}(1313)(3600)^2 \left(\frac{0.0675}{0.072} \right)$$

$\Delta P = 0.2218$ pulgadas de agua

3.8 Caída de presión por eliminador de niebla

$$\Delta P = 0.01 + \frac{0.07 - 0.01}{2000 - 800} (1313 - 800) = 0.035 \text{ pulgadas de agua}$$

3.9 Caída de presión por persianas.

Velocidad frontal

Esta velocidad depende del área dada a las persianas

Si la torre fuera de 100 pies por 20 pies y 20 ft

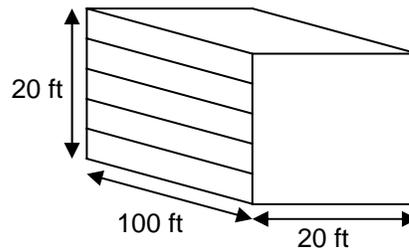


Fig. 4-18. Esquema de dimensiones de la torre

Área transversal 2000 ft^2

Area frontal de persianas (2 lados) = $100 \times 20 \times 2 = 4000 \text{ ft}^2$

Velocidad frontal

$$V = \frac{2626800 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \times \frac{\text{ft}^3}{0.072 \text{ lb}}}{4000 \text{ ft}^2} = 9121 \frac{\text{ft}}{\text{h}} = 152 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

se recomienda velocidad entre 400 y 1600 ft / min.

Por lo tanto si la altura de las persianas las bajamos 8 ft entonces el área frontal será de $6 \times 100 \times 2 = 1200 \text{ ft}^2$

La velocidad frontal será:

$$V_F = 507 \text{ ft/min}$$

$$\Delta P = 0.02 + \frac{0.32 - 0.02}{1600 - 400} (507 - 400) = 0.046 \text{ pulgadas de agua}$$

3.10 Ventilador

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{empaquet} + \Delta P_{niebla} + \Delta P_{persianas}$$

$$\Delta P_{total} = 0.2218 + 0.035 + 0.046 = 0.3028 \text{ pulgadas de agua}$$

Si la eficiencia del ventilador es del 50 %

$$BHP = \frac{2626800 \times \frac{1}{0.072} \times 0.2848}{60 \times 0.5 \times 6356} = 54.4 \text{ BHP}$$

Se pueden colocar ventiladores de 11 HP cada 20 pies

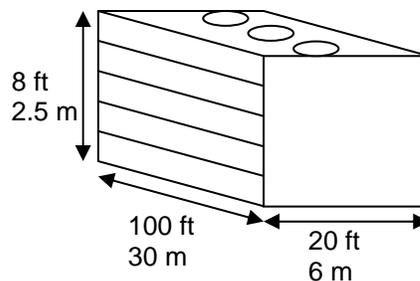


Fig. 4-19. Esquema de distribución de los ventiladores en la torre de enfriamiento

4. Resultado

Se requiere una torre de 6m de empaque A de Kelly

La torre trabajará con un L/G de 1

La torre tendrá un área transversal de 2000ft^2 (186 m^2)

La torre requerirá de 55 BHP de potencia en los ventiladores.

Para poder predecir las características del comportamiento de una torre es necesario conocer las condiciones ambientales del aire y del agua. Esto generalmente requiere una integración tediosa que se puede evitar usando un nomograma preparado por Woods y Betts. Las torres de enfriamiento mecánicas se diseñan normalmente para relaciones de L / G que van de 0.75 a 1.5 y para valores de $\frac{KyaV}{L}$ que van de 0.5 a 2.5. Con estos rangos en mente se puede usar el nomograma.

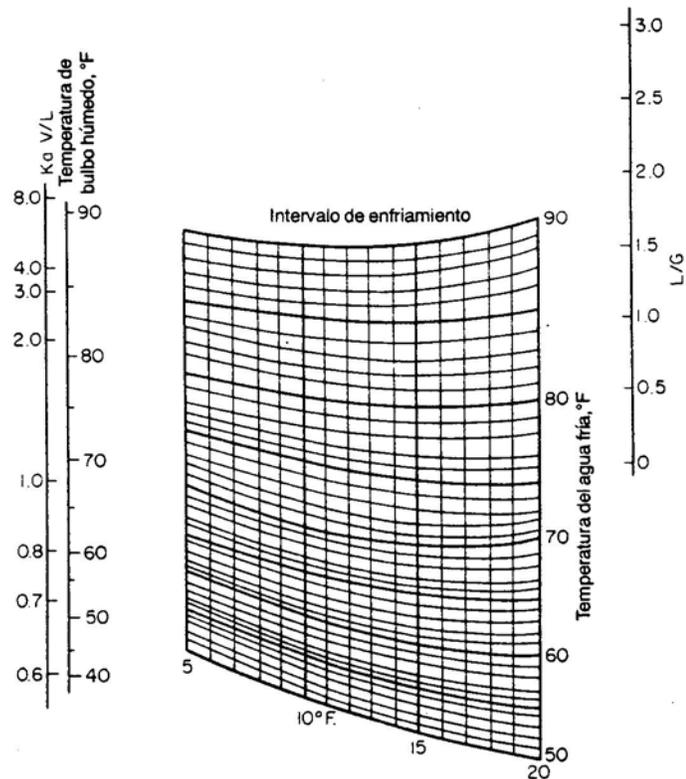


Fig. 4-20. Nomograma de las características de una torre de enfriamiento

Fuente: Perry, J. H., y C. H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5a. Ed., Mc Graw Hill, Nueva York, 1973 tabla 3-3.

Ejemplo 27

Una torre opera con un rango de 20°F (11°C), una temperatura de agua fría de 80°F (27°C) y una temperatura de bulbo húmedo del aire de 21°C. La relación de L/G es de 1. ¿Cuál sería la temperatura a la que saldría el agua si la temperatura de bulbo húmedo bajara hasta 10°C (50°F) y si no se movieran las otras condiciones?

1. Traducción

1.1 Comparación de las torres.

2. Planteamiento.

2.1 Comparación de las torres.

$$Z_1 = \frac{L}{AKy_a} NUT \qquad Z_2 = \frac{L}{AKy_a} NUT$$

pero $Z_1 = Z_2$

$$\frac{L}{AKy_{a_1}} NUT_1 = \frac{L}{AKy_{a_2}} NUT_2$$

$$\frac{NUT_1}{NUT_2} = \frac{Ky_{a_1}}{Ky_{a_2}}$$

Al no cambiar la cantidad de gas y de líquido

$$\left(\frac{L}{G}\right)_1 = \left(\frac{L}{G}\right)_2$$

Ahora bien en las corrientes de transferencia de masa

$$Sh \propto Re^{0.8} Sc^{0.33}$$

A tratarse del mismo sistema

$$Sh \propto Re^{0.8}$$

$$\frac{Ky_a D}{D_{AB}} \propto \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8}$$

Por lo tanto si se trata del mismo sistema y mismo equipo:

$$\frac{Kya_1}{Kya_2} = \left(\frac{G_1}{G_2}\right)^{0.8} \quad \text{y si } G_1 = G_2$$

$$Kya_1 = Kya_2$$

$$\left(\frac{Kya V}{L}\right)_1 = \left(\frac{Kya V}{L}\right)_2$$

Método de Woods.

Conecte al rango de 80°F con la temperatura de bulbo húmedo 70°F.
Línea 1 .

Luego a través de un L/G trace una línea paralela para localizar el valor de KyaV/L. Línea 2

De esos trazos se observa que el L/G es de 1 y el KyaV/L es de 1.42.

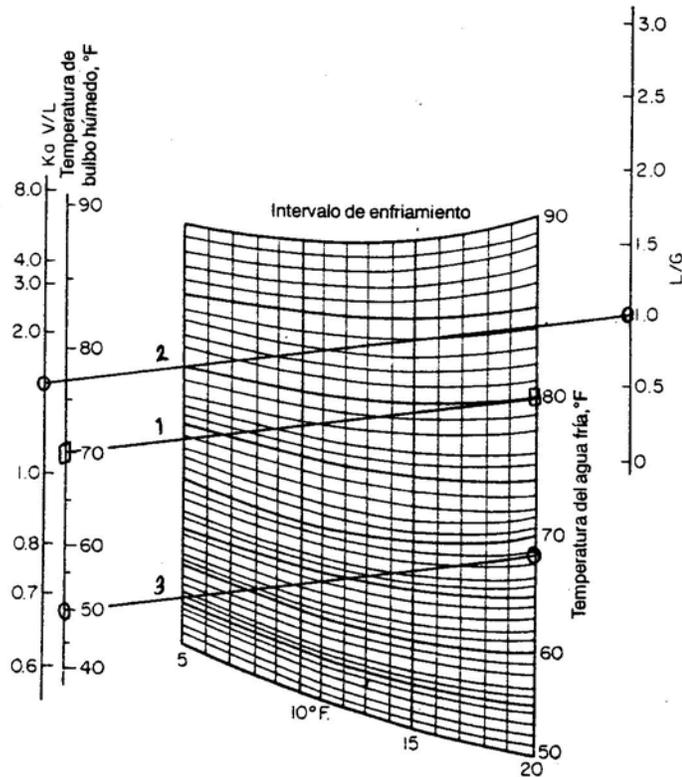


Fig. 4-21. Nomograma de las características de una torre de enfriamiento

Fuente: Perry, J. H., y C. H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5a. Ed., Mc Graw Hill, Nueva York, 1973 tabla 3-3.

Si se cambia la temperatura de bulbo húmedo hasta 50°F pero L/G y KyaV/L permanecen iguales una línea paralela a la original dará una temperatura del agua fría de 68°F (20°C)

Ejemplo 28

Una torre de enfriamiento con empaque de madera enfría 200 000 litros por hora desde 40°C hasta 32°C usando aire a contracorriente que entra a 43°C con 20% de saturación. El aire sale a 35.5°C y con una temperatura de bulbo húmedo de 34.5°C . El superintendente de la fábrica desea enfriar el agua tanto como sea posible, para lograr esto decide aumentar el flujo de aire para que maneje 1.5 veces el aire que antes manejaba. ¿Cuál es la nueva temperatura final del agua si la presión de trabajo es de una atmósfera?

