

CALCULO Y DISEÑO DE EMPAQUETADURA Y VENTILADORES PARA UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO

Jorge Antonio Iñiguez Donoso¹, Alfredo Barriga Rivera²

¹Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2000

²Director de Tesis, M.C. en Ingeniería Mecánica, Ph.D. en Ciencias de la Investigación, Universidad de Washington, USA.

RESUMEN:

En el siguiente artículo se trata de mostrar un método práctico y eficiente no solamente para calcular los ventiladores de una torre de enfriamiento, sino para diseñar el equipo como tal. Se utiliza la experimentación para determinar el coeficiente de transferencia de calor de la empaquetadura y luego se dimensiona los ventiladores utilizando el escalamiento por el método de similitud dinámica.

INTRODUCCION:

Las torres de enfriamiento son intercambiadores de calor que enfrían agua por medio de la evaporación. Este tipo de enfriadores se utiliza principalmente en los condensadores industriales. Las torres de enfriamiento son usadas cuando los rangos de enfriamiento son bajos, generalmente entre 5 y 25°C. La temperatura mínima que se puede alcanzar con una torre de enfriamiento es la temperatura de bulbo húmedo¹ del aire circundante.

CONTENIDO

Las torres de enfriamiento utilizan el calor latente de evaporación de los líquidos para enfriarlos. El proceso es fácilmente explicable de la siguiente manera:

Cuando un líquido a cierta temperatura T_L , entra en contacto con un gas inerte a temperatura T_G mas baja que T_L , la película de líquido que esta en contacto directo con él líquido se evapora. Para que este líquido pueda cambiar de fase, necesita obtener energía de algún lugar disponible; la fuente más cercana es el seno del líquido, así que, al tomar esa energía baja la temperatura del líquido. Este es el principal proceso de los enfriadores por evaporación tal como se muestra en la figura 1. Lo más importante para lograr un enfriamiento efectivo es aumentar el área de contacto entre el gas y el líquido, la forma mas eficiente de hacerlo es fraccionar el agua en la mayor cantidad de gotas posibles. Sin embargo se debe tener cuidado de no reducir el tamaño demasiado porque entonces estas gotas pueden ser acarreadas por la corriente de aire que atraviesa la torre con la consiguiente pérdida de agua del sistema.

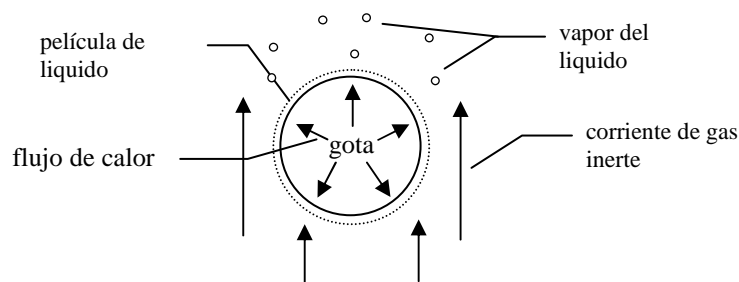


Figura 1. Esquema de enfriamiento por evaporación

El agua que se pierde por evaporación dentro de una torre de enfriamiento generalmente no llega al 3% del total.

Las torres de enfriamiento tal como se muestra en la figura 2 poseen las siguientes partes constitutivas:

- a) **Cuerpo:** Es la estructura que le da forma a la torre y puede ser metálica, de madera incorruptible o de hormigón.
- b) **Los rociadores:** Se encuentran en la parte superior de la torre y permiten que el agua caliente ingrese a la torre en forma de gotas para aumentar su superficie de contacto.
- c) **Empaquetadura:** La empaquetadura es una estructura que se encuentra en el interior de la torre y puede ser metálica, plástica o de madera. Su función es obligar a que el agua que cae en forma de gotas permanezca la mayor cantidad de tiempo dentro del cuerpo de la torre, a fin de garantizar una óptima transferencia de calor. Así también ayuda a que el flujo de aire se distribuya uniformemente en el interior del cuerpo.
- d) **Reservorio:** Se encuentra en el fondo de la torre y es un tanque en el cual se recoge el agua enfriada para regresar nuevamente al sistema.
- e) **Eliminadores de Acarreo:** Es una estructura ubicada en la parte superior de la torre y tiene la finalidad de evitar que las gotas pequeñas sean arrastradas por la corriente de aire fuera del sistema.
- f) **Tubería de restitución del agua:** Conforme se produce la evaporación del agua es necesario ir restituyéndola, para este propósito existe una tubería que mantiene el nivel del reservio constante. En la figura 2 se puede apreciar un corte de una torre de enfriamiento típica.

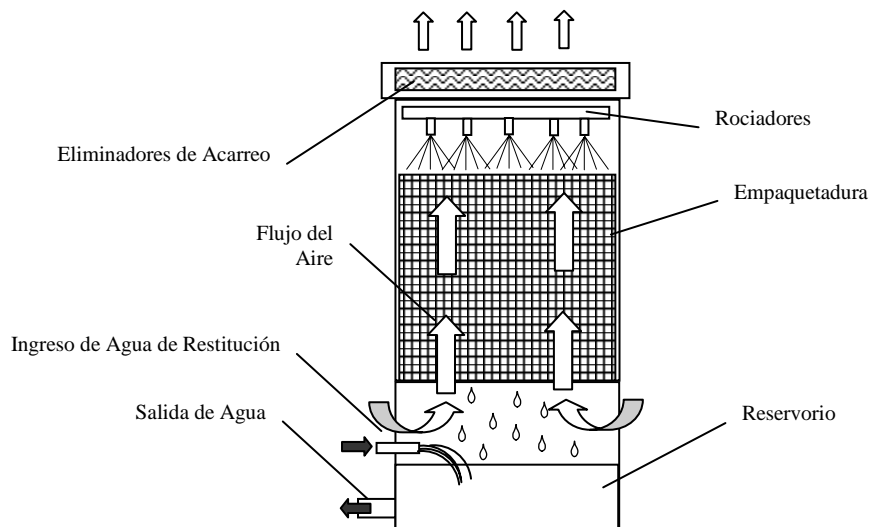


Figura 2. Partes de una torre de enfriamiento

Balance de Calor:

Al proceso que ocurre en el interior de la torre normalmente se le conoce como proceso de transferencia de masa, y se basa en la siguiente ecuación:

$$q + L_o C T_o = G (H_2 - H_1) \quad \text{ec. 1}$$

Donde q es la cantidad total de calor extraída del agua, L_o es el calor latente de vaporización del agua, C es el calor específico del agua, T_o es la temperatura de ingreso del agua, G es la cantidad de aire que circula por el interior de la torre y H_1 , H_2 son las entalpías del aire que entra y sale de la torre respectivamente.

La ecuación 1 se podría evaluar fácilmente sino fuera porque el valor de H_2 no se puede calcular teóricamente. Esto se debe a que no podemos predecir las condiciones de salida del aire de la torre, eso depende de la geometría de la empaquetadura y se mide como el factor de transferencia total $K_x a$.

El factor $K_x a$ depende de la superficie de contacto en el interior de la empaquetadura, es decir, mientras mayor sea el área de contacto efectiva entre el aire y el agua, el $K_x a$ de la torre será mayor.

Los valores de $K_x a$ dependen del tipo de empaquetadura de la torre y es difícil encontrar información bibliográfica al respecto, eso se debe principalmente a que es un factor clave de diseño que las compañías constructoras guardan celosamente.

Determinación del tamaño de un torre de enfriamiento:

Supongamos que queremos enfriar 50.000 lt / hora (110 000 lb/h) de agua a 50°C hasta que alcance los 40°C, las siguientes preguntas son:

- ¿Cuánto aire necesito para enfriarlo?
- ¿Cuáles son las dimensiones de la torre (alto, ancho y profundidad)?

