

Análisis del desempeño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación másica de flujo agua-aire

Performance analysis of a laboratory scale cooling tower for different packing materials, water inlet temperature and mass flow ratio water-air

Luis G. Obregón Quiñones¹, José C. Pertuz², Rafael A. Domínguez³

¹Ph.D. en Ingeniería Química, Docente del Programa de Ingeniería Química, Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación de Procesos Químicos y Bioquímicos Sostenibles, Barranquilla, Colombia.

²Ingeniero Químico de la Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación de Procesos Químicos y Bioquímicos y Bioquímicos Sostenibles, Barranquilla, Colombia

³Ingeniero Químico de la Universidad del Atlántico, Grupo de Simulación y Control de Procesos, Barranquilla, Colombia
*Email: luisobregon@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido 28/07/2016,
Aceptado 15/11/2016

Cite this article as: L. G. Obregon, J. C. Pertuz, R. A. Dominguez, "Performance analysis of a laboratory scale cooling tower for different packing materials, water inlet temperature and mass flow ratio water-air", *Prospectiva*, Vol 15, N° 1, 42-52, 2017.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño, montaje y puesta en marcha de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio de 0.15 m de lado y 1.54 m de alto, adecuada con empaques tipo salpicadura hechos de madera, acrílico, hierro y aluminio, y de tipo película hecho de acrílico. Se evaluó el desempeño de la torre a diferentes relaciones de flujo másico L'/G' en el rango de 0.2 a 1.0, temperaturas de entrada de líquido en el rango 48-40°C y diferentes materiales y geometrías de empaque. Se desarrolló una correlación no lineal del coeficiente volumétrico global de transferencia de masa $K_y a$ como función de los diferentes factores estudiados mediante análisis estadístico. Se notó que el desempeño de la torre de enfriamiento mejora en altos valores de $K_y a$ y de eficiencia global cuando se realizaron incrementos de la relación L'/G' operando con empaques que contienen valores bajos de conductividad térmica tal como la madera y el acrílico y usando altos valores de la temperatura del agua de entrada. Un aumento en el área superficial del empaque de un 350% resulta en un incremento en eficiencia hasta de un 30% mostrando la importancia de realizar un análisis de costos de ingeniería.

Palabras Clave: Torre de enfriamiento, desempeño, eficiencia, correlación no lineal, Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, empaque de torre.

ABSTRACT

In this work it was performed the design, assembling and start up of a laboratory scale cooling tower with 0.15 m side and 1.54 m high, equipped with splash type packaging made of wood, acrylic plastic, iron and aluminum, as well as a film type packing made of acrylic material. The performance of the tower was evaluated at different mass flow ratios L'/G' in the range of 0.2-1.0, liquid inlet temperature between 48-40°C and different material and geometry of the tower packing. It was obtained a non-linear correlation of the total volumetric mass transfer coefficient $K_y a$ as a function of the different factors studied using a statistical analysis. It was observed that the performance of the cooling tower improves to high values of $K_y a$ and efficiency in the tower when increasing the relation L'/G' working with tower packing with low thermal conductivity such as wood and acrylic material, and using high values of inlet water temperature. An increase in the surface area of the tower packing to 350% results in an increase in the efficiency to approximately 30% showing the importance of making an engineering cost analysis.

Key words: Cooling tower; performance; efficiency; non-linear correlation; volumetric mass transfer coefficient; tower packing.