1. Traducción.

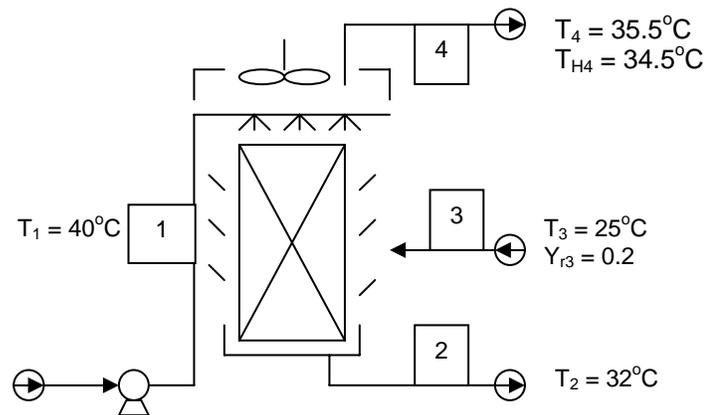


Fig. 4-22. Diagrama de flujo para enfriar agua

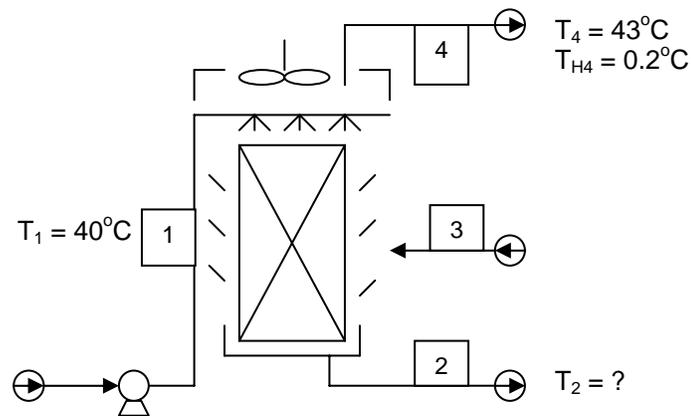


Fig. 4-23. Diagrama de flujo para enfriar agua

2. Planteamiento

2.1 Comparación de las torres.

$$Z_1 = \frac{L}{AKya} NUT \quad Z_2 = \frac{L}{AKya} NUT$$

pero $Z_1 = Z_2$

$$\frac{L}{AKya_1} NUT_1 = \frac{L}{AKya_2} NUT_2$$

$$\frac{NUT_1}{NUT_2} = \frac{Kya_1}{Kya_2}$$

Ahora bien en las correlaciones de transferencia de masa

$$Sh \propto Re^{0.8} Sc^{0.33}$$

A tratarse del mismo sistema

$$Sh \propto Re^{0.8}$$

$$\frac{Kya D}{D_{AB}} \propto \left(\frac{DG}{\mu} \right)^{0.8}$$

Por lo tanto si se trata del mismo sistema y mismo equipo:

$$\frac{Kya_1}{Kya_2} = \left(\frac{G_1}{G_2} \right)^{0.8}$$

$$\frac{Kya_1}{Kya_2} = \left(\frac{G_1}{G_2} \right)^{0.8} = \left(\frac{1}{1.5} \right)^{0.8} = 0.72298$$

$$\frac{NUT_1}{NUT_2} = \frac{Kya_1}{Kya_2} = 0.72298$$

3. Cálculos

3.1 propiedades del aire de entrada

De la carta psicrométrica

$$Y = 0.01 \text{ kg de agua/kg aire seco}$$

$$C_{H3} = 0.24 + 0.46(0.01) = 0.2446$$

$$H_3 = 0.2446(43) + 597(0.01) = 16.4878 \text{ kcal/kg aire seco}$$

3.2 Propiedades del aire de salida

$$Y = 0.035 \text{ kg de agua/kg aire seco}$$

$$C_{H4} = 0.24 + 0.46(0.035) = 0.2561$$

$$H_4 = 0.2561 (35.5) + 597(0.035) = 29.98 \text{ kcal/kg aire seco}$$

3.3 Pendiente de la línea de operación para el primer caso

$$\frac{L}{G} = \frac{H_4 - H_3}{T_1 - T_2} = \frac{29.98 - 16.48}{40 - 32} = 1.688$$

3.4 Resolución mediante la gráfica

El rango inicial es de $40 - 32 = 8^\circ\text{C} = 15^\circ\text{F}$

La temperatura de bulbo húmedo entrante es de $22^\circ\text{C} = 72^\circ\text{F}$

La temperatura del agua fría es $32^\circ\text{C} = 90^\circ\text{F}$

Uniendo bulbo húmedo con el punto de rango y agua fría se obtiene la línea 1

Se traza una línea paralela a 1 de manera que pase por el L/G de 1.688 lo que da la línea 2 y un K_{ya}/L de 0.93

El nuevo K_{ya} debe ser de:

$$K_{ya_2} = K_{ya_1}/0.72298 = 0.93/0.72298 = 1.2863$$

El nuevo L/G será de

$$\frac{L}{G} = \frac{1.688}{1.5} = 1.125$$

Con el nuevo K_{ya}/L y el nuevo L/G se traza la línea 3

La línea que da las condiciones del agua finales será una paralela a esa línea que pasa por 72°F (la temperatura de bulbo húmedo de la entrada que no cambia). Línea 4.

La temperatura del agua entrante es de 105°C

Sobre la línea 4 hay varias posibilidades.

Si escogemos por ejemplo 87°F de agua fría y 20°F de rango esto nos dará 107 de entrada lo cual no es posible si escogemos 86 y 15 nos dará 101.

La solución está en 86.7 y 18 lo que nos da 104.7

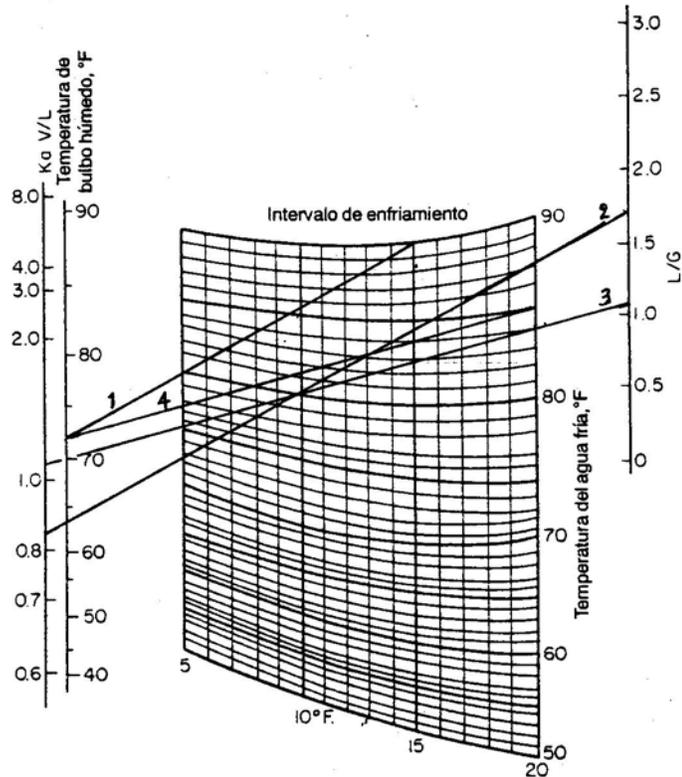


Fig. 4-24. Nomograma de las características de una torre de enfriamiento

Fuente: Perry, J. H., y C. H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5a. Ed., Mc Graw Hill, Nueva York, 1973 tabla 3-3.

4. Respuesta.

La temperatura nueva del agua será de alrededor de 87°C

APENDICES

APENDICE 1

Constantes de Antoine

$\text{Log } P^{\circ} = A - \frac{B}{t + C}$			
	A	B	C
	P = mm de Hg		t = °C
Acido acético	7.80307	1651.2	225
Metano	6.61184	399	266
Acetaldehido	6.81089	992.0	230
Etano	6.80266	656.4	250
Amoniaco	7.55466	1002.711	247.885
Propano	6.82973	813.2	248
Tetracloruro de carbono	6.9339	1242.43	230
Butano	6.83029	945.9	240
Clorobenceno	7.1069	1500	224
Pentano	6.85221	1064.63	232
Cloroformo	6.90328	1163.03	227.4
Hexano	6.87776	1171.53	224.366
Ciclohexano	6.84498	1203.526	222.864
Heptano	6.90246	1268.115	216.9
Acetato de etilo	7.09808	1238.71	217.0
Benceno	7.429	1628.32	279.56
Metil etilcetona	6.97421	1209.6	216
Tolueno	6.953	1343.94	219.38
Estireno	6.92409	1420	206
Etil ciclohexano	6.80266	656.4	256
Disulfuro de carbono	6.85145	1122.5	236.46
Acetona	7.02447	1161	224
Dióxido de azufre	7.32776	1022.8	240
Alcohol etílico	8.04494	1554.3	222.65
Alcohol metílico	7.87863	1473.11	230
Agua	8.10765	1750.286	235 de 0° a 60 °C
Agua	7.96681	1668.21	228 de 60 a 150 °C

Fuente: Hougen, Watson y Ragatz, Chemical Process Principles, John Wiley & Sons, Nueva York, 1954

APENDICE 2

Tabla presión de vapor del agua

pv (mm Hg) versus T(°C)
Ejemplo: La presión de vapor del agua a 4.3°C es de 6.230 mm Hg

	T(°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
↓ Hielo	-14	1.361	1.348	1.336	1.324	1.312	1.300	1.288	1.276	1.264	1.253
	-13	1.490	1.477	1.464	1.450	1.437	1.424	1.411	1.399	1.386	1.373
	-12	1.632	1.617	1.602	1.588	1.574	1.559	1.546	1.532	1.518	1.504
	-11	1.785	1.769	1.753	1.737	1.722	1.707	1.691	1.676	1.661	1.646
	-10	1.950	1.934	1.916	1.899	1.883	1.866	1.849	1.833	1.817	1.800
	-9	2.131	2.112	2.093	2.075	2.057	2.039	2.021	2.003	1.985	1.968
	-8	2.326	2.306	2.285	2.266	2.246	2.226	2.207	2.187	2.168	2.149
	-7	2.537	2.515	2.493	2.472	2.450	2.429	2.408	2.387	2.367	2.346
	-6	2.765	2.742	2.718	2.695	2.672	2.649	2.626	2.603	2.581	2.559
	-5	3.013	2.987	2.962	2.937	2.912	2.887	2.862	2.838	2.813	2.790
	-4	3.280	3.252	3.225	3.198	3.171	3.144	3.117	3.091	3.065	3.039
	-3	3.568	3.539	3.509	3.480	3.451	3.422	3.393	3.364	3.336	3.308
	-2	3.880	3.848	3.816	3.785	3.753	3.722	3.691	3.660	3.630	3.599
	-1	4.217	4.182	4.147	4.113	4.079	4.045	4.012	3.979	3.946	3.913
	0	4.579	4.542	4.504	4.467	4.431	4.395	4.359	4.323	4.287	4.252
↓ Agua líquida	0	4.579	4.613	4.647	4.681	4.715	4.750	4.785	4.820	4.855	4.890
	1	4.926	4.962	4.998	5.034	5.070	5.107	5.144	5.181	5.219	5.256
	2	5.294	5.332	5.370	5.408	5.447	5.486	5.525	5.565	5.605	5.645
	3	5.685	5.725	5.766	5.807	5.848	5.889	5.931	5.973	6.015	6.058
	4	6.101	6.144	6.187	6.230	6.274	6.318	6.363	6.408	6.453	6.498
	5	6.543	6.589	6.635	6.681	6.728	6.775	6.822	6.869	6.917	6.965
	6	7.013	7.062	7.111	7.160	7.209	7.259	7.309	7.360	7.411	7.462
	7	7.513	7.565	7.617	7.669	7.722	7.775	7.828	7.882	7.936	7.990
	8	8.045	8.100	8.155	8.211	8.267	8.323	8.380	8.437	8.494	8.551
	9	8.609	8.668	8.727	8.786	8.845	8.905	8.965	9.025	9.086	9.147
	10	9.209	9.271	9.333	9.395	9.458	9.521	9.585	9.649	9.714	9.779
	11	9.844	9.910	9.976	10.042	10.109	10.176	10.244	10.312	10.380	10.449
	12	10.518	10.588	10.658	10.728	10.799	10.870	10.941	11.013	11.085	11.158
	13	11.231	11.305	11.379	11.453	11.528	11.604	11.680	11.756	11.833	11.910
	14	11.987	12.065	12.144	12.223	12.302	12.382	12.462	12.543	12.624	12.706
	15	12.788	12.870	12.953	13.037	13.121	13.205	13.290	13.375	13.461	13.547
	16	13.634	13.721	13.809	13.898	13.987	14.076	14.166	14.256	14.347	14.438
	17	14.530	14.622	14.715	14.809	14.903	14.997	15.092	15.188	15.284	15.380
	18	15.477	15.575	15.673	15.772	15.871	15.971	16.071	16.171	16.272	16.374
	19	16.477	16.581	16.685	16.789	16.894	16.999	17.105	17.212	17.319	17.427
	20	17.535	17.644	17.753	17.863	17.974	18.085	18.197	18.309	18.422	18.536
	21	18.650	18.765	18.880	18.996	19.113	19.231	19.349	19.468	19.587	19.707
	22	19.827	19.948	20.070	20.193	20.316	20.440	20.565	20.690	20.815	20.941
	23	21.068	21.196	21.324	21.453	21.583	21.714	21.845	21.977	22.110	22.243
	24	22.377	22.512	22.648	22.785	22.922	23.060	23.198	23.337	23.476	23.616