Normalmente de acuerdo a la experiencia de muchos fabricantes, las torres de enfriamiento trabajan con cargas de aire que oscilan entre 900 a 1800 lb/h·ft² y con cargas de agua entre 500 y 2000 lb/h·ft².

Entonces podemos empezar a definir los parámetros de la torre de la siguiente manera:

1. Especificar una carga de agua para el diseño, esto se hace basándose en factores como la capacidad de los rociadores, para nuestro ejemplo:

$$carga_{agua\ diseño} = L = 1700\ lb/h \cdot ft^2.$$

2. Para saber el área de la torre debemos dividir la carga total de agua de la torre por hora para la carga de agua de diseño, para nuestro ejemplo:

$$Area\ torre = carga_{total} / carga_{agua\ diseño} = 110\ 000 / 1700 \approx 65\ ft^2$$

3. Podemos definir una carga de aire fija como factor de diseño, se recomienda que esta carga de aire sea como mínimo la mitad de la carga de agua para rangos de enfriamiento de 10°C, aunque se pueden utilizar factores entre 0,5 y 1,5 que pueden aumentar significativamente el costo del equipo; para nuestro ejemplo:

$$Carga_{aire\ diseño} = G = 0,55 \times Carga_{agua\ diseño} = 935\ lb/h \cdot ft^2$$

4. Nos queda entonces una pregunta por responder... ¿Qué altura debe tener la empaquetadura de la torre?

La altura de la empaquetadura depende su capacidad de transferencia de calor, y esta solo se puede determinar experimentalmente.

Pruebas Experimentales

Para determinar las propiedades de una empaquetadura en particular se puede recurrir a un dispositivo como el mostrado en la figura 3.

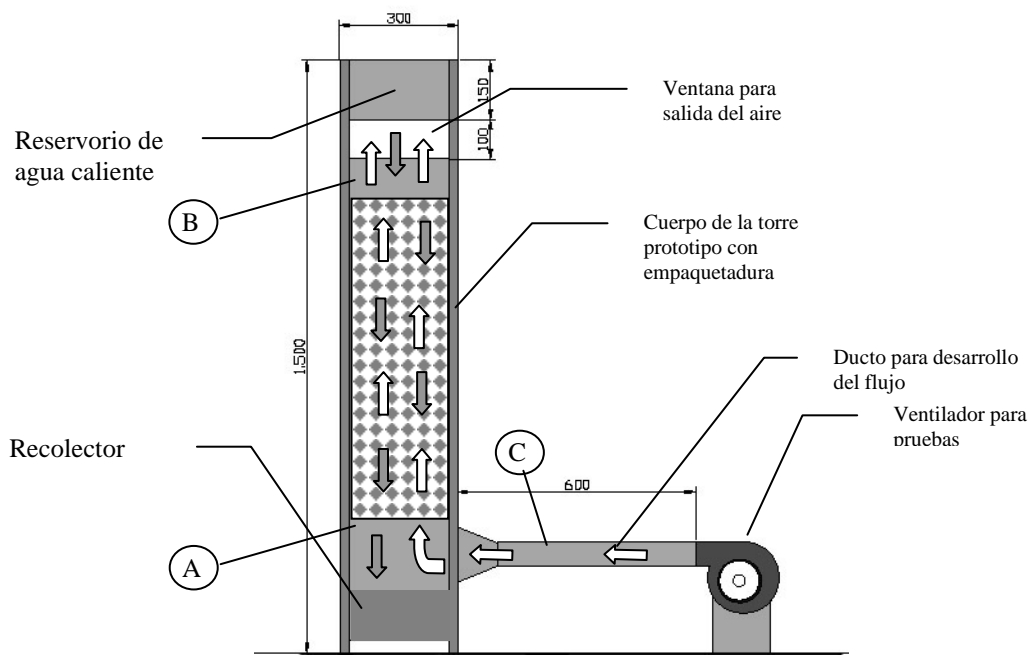


Figura 3. Prototipo experimental de Torre de enfriamiento

La caída de presión dentro de la empaquetadura se puede medir utilizando un manómetro diferencial colocado entre los puntos A y B, esta caída de presión nos determinará la presión estática mínima que debe producir un ventilador para permitir que el aire pase a través de la empaquetadura. El punto C se puede utilizar para medir el caudal de aire que ingresa al prototipo utilizando un tubo pitot.

