



LABORATORIO DE PROCESOS DE SEPARACION TORRE DE ENFRIAMIENTO

I. OBJETIVOS

- ✓ Verificar los balances de masa y de energía en una torre de enfriamiento.
- ✓ Identificar las variables que afectan su operación.
- ✓ Comprender el proceso de enfriamiento como una transferencia simultanea de masa y de calor.
- ✓ Aplicar el concepto de unidad de transferencia de masa y calcular el número de unidades de transferencia de masa y altura de una unidad de transferencia por diferentes métodos.

II. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Las operaciones más sencillas en las que se presenta una transferencia simultanea de masa y calor son la humidificación y la deshumidificación. En estas operaciones solamente están involucradas dos fases y dos componentes: una fase líquida (agua generalmente) y una fase gaseosa compuesta por un gas incondensable a temperatura ambiente y en el que la primera se encuentra como vapor.

Las operaciones de humidificación se utilizan para controlar la humedad de un proceso, pero más frecuentemente, para enfriar y recuperar el agua utilizada como medio de enfriamiento en un proceso. Esto se logra mediante el contacto directo con aire, el cual se encuentra a una temperatura menor que el agua. El equipo en el que se realiza esta operación es conocido como Torre de Enfriamiento.

Estas torres generalmente están constituidas con diversos materiales como la madera, plásticos, etc. formando estructuras de puentes múltiples, también se emplean estructuras de aluminio, ladrillo, concreto o asbesto. El agua suele entrar por la parte superior y caer a través de puentes y deflectores hasta la parte baja de la torre, que está conformada por un sistema abierto al aire, el cual por su parte, entra por la parte inferior, poniéndose en contacto con el agua a lo largo y alto de toda la torre.

Las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo al medio utilizado para suministrar aire a la torre:

1. Tiro Forzado: el ventilador se encuentra instalado en la parte inferior de la torre, de manera que el aire es empujado para que fluya a través de ella.
2. Tiro Inducido: el ventilador se encuentra instalado en la parte superior de la torre, con lo cual el aire es succionado para que pase a través de la misma.
3. Tiro Natural: no existe ventilador y el flujo de aire es consecuencia únicamente de la convección natural.

La figura 1 muestra las partes internas y externas de una torre de enfriamiento típica.