Fuente: Perry, J. H., y C. H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5a. Ed., Mc Graw Hill, Nueva York, 1973 tabla 3-3.

APENDICE 2 (continuación)

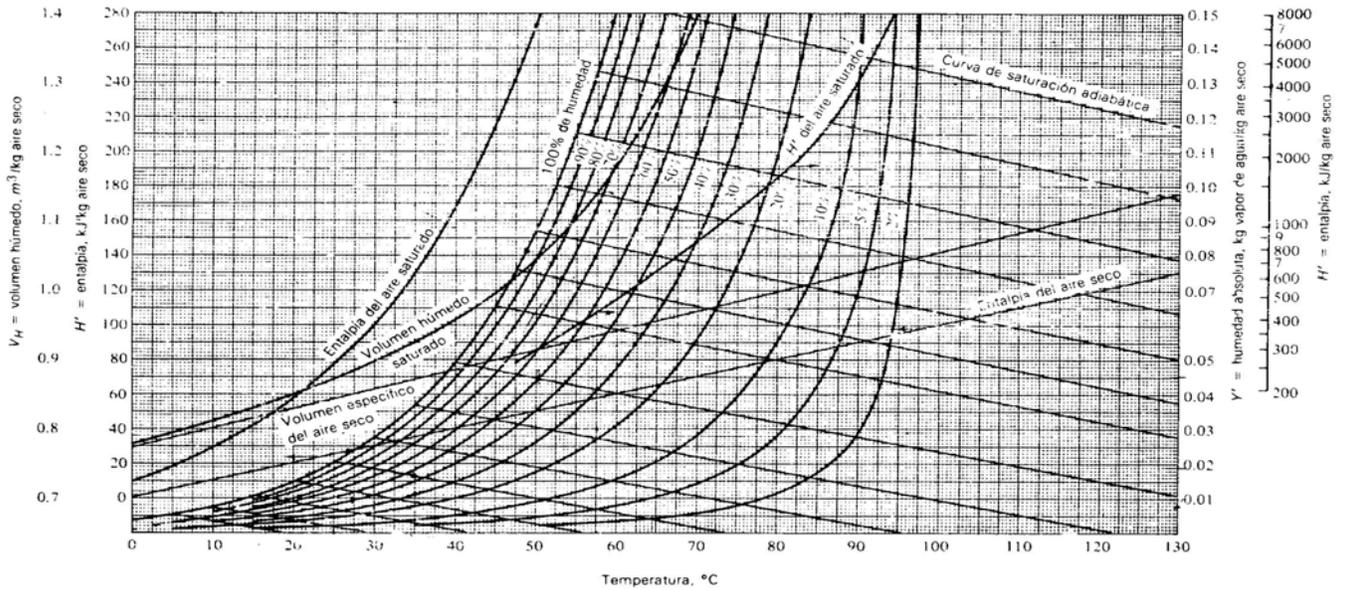
Tabla presión de vapor del agua

T(°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
25	23.756	23.897	24.039	24.182	24.326	24.471	24.617	24.764	24.912	25.060
26	25.209	25.359	25.509	25.660	25.812	25.964	26.117	26.271	26.426	26.582
27	26.739	26.897	27.055	27.214	27.374	27.535	27.696	27.858	28.021	28.185
28	28.349	28.514	28.680	28.847	29.015	29.184	29.354	29.525	29.697	29.870
29	30.043	30.217	30.392	30.568	30.745	30.923	31.102	31.281	31.461	31.642
30	31.824	32.007	32.191	32.376	32.561	32.747	32.934	33.122	33.312	33.503
31	33.695	33.888	34.082	34.276	34.471	34.667	34.864	35.062	35.261	35.462
32	35.663	35.865	36.068	36.272	36.477	36.683	36.891	37.099	37.308	37.518
33	37.729	37.942	38.155	38.369	38.584	38.801	38.018	39.237	39.457	39.677
34	39.898	40.121	40.344	40.569	40.796	41.023	41.251	41.480	41.710	41.942
35	42.175	42.409	42.644	42.880	43.117	43.355	43.595	43.836	44.078	44.320
36	44.563	44.808	45.054	45.301	45.549	45.799	46.050	46.302	46.556	46.811
37	47.067	47.324	47.582	47.841	48.102	48.364	48.627	48.891	49.157	49.424
38	49.692	49.961	50.231	50.502	50.774	51.048	51.323	51.600	51.879	52.160
39	52.442	52.725	53.009	53.294	53.580	53.867	54.156	54.446	54.737	55.030
40	55.324	55.61	55.91	56.21	56.51	56.81	57.11	57.41	57.72	58.03
41	58.34	58.65	58.96	59.27	59.58	59.90	60.22	60.54	60.86	61.18
42	61.50	61.82	62.14	62.47	62.80	63.13	63.46	63.79	64.12	64.46
43	64.80	65.14	65.48	65.82	66.16	66.51	66.86	67.21	67.56	67.91
44	68.26	68.61	68.97	69.33	69.69	70.05	70.41	70.77	71.14	71.51
45	71.88	72.25	72.62	72.99	73.36	73.74	74.12	74.50	74.88	75.26
46	75.65	76.04	76.43	76.82	77.21	77.60	78.00	78.40	78.80	79.20
47	79.60	80.00	80.41	80.82	81.23	81.64	82.05	82.46	82.87	83.29
48	83.71	84.13	84.56	84.99	85.42	85.85	86.28	86.71	87.14	87.58
49	88.02	88.46	88.90	89.34	89.79	90.24	90.69	91.14	91.59	92.05
T(°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	92.51	97.20	102.09	107.20	112.51	118.04	123.80	129.82	136.08	142.60
60	149.38	156.43	163.77	171.38	179.31	187.54	196.09	204.96	214.17	223.73
70	233.7	243.9	254.6	265.7	277.2	289.1	301.4	314.1	327.3	341.0
80	355.1	369.7	384.9	400.6	416.8	433.6	450.9	468.7	487.1	506.1
90	525.76	527.76	529.77	531.78	533.80	535.82	537.86	539.90	541.95	544.00
91	546.05	548.11	550.18	552.26	554.35	556.44	558.53	560.64	562.75	564.87
92	566.99	569.12	571.26	573.40	575.55	577.71	579.87	582.04	584.22	586.41
93	588.60	590.80	593.00	595.21	597.43	599.66	601.89	604.13	606.38	608.64
94	610.90	613.17	615.44	617.72	620.01	622.31	624.61	626.92	629.24	631.57
95	633.90	636.24	638.59	640.94	643.30	645.67	648.05	650.43	652.82	655.22
96	657.62	660.03	662.45	664.88	667.31	669.75	672.20	674.66	677.12	679.69
97	682.07	684.55	687.04	689.54	692.05	694.57	697.10	699.63	702.17	704.71
98	707.27	709.83	712.40	714.98	717.56	720.15	722.75	725.36	727.98	730.61
99	733.24	735.88	738.53	741.18	743.85	746.52	749.20	751.89	754.58	757.29
100	760.00	762.72	765.45	768.19	770.93	773.68	776.44	779.22	782.00	784.78
101	787.57	790.37	793.18	796.00	798.82	801.66	804.50	807.35	810.21	813.08

Fuente: Perry, J. H., y C. H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5a. Ed., Mc Graw Hill, Nueva York, 1973 tabla 3-3.