1. INTRODUCCIÓN

En los grandes procesos químicos de la industria se generan enormes cantidades de calor que debe ser removido para que todas las unidades operen eficientemente. Los equipos de transferencia de calor más comúnmente utilizados son los intercambiadores de calor y condensadores. Muchas compañías requieren tener procesos eficientes en cuanto al costo razón por la cual gran cantidad del agua que se usa en muchos intercambiadores de calor para refrigerar es recirculada y reutilizada. Para lograr esto una de las formas más prácticas y económicas es mediante el uso de torres de enfriamiento empacadas, ya que ofrecen ventajas importantes por la transferencia simultánea de calor y masa debida a que el contacto entre los fluidos es directo. Una ventaja que tienen las torres de enfriamiento sobre los intercambiadores de calor comunes es la gran cantidad de agua que manejan debido a que pueden tratar toda el agua de una planta entera mientras que los intercambiadores comunes son utilizados para equipos simples [1, 2]. La eficacia de las torres se debe a que estas ayudan a que el área superficial de contacto entre los medios sea alta intensificando el transporte de masa y energía. En la actualidad existen tres tipos de empaques que son los más usados, los cuales son, de película, salpicadura (splash) y de malla-película [3].

Con el fin de optimizar el desempeño de estos equipos en estos últimos años se han llevado a cabo investigaciones experimentales acerca de los parámetros que tienen más influencia en la transferencia de calor y masa, en especial el tipo de empaque. Simpson y Sherwood [4] estudiaron el desempeño de una torre de enfriamiento de tiro mecánico utilizando empaques de listones de madera. Kelly y Swenson [5] estudiaron las características de un empaque de tipo malla correlacionando la relación de flujo agua/aire con otras variables como el cambio en la temperatura del agua y la geometría del empaque. También encontraron un valor dado de la relación L'/G' en el que las características del equipo se volvían independientes de la temperatura de bulbo húmedo y el flujo de aire. Bedekar et al. [3] realizaron estudios experimentales con empaques peliculares y presentaron sus resultados en términos de las características de la torres como la temperatura de salida del agua y la eficiencia como función de la relación de flujo L'/G' .

Las correlaciones empíricas para los coeficientes de transferencia de calor y masa ($K_y a$) aparecen en distintos formatos en varios estudios. Lowe [6] presentó la correlación de la forma como está en la ecuación (1), mientras que Kloppers y Kröger [7] de la forma como se muestra en la ecuación (2).

$$K_y a = c_1 * \left(\frac{L'}{G'} \right)^{c_2} \quad (1)$$

$$K_y a = c_1 * L'^{c_2} G'^{c_3} \quad (2)$$

En otros estudios Kloppers y Kröger [8] notaron que el coeficiente de transferencia $K_y a$ también dependía de la altura del empaque, y de la variación de la temperatura de entrada, sugiriendo una nueva forma de correlación como es la mostrada en la ecuación (3).

$$K_y a = c_1 * L'^{c_2} G'^{c_3} Z^{c_4} T_1^{c_5} \quad (3)$$

Siendo los valores de c constantes en las relaciones empíricas para los diferentes tipos de empaque.

Trabajos como los de Bedekar [3] et al., de Gharaghezi y Missenden [9], Kloppers y Kröger [10], han reportado que los efectos de la relación del flujo de líquido y gas, la temperatura de entrada del agua, así como tamaño del empaque utilizados, son extremadamente importantes en el desempeño de la misma. Con esto se han desarrollado correlaciones empíricas de factores como el coeficiente de transferencia de calor y masa ($K_y a$) y la eficiencia, con respecto a las variables mencionadas, para obtener datos que permitan diseñar torres de enfriamiento empacadas más eficientes. Otro estudio investigó el efecto de empaques tipo salpicadura en un eje rotatorio, sus resultados mostraron que el calor rechazado por el equipo aumenta conforme la velocidad rotacional [11]. También se investigó el efecto en el desempeño de torres de enfriamiento industriales de los defectos causados por mal mantenimiento en diferentes partes de las torres de enfriamiento industrial como boquillas de aspersión y bloqueos en empaques [12]. Otros investigadores realizaron un estudio experimental en empaques de PVC donde se varía el número de láminas y obtienen correlaciones empíricas para determinar el punto óptimo de operación [13].