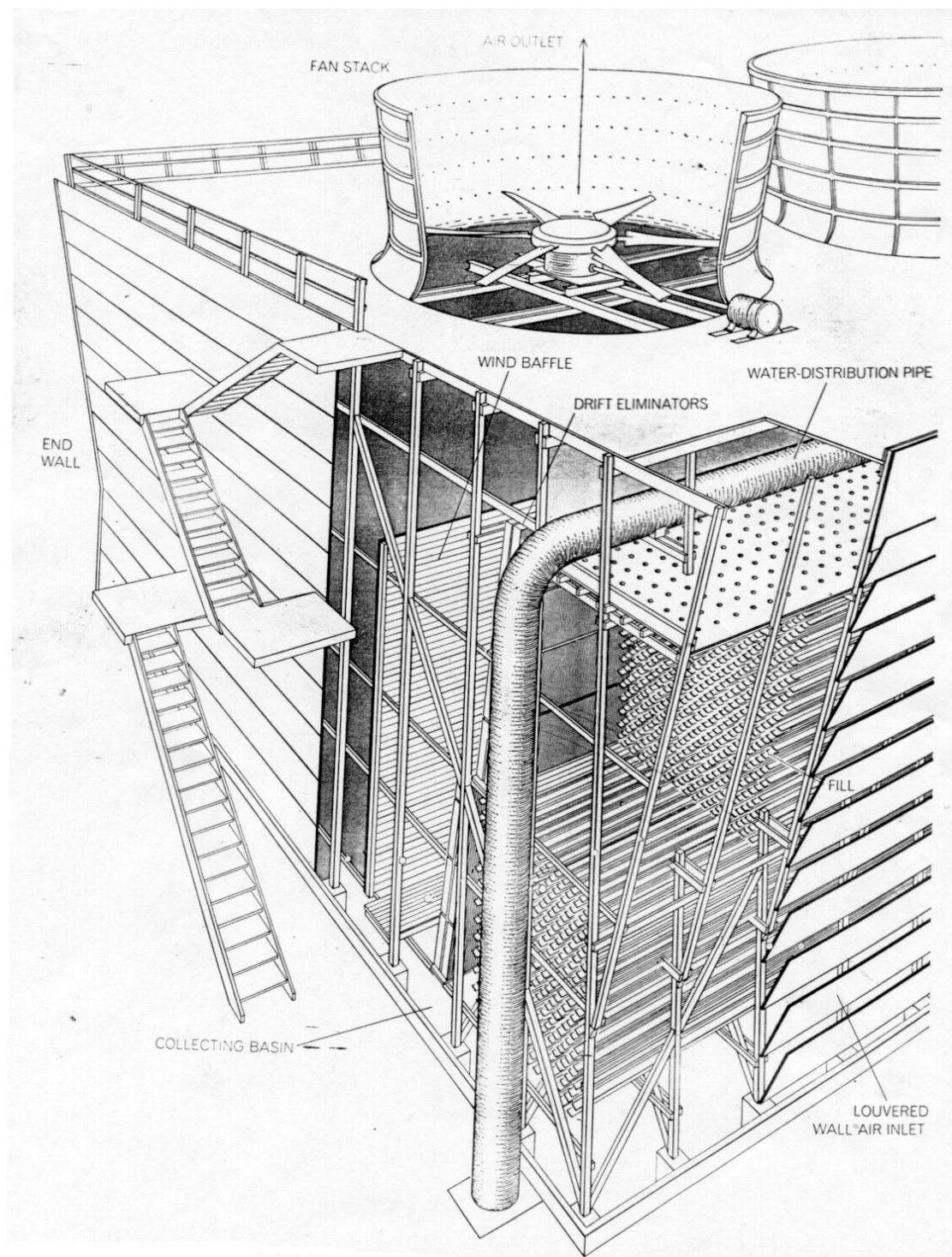


Figura 1. Torre Enfriamiento Industrial.

III. TEORÍA

El balance de materia en una torre de enfriamiento es:

$$G_1 + L_1 = G_2 + L_2$$

donde:

G es el gasto másico del aire

L es el gasto másico del agua

1 y 2 se refieren a la entrada y a la salida respectivamente.

El balance de energía global es:

$$G_1 H_{G_1} + L_1 H_{L_1} = G_2 H_{G_2} + L_2 H_{L_2}$$

donde H es la entalpía de la corriente respectiva.

La operación de una torre de enfriamiento consiste en el contacto continuo de dos fases: una líquida y otra gaseosa. Cuando las fases entran en contacto se transfiere calor y masa de una fase a la otra. En la transferencia de masa, generalmente uno de los componentes se transfiere en mayor medida que el otro.

Para diseñar o conocer la operación de un equipo de contacto continuo, es necesario considerar la velocidad de transferencia de masa y el tiempo de contacto entre las fases. Una forma de determinar estos factores, es calculando el número de unidades de transferencia de masa (NUT) y la altura o longitud de una unidad de transferencia (LUT) en base a los balances de masa y energía. El NUT para la fase gaseosa se define haciendo un balance diferencial en una zona de la torre, como:

$$NUT_G = \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH}{H_i - H_G}$$

donde NUT_G es el Número de unidades de transferencia individuales con respecto al gas, H_i es la entalpía de la interfase y H_G es la entalpía de la corriente gaseosa.

La ecuación anterior establece que la fuerza motriz existente para que se presente el fenómeno de humidificación, es la diferencia de entalpía entre la corriente gaseosa y la entalpía en la interfase aire - agua (el denominador dentro de la integral).