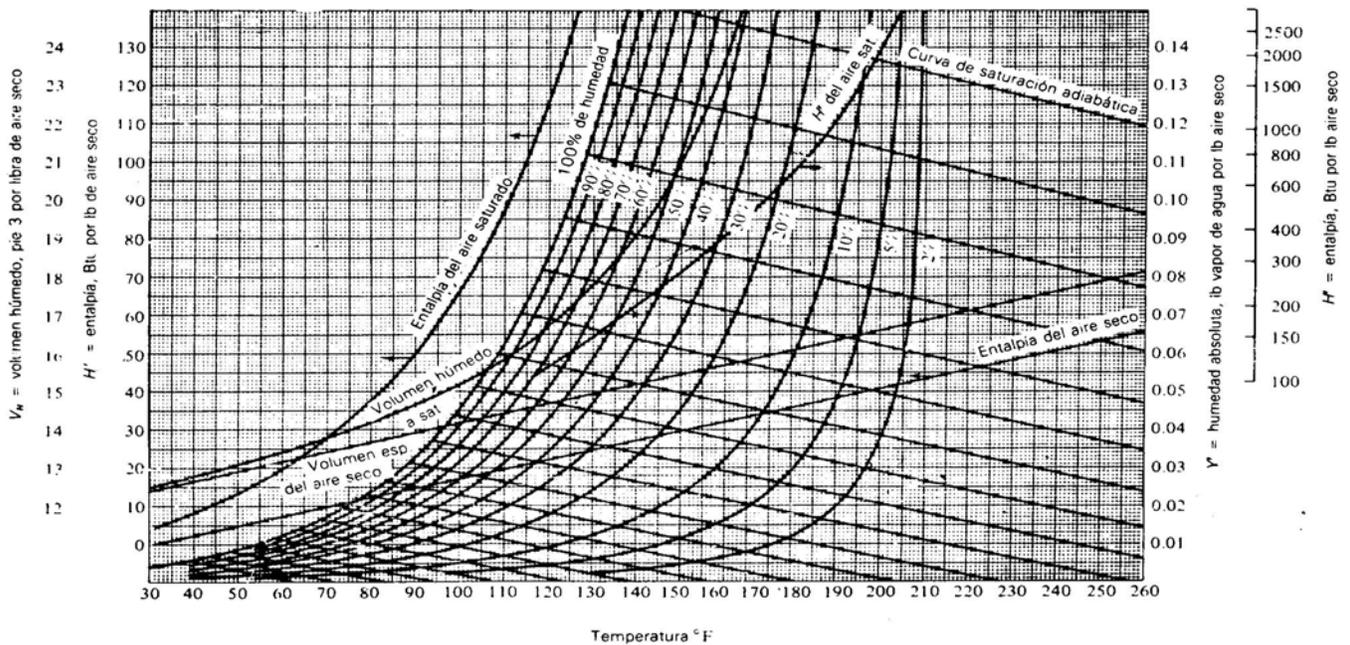
APENDICE 3

Carta psicrométrica A



Carta psicrométrica para el aire – vapor de agua, 1 atm. std. abs., en unidades S.I.

Carta psicrométrica B

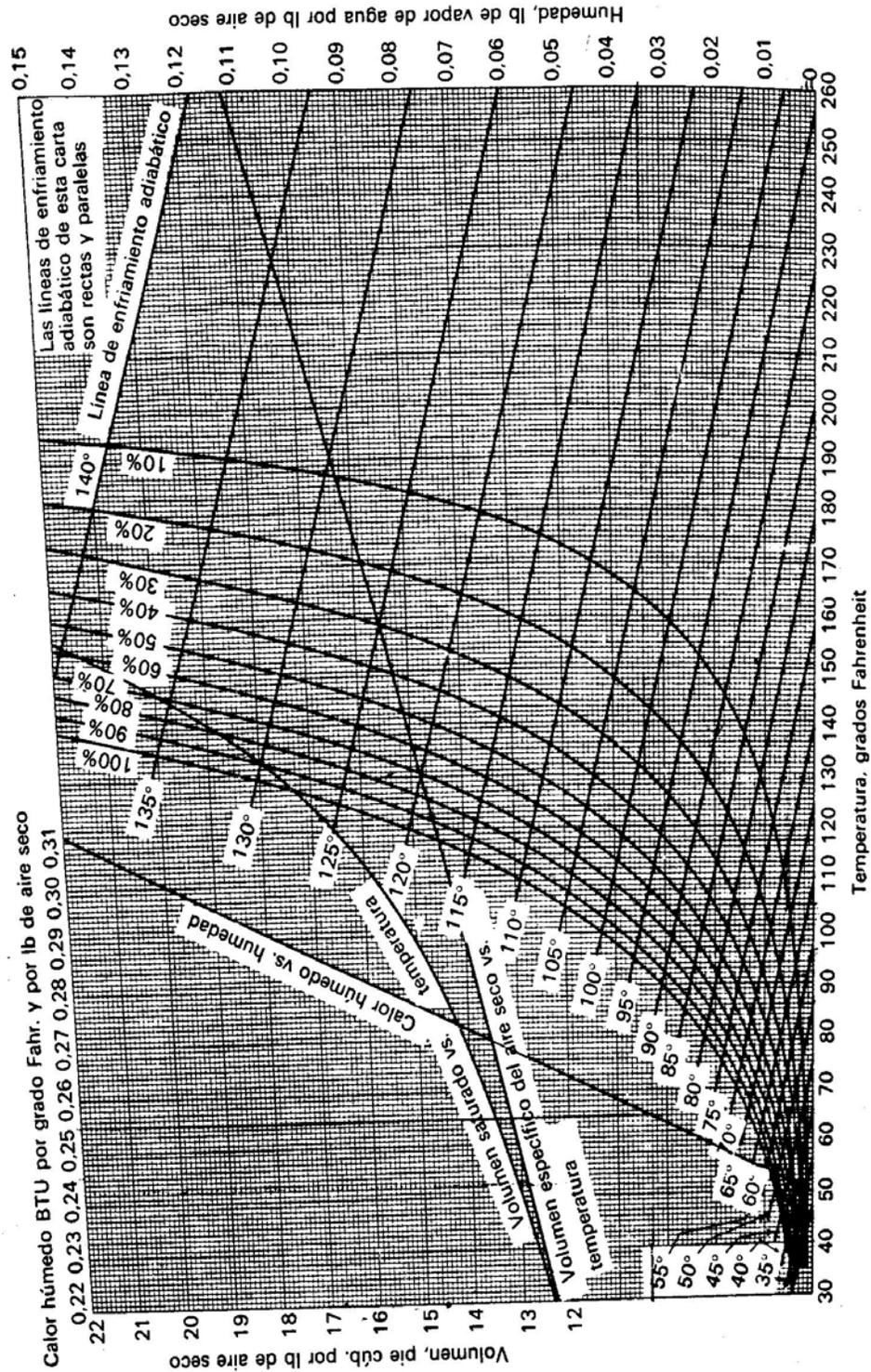


Carta psicrométrica para el aire – vapor de agua, 1 atm. std. abs., en unidades inglesas de ingeniería

Fuente: Treybal R.E., Operaciones de transferencia de masa; Mc Graw-Hill book Co.; México 1978.

APENDICE 3 (continuación)

Carta psicrométrica C

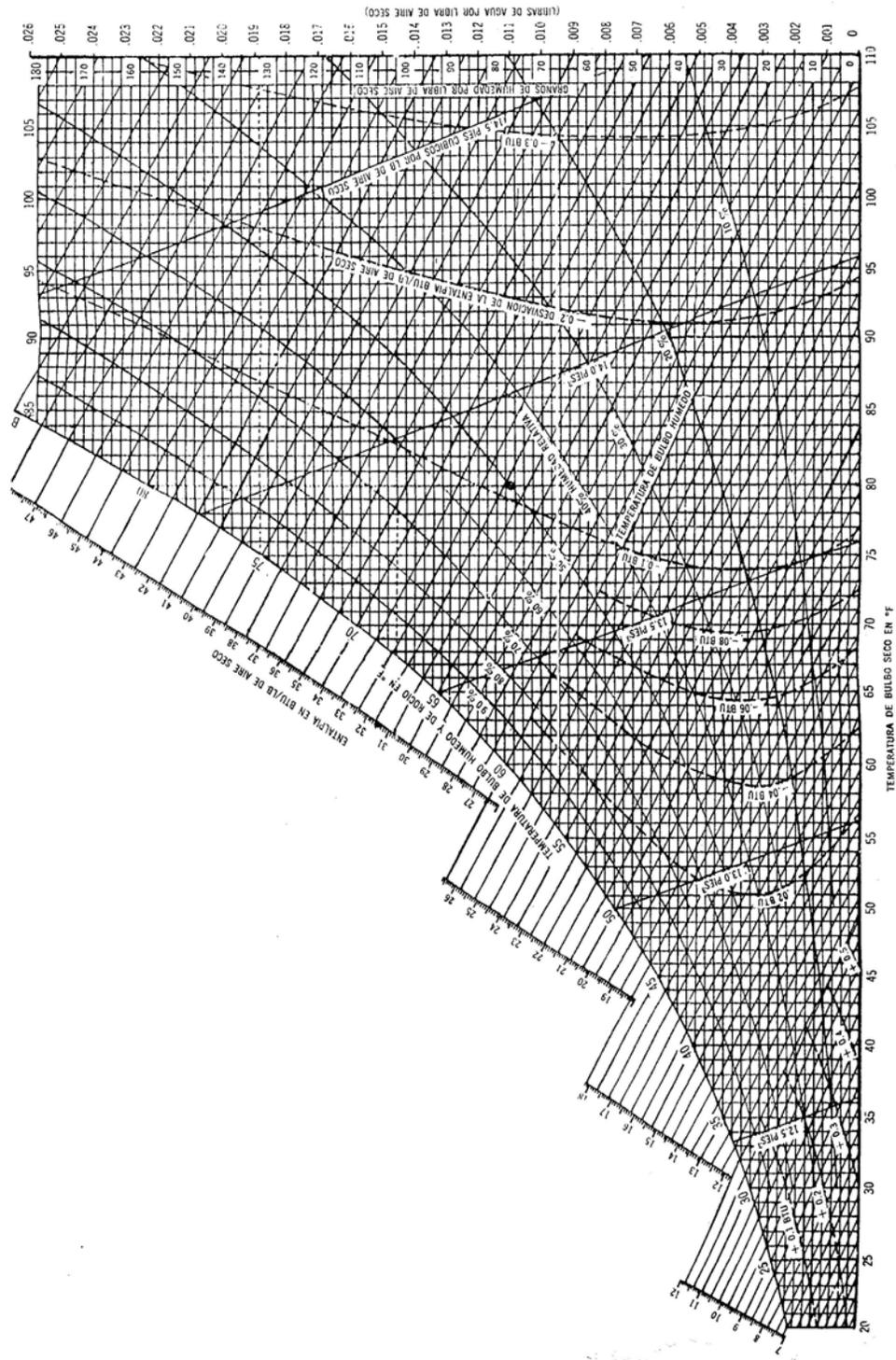


Carta psicrométrica para el aire – vapor de agua, 1 atm. std. abs., en unidades inglesas de ingeniería

Fuente: Mc Cabe W.L., J.C.Smith, Operaciones básicas de ingeniería química; Editorial Reverte; España; 1981.

APENDICE 3 (continuación)

Carta psicrométrica D



Carta psicrométrica para el aire – vapor de agua, 1 atm. std. abs., en unidades inglesas de ingeniería

Fuente: Hernández G.E., Fundamentos de Aire acondicionado y refrigeración; Editorial Limusa; México; 1984.