El esquema de medición de la caída de presión dentro de la empaquetadura se muestra en la figura 4.

Las empaquetaduras pueden ser de diversos materiales y arreglos, generalmente son de plástico o de madera incorruptible, su función primordial es crear una película uniforme para la transferencia de calor y mantener al agua el mayor tiempo posible dentro de la torre.

En la figura 5 se muestran algunos arreglos para empaquetaduras de madera.

Para nuestro caso vamos a utilizar una empaquetadura de bajo presupuesto y alta eficiencia, vamos a utilizar bandejas portahuevos de plástico como empaquetadura. Esta empaquetadura según las pruebas realizadas a demostrado ser muy eficiente y económica.

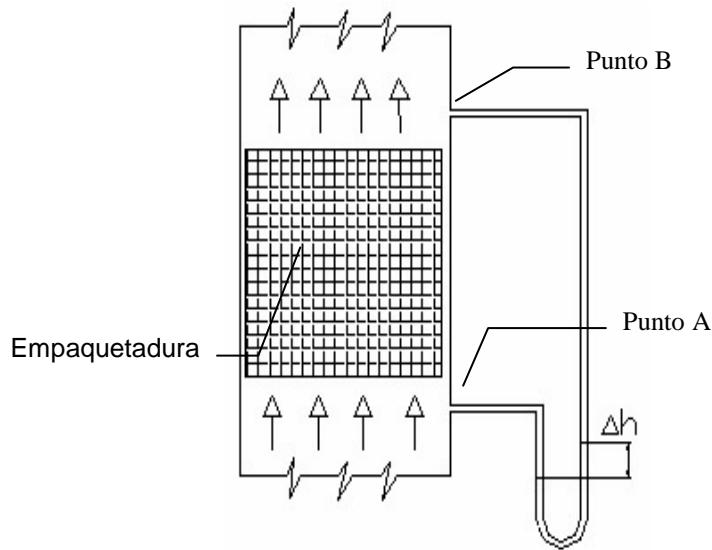


Figura 4. Medición de caída de presión en la empaquetadura

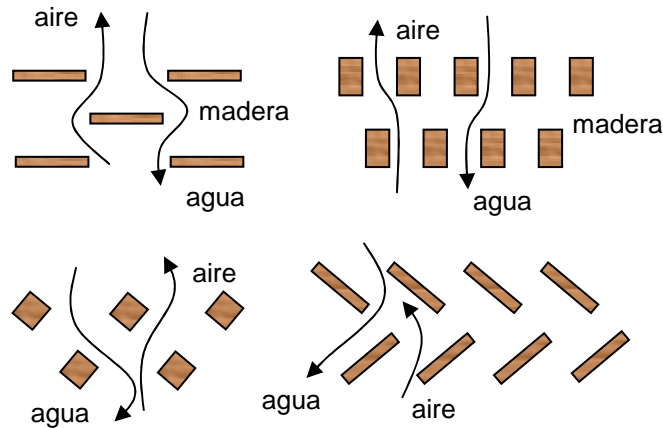


Figura 5. Diversas disposiciones y formas de empaquetaduras de madera incorruptible

Para realizar las pruebas en el prototipo se procede de la siguiente manera:

1. Se regula el flujo del aire de entrada mediante obturación de la entrada del ventilador. Mediante prueba y error utilizando el tubo pitot regulamos el flujo de aire hasta que sea el requerido (en nuestro caso es $G=935 \text{ lb/h}\cdot\text{ft}^2$)
2. Se regula el flujo de entrada del agua, esto se puede hacer teniendo varias bandejas de entrada de agua con perforaciones de diversos diámetros para obtener diversos caudales (para el ejemplo es de $L=1700 \text{ lb/h}\cdot\text{ft}^2$).
3. Se calienta el agua mediante cualquier método (puede usarse reverberos, hornillas, resistencias) hasta lograr la temperatura requerida (50°C)
4. Se utiliza un higrómetro/termómetro para medir la humedad relativa del aire circundante y la temperatura respectivamente.