Del mismo balance diferencial de una torre se puede definir a la Longitud de la Unidad de Transferencia como:

$$LUT_G = \frac{G_s}{k_y a}$$

donde LUT_G es la Longitud de la unidad de transferencia individual para el gas, G_s es la masa velocidad de la corriente gaseosa, k_y es el coeficiente individual de transferencia de masa para la fase gaseosa y a es el área de contacto interfacial por unidad de volumen de torre. Cabe mencionar que la masa velocidad se calcula dividiendo el gasto de aire seco por el área transversal de la torre.

De lo anterior, se obtiene que la altura de diseño de una torre se puede obtener como la multiplicación del número de unidades de transferencia por la longitud que debe tener cada una de estas unidades:

$$z = NUT_G LUT_G$$

donde z es la altura de la torre.

Dado que es sumamente complicada la medición de las propiedades de los fluidos en la interfase y por lo tanto, es muy difícil determinar la entalpía de la mezcla en dicho punto, se puede utilizar una fuerza motriz global que represente los balances globales en la torre y por lo tanto, la diferencia total de entalpía entre las dos fases, expresada en función de la mezcla vapor - aire. De lo anterior se desprende el concepto de Unidad de Transferencia Global.

$$NUT_{OG} = \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH}{H^* - H}$$

donde NUT_{OG} es el número de unidades de transferencia globales con respecto al gas y H^* es la entalpía de saturación del gas.

La altura de la unidad de transferencia global, queda definida entonces por:

$$LUT_{OG} = \frac{G_s}{K_y a}$$

donde K_y es el coeficiente de transferencia de masa global.

IV. CÁLCULOS

En esta práctica se van a utilizar dos métodos para calcular el NUT y el LUT globales de la torre:

1. Método Integral.

Consiste en la resolución de la integral planteada para el número de unidades de transferencia global. Esto es el área bajo la curva descrita cuando se grafica

$$\frac{1}{H^* - H_G} \quad \text{vs} \quad H_G$$

Los valores de las propiedades necesarias para evaluar la integral, se obtiene de lo que es la gráfica H_G vs T con las curvas de operación y equilibrio de la torre.

Debido a que se trata de los resultados provenientes del balance global en la torre, se asume que las condiciones dentro de la torre varían linealmente a lo largo de la misma y por lo tanto, la curva de operación es una línea recta que une a las coordenadas correspondientes a la parte inferior de la torre. Es decir, a los puntos (T_{L2}, H_{G1}) y (T_{L1}, H_{G2}) . De la deducción matemática se obtiene que la pendiente de la recta es:

$$m = \frac{L' Cp_L}{G_s}$$

donde L' es el flujo másico promedio del líquido y Cp_L es la capacidad calorífica del líquido.

La curva de equilibrio corresponde a la curva de saturación para la mezcla aire - agua.

2. Método Empírico.

En base a los datos geométricos de la torre se proponen las siguientes ecuaciones empíricas para el cálculo de las unidades de transferencia de masa en la torre.

$$LUT_{OL} = \frac{L'}{SK_y a}$$

$$LUT_{OG} = \frac{G_s}{K_y a}$$

$$NUT_{OL} = \frac{z}{LUT_{OL}}$$

$$NUT_{OG} = \frac{z}{LUT_{OG}}$$

V. EQUIPO

La torre de enfriamiento que se encuentra en el laboratorio es de tiro inducido. Básicamente consiste en un sistema que calienta agua mediante vapor vivo. El agua entra a la torre por gravedad desde la parte superior. La torre cuenta con el siguiente equipo:

1. Un rotámetro para medir el flujo de agua a la entrada
2. Un tubo pitot conectado a un manómetro inclinado a 43° para medir la velocidad del aire húmedo a la salida.
3. Un termistor que mide la temperatura del agua a la entrada
4. Medidor de nivel del colector de agua.