APENDICE 4

Correlación para predecir la caída de presión en torres empacadas

$$\Delta P = \alpha \times 10^{\beta \frac{L}{A}} \frac{\left(\frac{G}{A}\right)^2}{\rho_G}$$

ΔP = caídas de presión en pulgadas de agua / pie de empaque

$$\frac{G}{A} = \text{masa velocidad del gas} \frac{\text{lb}}{\text{s ft}^2}$$

$$\rho_G = \text{densidad del gas} \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

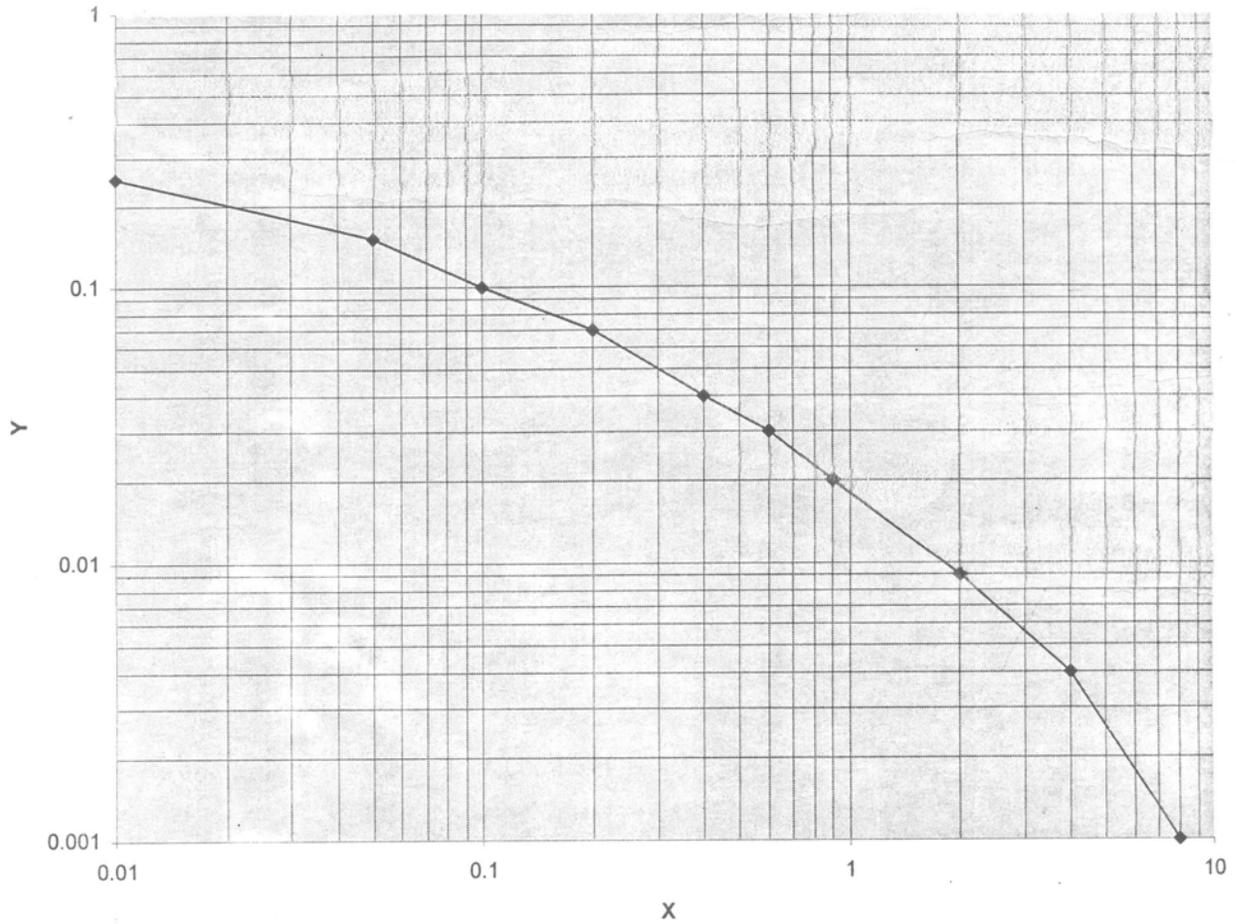
$$\frac{L}{A} = \text{masa velocidad del líquido} \frac{\text{lb}}{\text{s ft}^3}$$

α y β son las constantes que aparecen debajo

Empaque Tipo y tamaño	diámetro	α	β	L / A	Valida para lecho con porosidad
Anillos Raschig	3/8	4.7	0.41	0.2-1.2	57
	1/2	3.1	0.41	0.08-2.4	58.6
	5/8	2.35	0.26	0.3-1.8	67
	3/4	1.34	0.26	0.5-3	72
	1	0.97	0.25	0.1-7.5	69.2
	1.25	0.57	0.23	0.2-3	75.6
	1.5	0.39	0.23	0.2-4	75.9
Al azar	2	0.24	0.17	0.2-5.5	81.6
Ordenados	2	0.06	0.12	0.2-9	80
Anillos en espiral (al azar)	3	0.18	0.15	0.2-5	70.5
	(ordenados)	3	0.15	0.15	0.2-6.5
Sillas Berl	1/2	1.2	0.21	0.08-6	63.2
	3/4	0.62	0.17	0.1-4	71
	1	0.39	0.17	0.2-8	70.9
	1.5	0.21	0.13	0.2-6	70
Sillas Intalox	1/2	0.82	0.2	0.15-4	77
	3/4	0.48	0.16	0.1-4	75
	1	0.31	0.16	0.7-4	74
	1.5	0.14	0.14	0.2-8	78

APENDICE 5

Gráfica de Lobo para el cálculo de la inundación en torres empacadas con empaques al azar



$$X = \frac{\frac{L}{A}}{\frac{G}{A}} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$$

$$Y = \frac{\left(\frac{G}{A} \right)^2 \left(\frac{a p}{\varepsilon^3} \right) \mu_L^{0.2}}{g \rho_G \rho_L}$$

L/A = velocidad másica del líquido en kg/h m^2
 G/A = velocidad másica del gas en kg/h m^2
 ρ_G, ρ_L = densidad del gas y del líquido en kg/m^3
 μ_L = viscosidad del líquido en centipoises
 G = aceleración de la gravedad $1.27 \times 10^8 \text{ m/h}^2$
 ap = superficie específica del empaque en m^2/m^3
 ε = volumen de hueco del empaque

APENDICE 6

Características de los empaques aleatorios

Tamaño nominal en mm	6	9.5	13	16	19	25	32	38	50	76
Anillos	R A S C H I N G									
	C E R A M I C A									
Espesor de la pared en mm	0.8	1.6	2.4	2.4	2.4	3	4.8	4.8	6	9.5
C _f	1600	1000	580	380	225	155	125	95	65	37
C _D			909	749	457	301		181.8	135.6	
ε	0.73	0.68	0.63	0.68	0.73	0.73	0.74	0.71	0.74	0.78
a _p m ² /m ³	787	508	364	328	262	190	148	125	92	62
	M E T A L									
0.8 mm de pared										
C _f	700	390	300	170	155	115				
ε	0.69		0.84		0.88	0.92				
a _p m ² /m ³	774		420		274	206				
1.6 mm de pared										
C _f			410	290	220	137	110	83	57	32
C _D			688	431	485	304		173	133	
ε			0.73		0.78	0.85	0.87	0.9	0.92	0.95
a _p m ² /m ³			387		236	186	162	135	103	68
	A N I L L O S P A L L									
	P L A S T I C O									
C _f				97		52		40	25	
C _D				207		102		62	47.5	
ε				0.87		0.9		0.91	0.92	
a _p m ² /m ³				341		206		128	102	
	M E T A L									
C _f				70		48		28	20	
C _D				133		95.5		57	36.5	
ε				0.93		0.94		0.95	0.96	
a _p m ² /m ³				341		206		128	102	

Fuente: Treybal – Operaciones de transferencia de masa, Mc Graw Hill, 1980

C_f factor de empaque, C_D, a_p área específica , ε volumen de hueco

APENDICE 6 (continuación)

Características de los empaques aleatorios

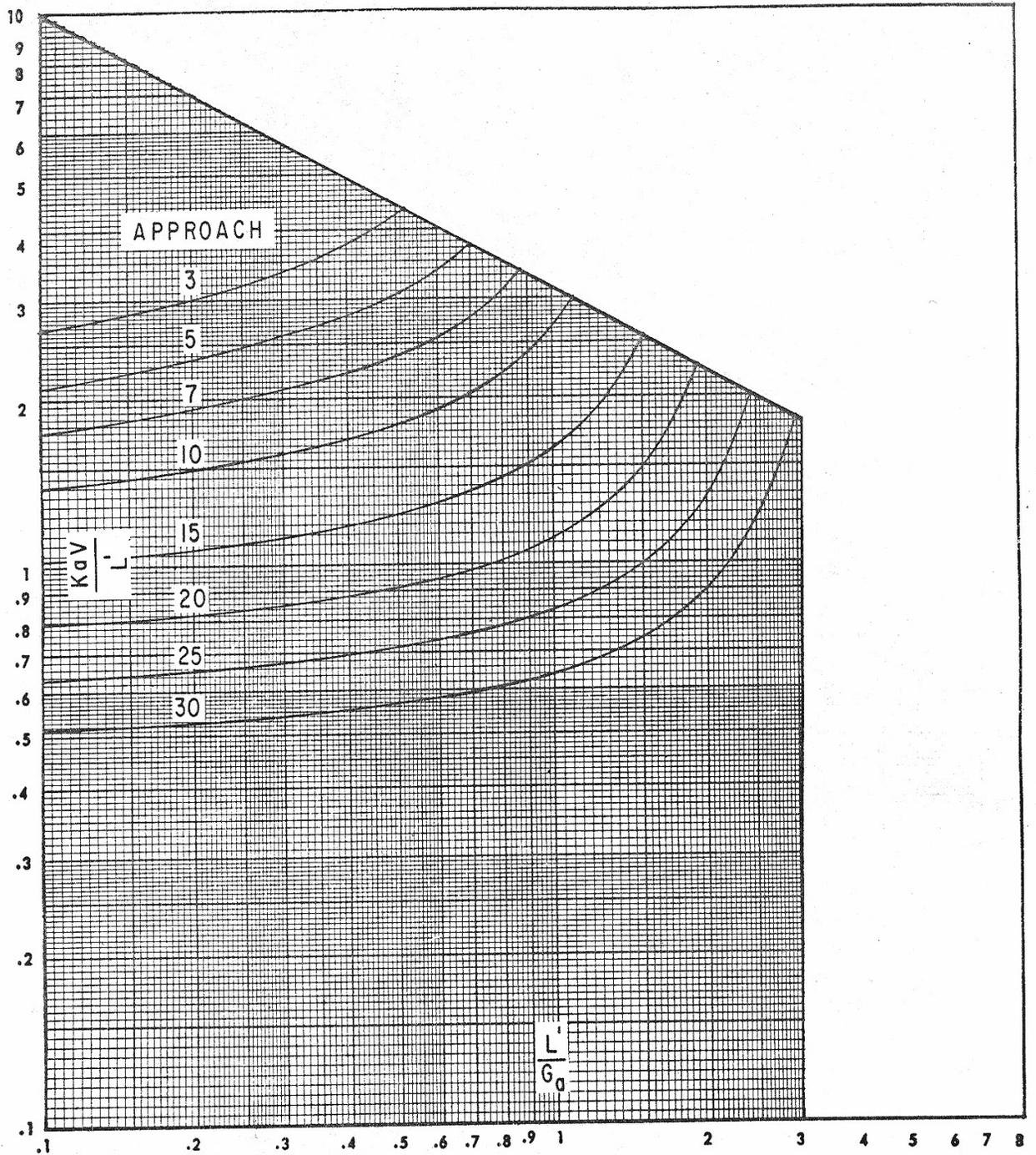
Tamaño nominal en mm	6	9.5	13	16	19	25	32	38	50	76
	F L E X I R I N G S									
Cf				78		45		28	22	
ϵ				0.92		0.94		0.96	0.96	
$a_p \text{ m}^2/\text{m}^3$				345		213		131	115	
	H Y - P A K									
Cf						45			18	15
C_D						88			29	26.6
ϵ						0.96			0.97	0.97
	S I L L A S B E R L									
	C E R A M I C A									
Cf	900		240		170	110		65	45	
C_D			508		295	184				
ϵ	0.6		0.63		0.66	0.69		0.75	0.72	
$a_p \text{ m}^2/\text{m}^3$	899		466		269	249		144	105	
	S I L L A S I N T A L O X									
	C E R A M I C A									
Cf	725	330	200		145	98		52	40	22
C_D			399		256	241		96	71	41
ϵ	0.75		0.78		0.77	0.775		0.81	0.79	
$a_p \text{ m}^2/\text{m}^3$	984		6322	335	335	256	195	195	118	
	P L A S T I C O									
Cf						33			21	16
C_D						97			56.5	30
ϵ						0.91			0.93	0.94
$a_p \text{ m}^2/\text{m}^3$						207			108	89
	S U P E R I N T A L O X									
	C E R A M I C A									
Cf						60			30	
C_D						123			63.3	
ϵ						0.79			0.81	
$a_p \text{ m}^2/\text{m}^3$						253			105	
	P L A S T I C O									
Cf						33			21	16
C_D						80			53.3	30
ϵ						0.9			0.93	0.94
$a_p \text{ m}^2/\text{m}^3$						207			108	89
	T E L L E R T T E S									
	P L A S T I C O									
Cf						40			20	
ϵ						0.87			0.93	
$a_p \text{ m}^2/\text{m}^3$						180			112	