5. Se pone en funcionamiento el ventilador y se permite el flujo del agua, entonces se mide la humedad relativa y temperatura del aire de salida.
6. Se mide la temperatura del agua en el fondo de la torre.

Con los datos obtenidos y con ayuda de las cartas Psicrométricas podemos calcular la entalpía de entrada (H1) y salida del aire (H2).

Con estos valores se puede determinar el Kxa de la empaquetadura mediante la integración numérica de la ecuación 2:

$$Kxa \frac{V}{L} = \int_1^2 \frac{dT}{H'-H} \quad \text{ec. 2}$$

Donde **V** es el volumen de la empaquetadura, **L** es el gasto de agua de entrada, **H'** es la entalpía de saturación del aire (no es la misma para el aire de entrada que el de salida). Cabe recalcar que la ecuación 2 no se puede resolver analíticamente por cuanto tanto **H'** como **H** son variables, se recomienda utilizar métodos gráficos o numéricos.

Para calcular la altura de la torre una vez conocido el valor de Kxa despejamos el valor de las unidades de difusión **nd**² de la ecuación 3:

$$n_d = \int \frac{dT}{H'-H} = Kxa \frac{V}{L} \quad \text{ec. 3}$$

Y la altura **Z** de la torre será igual a:

$$Z = \frac{n_d \cdot L}{Kxa} \quad \text{ec. 4}$$

Para el ejemplo propuesto se obtuvo los siguientes valores:

T1 (agua ingreso)	= 51,1°C
T2 (agua salida)	= 38,5°C
ΔT	= 12,6°C
L (agua)	= 1702,54 lb/h·ft ²
G (aire)	= 932,5 lb /h·ft ²
T0 (aire ingreso)	= 29°C
Ts (aire salida)	= 39°C
φ (aire ingreso)	= 63%
φ (aire salida)	= 96%
H1	= 37,5 BTU /lb
H2	= 78,9 BTU /lb
Lo (agua restitución)	= 31,14 lb /h·ft ²
V (empaquetadura)	= 1,89 ft ³
Kxa	= 286,26 lb/h·ft ³ (lb/lb)
nd	= 0,317
Z	= 2,19ft = 668mm
ΔP (en la empaquetadura)	= 0,11 pulg H ₂ O

Para construir la torre de tamaño real basta solamente utilizar los parámetros de empaquetadura anteriormente mostrados, es decir, el área de la torre no debe ser menor que 65ft² y la altura de su empaquetadura no debe ser inferior que 668mm.

Cálculo y Escalamiento de los ventiladores

De acuerdo a lo calculado anteriormente el gasto de aire debe ser del orden de $G=932\text{lb/h}\cdot\text{ft}^2$. Como tenemos un área de transferencia $A = 65\text{ft}^2$, entonces el gasto total de aire será:

$$G_{\text{total}} = 932 \times 65 = 60\,580 \text{ lb/h} \approx 12\,000\text{CFM}$$

Esta es una cantidad considerable como para pensar en un solo ventilador, normalmente se recomienda utilizar más de un ventilador por razones de mantenimiento; porque, en caso de fallar uno, la torre eventualmente podría seguir operando con menor capacidad.

Para nuestro caso vamos a utilizar 4 ventiladores de 3 000CFM cada uno que posean una presión estática de operación superior a 0,11 pulg H_2O , a fin de que el aire pueda circular a través de la empaquetadura.

tenemos 2 opciones para diseñar los ventiladores, la primera es diseñarlos desde cero utilizando la teoría de turbomaquinarias y la segunda es utilizar un ventilador como modelo y luego escalarlo hasta las dimensiones requeridas. Para nuestro ejemplo utilizaremos la segunda alternativa.