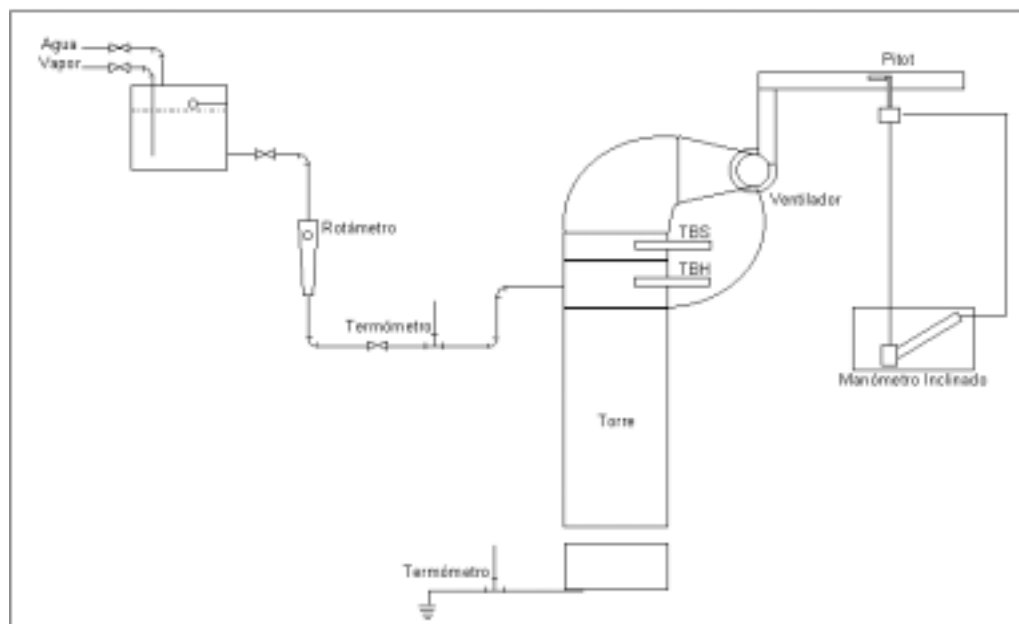


Figura 2. Torre Enfriamiento de Laboratorio.

La torre está formada por las siguientes secciones:

1. Eliminador de agua arrastrada
2. Sistema de distribución de agua.
3. Empaque.
4. Colector de agua.

El sistema de distribución de agua es de tipo película, que consta de una serie de canales con vertederos a los lados, el canal superior recibe agua de un tubo que le vierte a una distancia intermedia entre los dos vertederos que tiene el canal a cada lado. Estos descargan a su vez en otros dos canales que tienen cuatro vertederos en total a los lados y estos a su vez, derraman agua sobre otros cuatro canales que tienen ocho vertederos de cada lado. Estos últimos descargan el agua sobre las ocho primeras tablillas que forman la parte superior del empaque.

El empaque está dividido en cuatro secciones que constan, a su vez, de cinco hileras de tablillas traslapadas entre sí.

Los datos de diseño de esta torre son:

$Z = 3.23 \text{ ft} = 98.5 \text{ cm}$ (altura efectiva del empaque)
 $A = 2.25 \text{ ft}^2 / \text{ft}^3 = 7.38 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ (superficie de contacto por unidad de volumen de empaque)
 $K_y a = 1.38 \text{ G}_s^{0.75}$ donde $\text{G}_s [=] \text{ lb} / \text{ft}^2 \text{ s}$

La sección transversal de la torre es igual al área del colector de agua (45 x 45 cm) y el área transversal del ducto de salida de aire es de 279 cm^2 .

VI. DATOS EXPERIMENTALES

Valor Inicial en el manómetro inclinado	_____	Cm
Temperatura de Bulbo Húmedo del aire de entrada	_____	°C
Temperatura de Bulbo Seco del aire de entrada	_____	°C
Presión Atmosférica	_____	mm Hg

VARIABLE / CORRIDA	1	2	3
Tiempo			
Flujo de Agua Entrada			
Caída de Presión Pitot			
Altura del Colector de Agua Salida			
Temperatura agua entrada			
Temperatura agua salida			
Temperatura bulbo seco aire salida			
Temperatura bulbo húmedo aire salida			

VII. TRABAJO DE PRELABORATORIO

1. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de una torre de tiro inducido y cuáles de una de tiro forzado?
2. Explica cómo se calcula la caída de presión a través de la lectura de una manómetro inclinado.