Fuente: Treybal – Operaciones de transferencia de masa, Mc Graw Hill, 1980

Cf factor de empaque, C_D , a_p área específica, ϵ volumen de hueco

APENDICE 7

Graficas de Pinchar-A

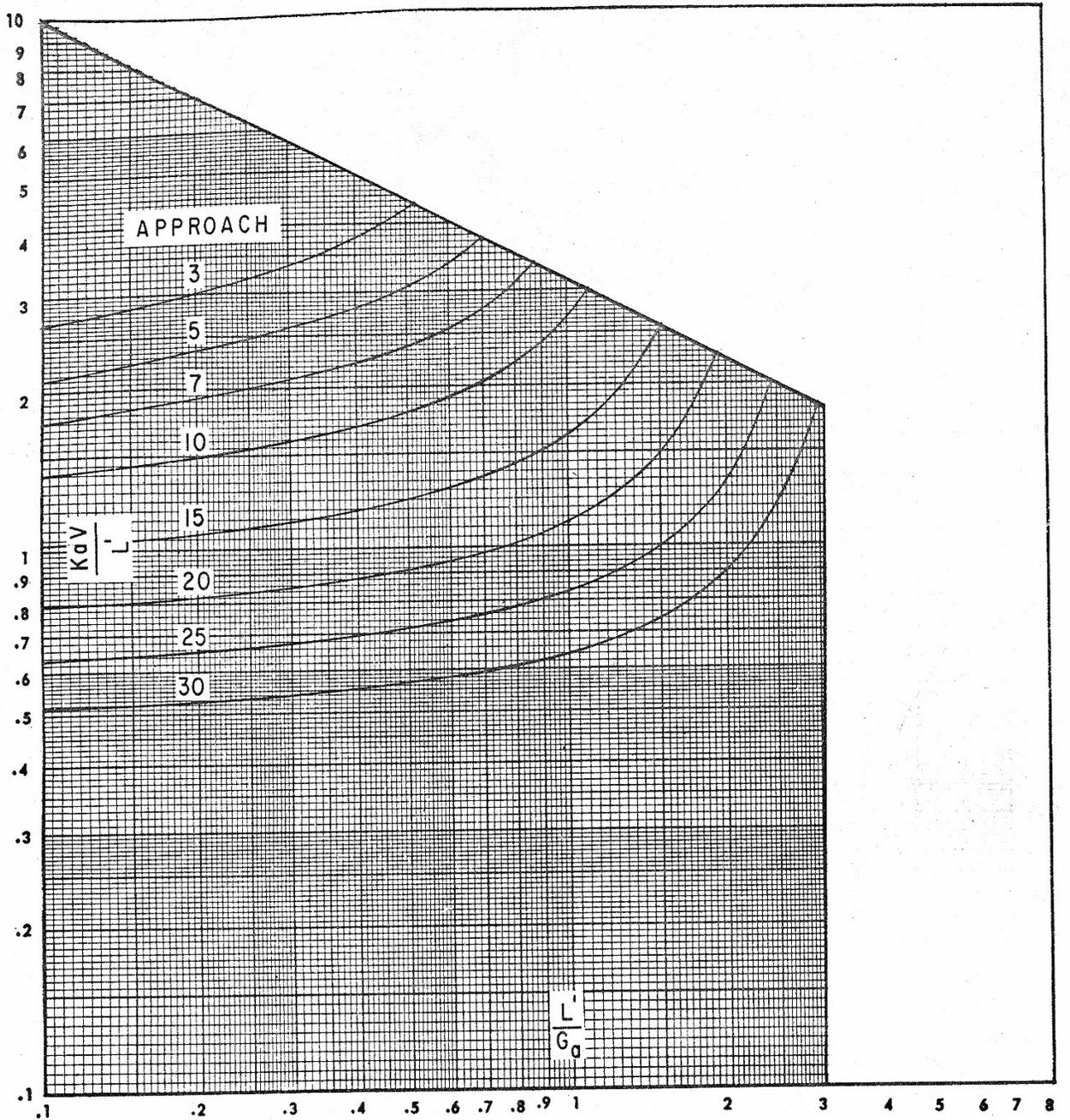


65°F bulbo húmedo ; 30° F rango

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A., 1997.

APENDICE 7 (continuación)

Graficas de Pinchar B

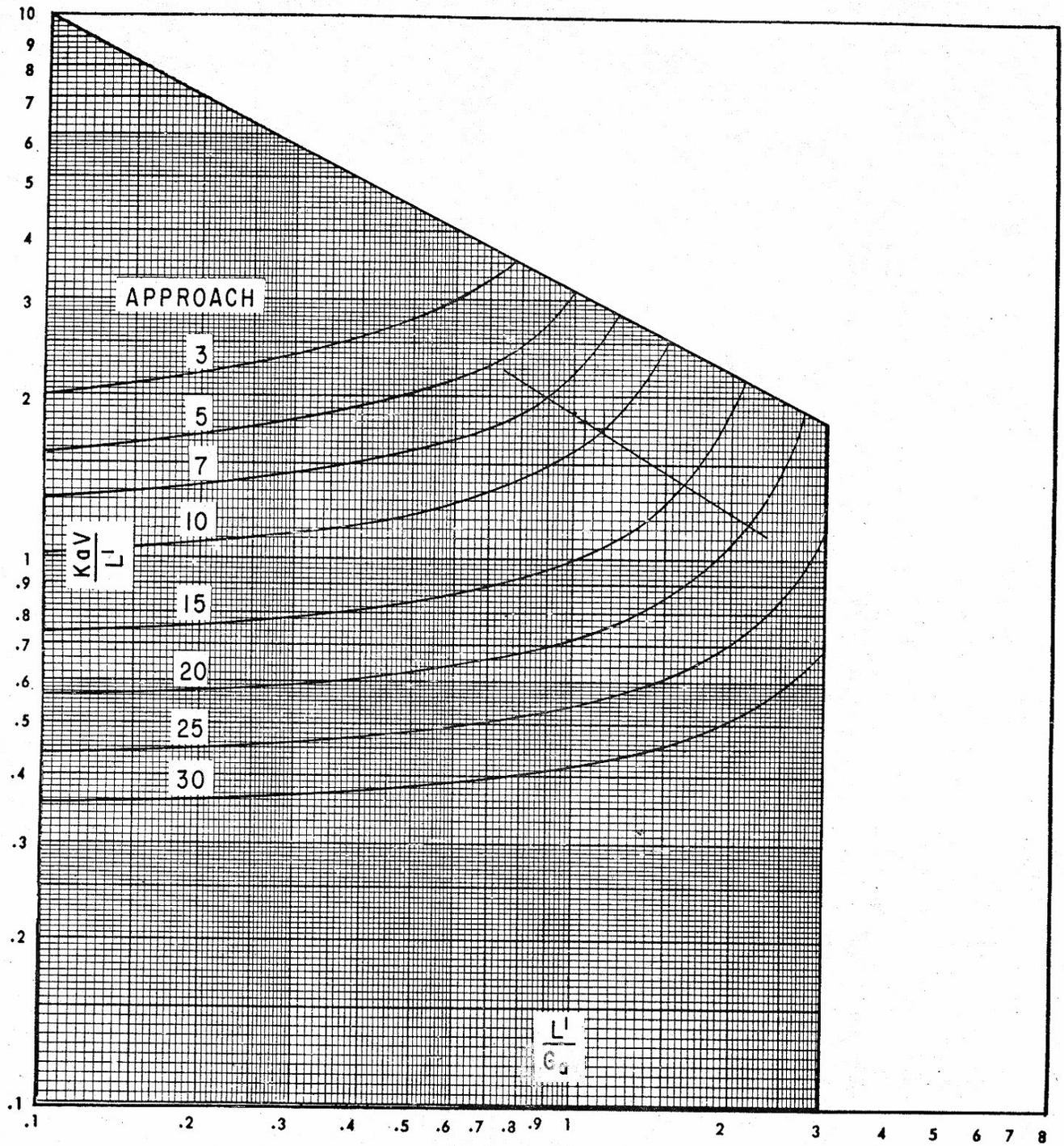


70°F bulbo húmedo ; 20° F rango

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A.,1997.