Escalamiento de Ventiladores

Las fórmulas que permiten el escalamiento de ventiladores por similitud dinámica³ son las siguientes:

$$\frac{Q_1}{\omega_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 D_2^3} \quad \text{ec. 5}$$

$$\frac{H_1}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{\omega_2^2 D_2^2} \quad \text{ec.6}$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 \omega_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{\rho_2 \omega_2^3 D_2^5} \quad \text{ec.7}$$

Donde Q es el caudal, ω es la velocidad angular, D es el diámetro del rotor, P la potencia y ρ la densidad del aire.

Se pueden utilizar estas fórmulas siempre y cuando el modelo y el prototipo sean geoméricamente similares (proporciones iguales), cinemáticamente similares y dinámicamente similares. Para escalar los ventiladores de nuestro problema tomamos como modelo un ventilador centrífugo de paletas rectas Marca Trane tipo S tamaño 13. Las dimensiones de ese ventilador son las siguientes:

- **Diámetro del Rotor (D1)** = 575mm
- **Caudal (Q1)** = 1 656CFM
- **Velocidad (ω_1)** = 900RPM
- **Presión estática (H1)** = 2 pulg H_2O
- **Potencia al freno (P1)** = 0,93 BHP
- **Potencia real consumida** = 1,16 HP
- **Número de Alabes** = 8

Utilizando las fórmulas 5, 6 y 7 obtuvimos las siguientes características para nuestro prototipo:

Siendo $Q_2 = 3.000$ CFM y $\omega_2 = 1200$ RPM

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{Q_2 \cdot \omega_1 \cdot D_1^3}{\omega_2 \cdot Q_1}} = 637 \text{ mm}$$
$$H_2 = \frac{H_1 \cdot \omega_2^2 \cdot D_2^2}{\omega_1^2 \cdot D_1^2} = 4,36 \text{ pu/gH}_2\text{O}$$
$$P_2 = \frac{P_1 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2^3 \cdot D_2^5}{\rho_1 \cdot \omega_1^3 \cdot D_1^5} = 3,68 \text{ BHP}$$

Con estos valores podemos entonces construir una torre de enfriamiento para 50 000 lt/hora que pueda lograr un ΔT del orden de los 10°C

CONCLUSIONES:

El método de diseño aquí presentado es una mezcla entre el siempre romántico análisis teórico y el método práctico, que muchas veces utiliza la prueba y error para llegar a conclusiones válidas. Una foto de la empaquetadura utilizada en las pruebas del modelo se puede apreciar en la figura 6



Figura 6. Empaquetadura del modelo experimental

La empaquetadura hecha de bandejas portahuevos es muy efectiva y sobre todo económica y fácil de construir, es una alternativa muy viable para economías como la de nuestro país.

Se ha presentado un método muy sencillo para calcular ventiladores una vez que se conoce las características de otro similar. Este proceso es válido siempre y cuando se respeten las proporciones de escala y no hayan variaciones significativas en las pérdidas por rozamiento.

Esta torre experimental puede ser utilizada para medir diferentes tipos de empaquetaduras y diversos rangos de enfriamiento. Utilizando esta misma empaquetadura se logró enfriar agua desde los 58°C hasta los 29°C , es decir un ΔT de

casi 30°C, claro está que al escalar el caudal de aire a un tamaño real se convertía en una torre antieconómica.

REFERENCIAS

¹ G. J. Van Wylen & R. Sonntag , Fundamentos de Termodinámica, (19ª edición, México, editorial Limusa , 1995), pp. 461

² D. Kern, Procesos de Transferencia de Calor, (1º edición, México, Compañía editorial Continental, 1975), pp 654.

³ R. Fox & A. McDonald, Introducción a la Mecánica de Fluidos, (4ª edición, México, Mc Graw Hill, 1995), pp. 327, 328 y 632.