3. Describe detalladamente como calcularás el gasto de aire a través de la lectura de un tubo Pitot o tubo de impacto.
4. Describe detalladamente como calcularás el gasto de agua de salida en la torre del laboratorio.
5. A) ¿Qué son el volumen húmedo y el calor húmedo?
B) ¿Cómo se calculan?
C) ¿Para qué se utilizan?
6. Describe como se puede obtener numéricamente la curva de equilibrio del sistema. Hacer la gráfica, dado que esta será empleada para el método integral.
7. Enlista 10 variables que se midan en una Torre de Enfriamiento Industrial durante la operación normal de esta. Menciona que instrumentos se emplean para medir cada variable.

VIII. TRABAJO DE POSTLABORATORIO

1. Reportar los siguientes resultados intermedios y finales:
 - Balance de Masa
 - 1.1 Velocidad de aire a la salida
 - 1.2 Volumen húmedo aire a la salida
 - 1.3 Gasto volumétrico de aire húmedo de salida
 - 1.4 Gasto Másico de aire seco en el sistema
 - 1.5 Gasto Másico de agua de salida
 - 1.6 Resultados del balance de masa
 - Balance de Energía
 - 1.7 Calor húmedo del aire de entrada
 - 1.8 Calor húmedo del aire de salida
 - 1.9 Entalpía del aire a la entrada
 - 1.10 Entalpía del aire a la salida
 - 1.11 Entalpía del agua a la entrada
 - 1.12 Entalpía del agua a la salida
 - 1.13 Resultados del balance de energía
 - Cálculos NUT y LUT
 - 1.14 NUT método integral
 - 1.15 LUT método integral
 - 1.16 NUT método empírico
 - 1.17 LUT método empírico
2. Hacer el ejemplo de cálculo de todos estos resultados usando los datos de la primera corrida.
3. Hacer una gráfica de la curva de equilibrio y de operación para cada corrida. Concluir al respecto.
4. Hacer una gráfica comparativa de $1/(H^*-H)$ vs T_L de las tres corridas. Concluir al respecto.
5. Incluir en el Análisis de Resultados lo siguiente: (esta lista no es limitativa)
 - 5.1 Comparación de los valores obtenidos para NUT y LUT por ambos métodos.
 - 5.2 Análisis de las posibles causas de desviación
 - 5.3 Comparación de los resultados obtenidos para cada corrida. Obtener las posibles desviaciones y explicar a que se deben estas.
 - 5.4 Explica cuál es la fuente principal de error durante la experimentación.
 - 5.5 Explica bajo que condiciones de operación es más eficiente el proceso de enfriamiento y por qué.
6. Incluir en las Conclusiones lo siguiente: (esta lista no es limitativa)
 - 6.1 Se cumplieron o no los objetivos planteados inicialmente y de qué forma.
 - 6.2 Plantea cuáles fueron los resultados más sobresalientes y por qué.
 - 6.3 Da soluciones a los problemas que se presentaron durante la experimentación y durante la elaboración del reporte.
 - 6.4 Da posibles mejoras a la práctica y/o manual de la misma.
 - 6.5 Explica porqué es necesario estudiar este equipo en laboratorio.
7. No olviden incluir las referencias de toda la literatura que emplearon.

IX. BIBLIOGRAFÍA.

- 📖 Norma, M.R. *Diseño de una Torre de Enfriamiento de Agua con Condiciones Variables para el Laboratorio de Ingeniería Química*. Tesis U.I.A. México, 1968.
- 📖 Treybal, R.E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2ª edición. De. Mc Graw Hill. México, 1988.
- 📖 McKetta, R. *Encyclopedia of Chemical Processing & Design*. Marcel Dekker Inc. Vol. 11. New York, 1980.
- 📖 Foust, A. *Principios de Operaciones Unitarias*. 2ª edición. C.E.C.S.A. México, 1964.
- 📖 Perry, R. & Green, D. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. 6ª edición. Mc Graw Hill. New York, 1984.