APENDICE 7 (continuación)

Graficas de Pinchar C

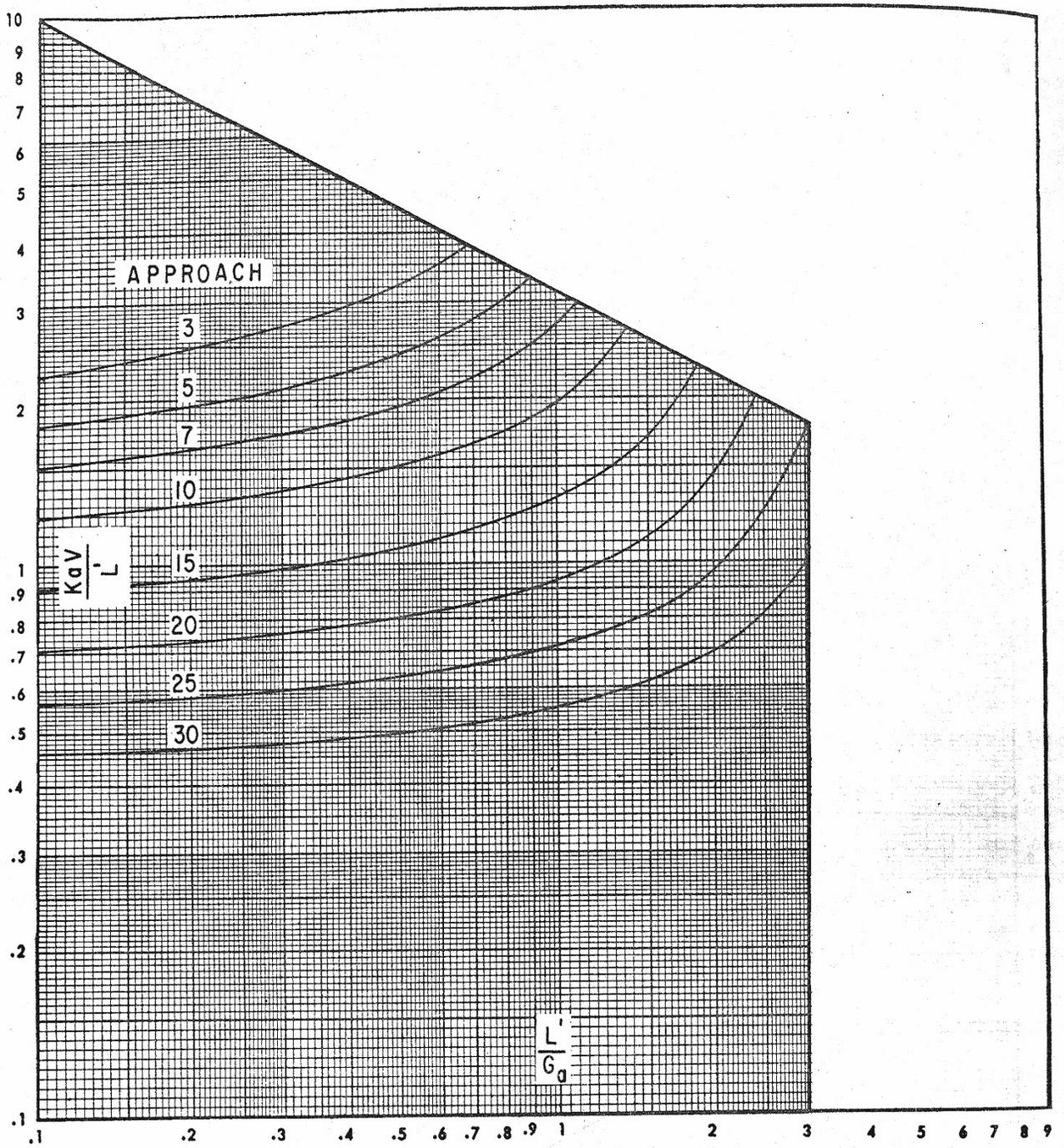


75°F bulbo húmedo ; 25° F rango

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A., 1997.

APENDICE 7 (continuación)

Graficas de Pinchar D

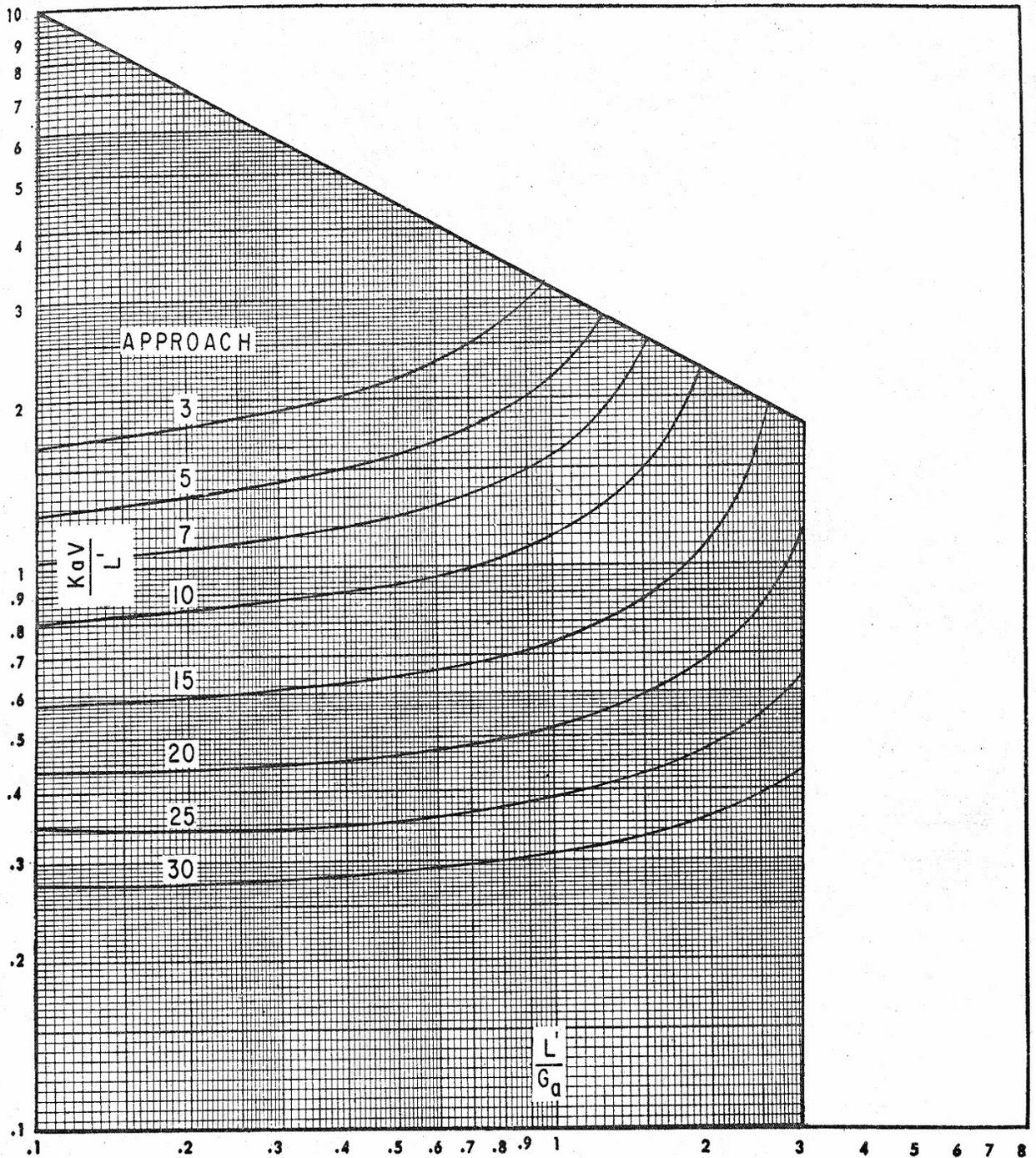


75°F bulbo húmedo ; 40° F rango

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A.,1997.

APENDICE 7 (continuación)

Graficas de Pinchar E

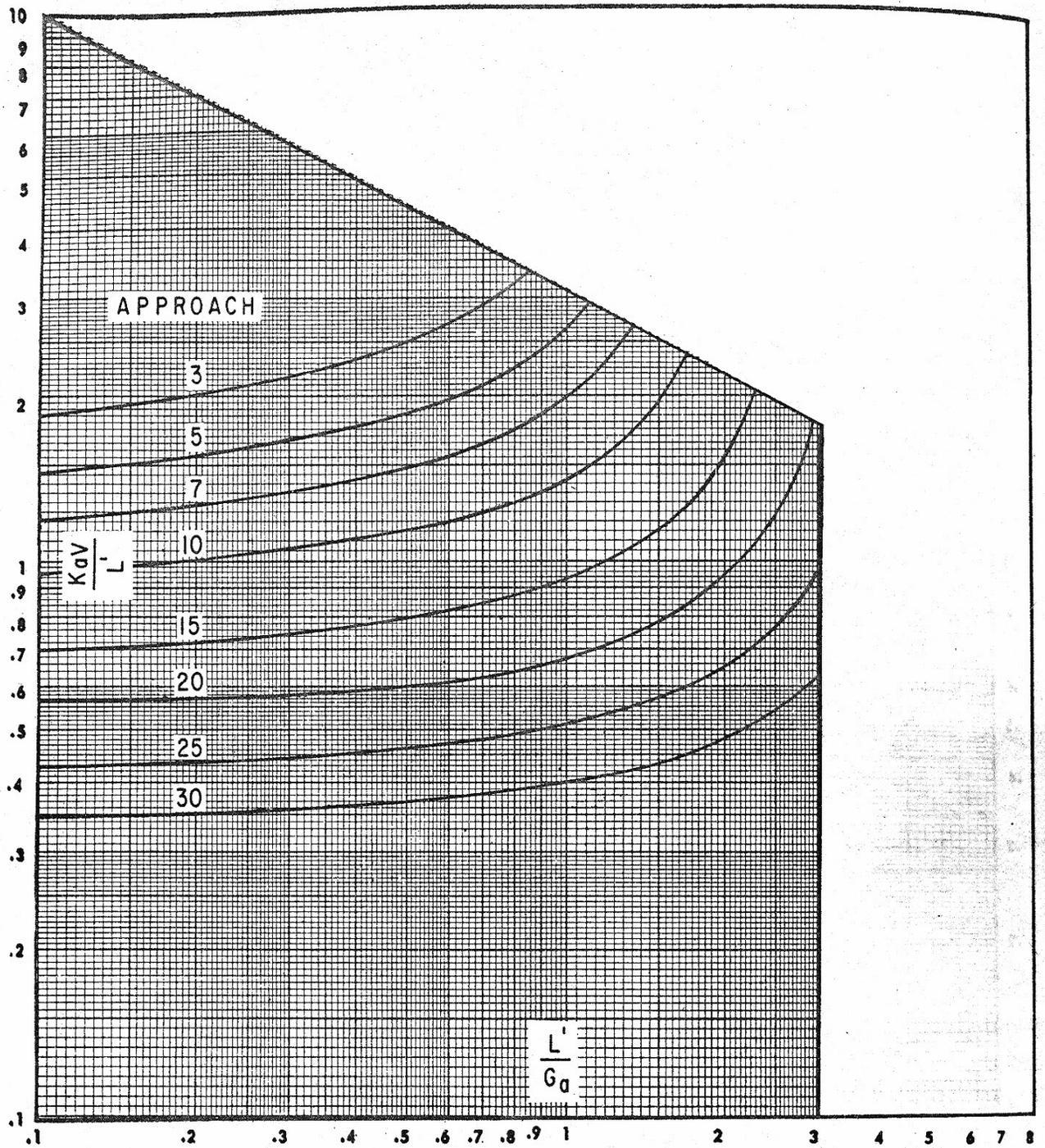


80°F bulbo húmedo ; 20° F rango

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A., 1997.

APENDICE 7 (continuación)

Graficas de Pinchar F

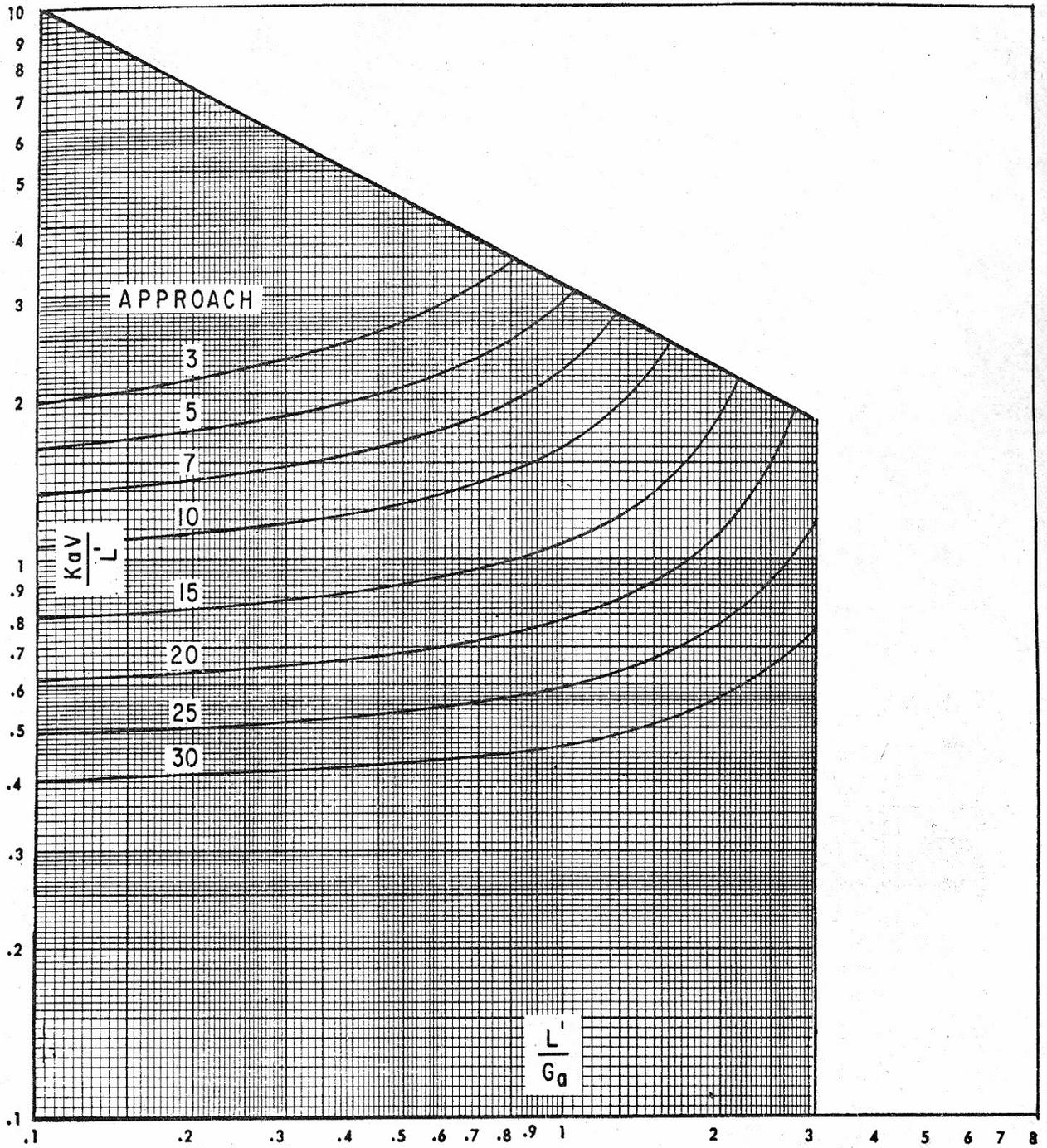


80°F bulbo húmedo ; 30° F rango

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A., 1997.

APENDICE 7 (continuación)

Graficas de Pinchar G



80°F bulbo húmedo ; 40° F rango

Fuente: Ludwig E.E., Applied process design for Chemical and Petrochemical plants, Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A., 1997.

LISTA DE SIMBOLOS

A	Area interfacial, m^2
C_a	Flujo volumétrico de aire, m^3/s
C_p	Capacidad calorífica, $kcal/kg\ ^\circ C$
C_H	Calor húmedo, $kcal/kg\ A. S.$
D_{AB}	Coefficiente de difusividad del componente A en B
G_s	Flujo másico del aire seco, $kg\ A.S./h$
G/A	Masa velocidad de aire, kg/m^2s
H	Entalpía del aire, $kcal/kg\ A.S.$
HOG	Altura de la unidad de transferencia del lado del gas
HUT	Altura de la unidad de transferencia
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección, $kcal/m^2s^\circ C$
h_{G_a}	Coefficiente volumétrico de transferencia de calor por convección del aire, $kcal/m^3h\ ^\circ C$
h_c/k_Y	Relación de Lewis (Pr/Sc)
k_Y	Coefficiente de transferencia de masa en la fase gaseosa, $M/L^2\theta(M/M)$
k_{y_a}	Coefficiente volumétrico de transferencia de masa en la fase gaseosa $M/L^3\theta(M/M)$, $kg/m^3h(kg/kg)$
K_{y_a}	Coefficiente global de transferencia de masa para la fase gaseosa $M/L^2\theta(M/M)$, $kg/m^2h(kg/kg)$
L	Flujo másico del líquido, kg/h
L/A	Masa velocidad de agua, kg/m^2s
M	Masa, kg
NOG	Número de unidades de transferencia de calor correspondiente a la fase Gaseosa
n	Número de moles
NUT	Número de unidades de transferencia
P	Presión, Pa
PM	Peso molecular
P_r	Número de Prandtl, $C_{p\mu}/k$, adimensional
Q	Carga térmica, J/s
Q_c	Calor de precalentamiento, $kcal/h$

Q_r	Calor de recalentamiento, kcal/h
R	Constante universal de los gases $0.082075 \text{ atm m}^3/\text{kg mol } ^\circ\text{K}$
S_c	Número de Schmidt, $\mu/\rho D_{AB}$, adimensional
T	Temperatura, K
V	Volumen, m^3
x	Coefficiente de una ecuación experimental para rociadores en cámaras de aspersión kg de agua/hm^2
x_i	Fracción mol del componente i en la fase líquida de un sistema
Y	Humedad absoluta del aire, $\text{kg H}_2\text{O/kg A.S.}$
\underline{Y}	Humedad molar, moles de agua/moles de aire
y_i	Fracción mol de un componente en la fase vapor del sistema
Z	Longitud o altura empacada, m
α, β	Constantes de una correlación para predecir la caída de presión en torres empacadas
Δ	Diferencia
η	Eficiencia
λ	Calor latente de vaporización
μ	Viscosidad
ρ	Densidad

Superíndices

- ° Propiedades de un sistema en el estado de saturación (ha alcanzado el equilibrio líquido-vapor)

Subíndices

- A Propiedades del agua
- B Propiedades del aire
- G Propiedades del gas
- Ga Propiedades en la fase gaseosa
- H Propiedades a la temperatura de bulbo húmedo
- I Interfase
- o Propiedades de un estado de referencia

La	Propiedades en la fase líquida
R	Propiedades a saturación relativa
r	Propiedades a la temperatura de rocío
s	Propiedades a la temperatura de saturación
T	Propiedades totales del sistema
V	Propiedades del vapor
1,2,3,etc.,	Indican el estado inicial y los subsecuentes

Otras señalizaciones

Las propiedades molares se señalan subrayando el símbolo que las presenta.

Tendrán una raya sobre ellos 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.

CONCLUSIONES

Es importante y necesario tener un material como instrumento de consulta durante la formación de un ingeniero químico y en el desarrollo de la práctica en el área de ingeniería de procesos para solucionar problemas que plantean los procesos en la industria.

Las operaciones de humidificación y deshumidificación son procesos de transferencia simultánea de masa y de calor donde participan solo dos componentes y dos fases. La fase líquida que con frecuencia es el agua, es un solo componente y la fase gaseosa consiste en un gas incondensable, generalmente el aire, en donde está presente algo de vapor de la fase líquida.

La humidificación es un proceso que se realiza para controlar la humedad del aire de un espacio determinado o para enfriar agua en un proceso que implique utilizarse en una vez más.

La humidificación se efectúa como un paso de los sistemas de acondicionamiento de aire o para aplicarse a un sistema de recuperación de disolventes donde el gas condensable no es agua sino un disolvente como el metanol, el benceno o la acetona.

Los aparatos o equipos que se utilizan para llevar a cabo estos procesos son las torres empacadas o columnas de lavado en donde el contacto es básicamente por etapas.

El enfriamiento de agua para procesos con mayor frecuencia se lleva a cabo en las torres de enfriamiento de convección natural o mecánica para grandes cargas de enfriamiento aunque también pueden realizarse en cámaras de aspersion para una capacidad pequeña.

BIBLIOGRAFIA

1. 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.; 1997.
2. Hernández G.E., *Fundamentos de Aire acondicionado y refrigeración*; Editorial Limusa; México; 1984.
3. Kern D.Q., *Procesos de transferencia de calor*; C.E.C.S.A.; México, D.F.; 1982.
4. Ludwig E.E., *Applied process design for Chemical and Petrochemical plants*; Gulf Publishing Co.; Houston, U.S.A.; 1997.
5. Mc Cabe W.L., J.C.Smith, *Operaciones básicas de ingeniería química*; Editorial Revertre; España; 1981.
6. Ocon G.J., G.T. Barreiro, *Problemas de ingeniería química*; Editorial Aguilar S.A.; España; 1963.
7. Perry, J.H., *Chemical Engineers Handbook*; Mc Graw-Hill New York; 1973.
8. Sherwood T.K., R.L. Pigford Absorption and extraction; Mc Graw-Hill book Co.; U.S.A.; 1952.
9. Sherwood T.K., R.L. Pigford y C.R. Wilke, *Transferencia de masa*; Editorial Geminis S.R.L.; Buenos Aires 1979.
10. Treybal R.E., *Operaciones de transferencia de masa*; Mc Graw-Hill book Co.; México D.F.; 1978.