Sin embargo, a pesar de lo valioso de los resultados, estos han sido muy específicos con respecto al tipo de material de empaque, por lo cual en el presente trabajo se construyó una torre de enfriamiento a escala de laboratorio y se utilizaron empaques de tipo salpicadura de cuatro materiales diferentes: madera, plástico acrílico, aluminio, hierro y uno de tipo película hecho de plástico acrílico los cuales se dimensionaron de acuerdo con los parámetros de diseño encontrados en el trabajo de Mohiuddin A.K.M. et al. [14]. De esta manera se hizo el estudio del comportamiento de los coeficientes de transferencia de masa y de calor relacionados a los procesos de humidificación para diferentes factores de material del empaque, la relación L'/G' y la temperatura de entrada del líquido, para determinar así su influencia en la eficiencia del equipo y como también la mejor combinación de parámetros que permitan una alta transferencia de calor y masa.

Nomenclatura		Subíndices	
A	Área transversal (m^2)	bh, wb	Temperatura bulbo húmedo
a	Área específica de empaque (m^2/m^3)	bs, db	Temperatura bulbo seco
C_p	Calor específico del agua ($kJ/^\circ C \text{ kg}$)	ev	Evaporación
G'	Flux másico de aire libre de agua ($kg/s \text{ m}^2$)	fi	Relleno (empaque)
h	Coeficiente de transferencia de calor ($kJ/^\circ C \text{ kg}$)	fr	Frontal (dirección)
hy	Entalpía del aire (kJ/kg)	G, a	Aire
k	Conductividad térmica ($W/K \text{ m}$)	i	Entrada
$k_y a$	Coeficiente volumétrico global de transferencia de masa ($kg/m^3 \text{ s}$)	L, w	Agua
k_m	Integral del método de Merkel	ma	Interface
L'	Flux másico de agua ($kg/s \text{ m}^2$)	o	Salida
Le	Numero adimensional de Lewis	v	Vapor de agua
m	Flujo másico (kg/s)		
$\dot{Q}$	Calor (W)		
T	Temperatura ($^\circ C$)		
V	Volumen de empaque (m^3)		
w	Humedad ($kg \text{ de Agua/kg}$)		
Z	Altura de empaque (m)		

2. METODOLOGÍA

Para el diseño de torres de enfriamiento con relleno se utilizan ecuaciones empíricas como las siguientes, que determinan la altura de empaque utilizando el parámetro $K_y a V/L$ y el método de Merkel [15] otros valores constantes específicos para cada tipo de relleno [14].

$$\frac{K_y a V}{L} = 0.07 + A(ND) \left(\frac{L'}{G'} \right)^{-p}$$

Donde, A y p son parámetros contantes para cada empaque y se encuentran tabulados, L'/G' es la relación de flujos másicos del agua y aire, ND es el número de

pisos de la torre, H es la altura del empaque y VDS el espaciado entre pisos del empaque. Se realizó el diseño de la torre de enfriamiento a escala de laboratorio, tomando como referencia parámetros establecidos en la revisión bibliográfica.

Para realizar los cálculos se asumen condiciones iniciales de operación, [4, 9, 16], las cuales se muestran en la siguiente tabla 1. Una vez realizados los cálculos se obtienen las dimensiones de la torre de enfriamiento como se muestra en la tabla 2. Para el empaque de tipo película se construyeron 3 piezas de 0,15 m de altura, cada una de estas con 5 láminas de dimensiones mostradas en la figura 1b, para un total de altura de empaque de 0,45 m.

Tabla 1. Condiciones de diseño y altura calculada para la torre de enfriamiento empacada.

Table 1. Design conditions and calculated height of the packed cooling tower.

Propiedad	Valor
Temperatura de entrada del agua (T_{L1})	45°C
Temperatura de salida del agua (T_{L2})	35°C
Temperatura de bulbo seco del aire entrada (T_{bs1}) ^a	30°C
Temperatura de bulbo húmedo del aire entrada (T_{bh2}) ^a	28°C
Flujo de entrada de agua (Q_L)	1,5 L/min
Flujo volumétrico de entrada de aire (Q_G) ^b	2,97 m ³ /min
Lado de la torre ^c	0,15 m
Altura de empaque calculada	1,14 m

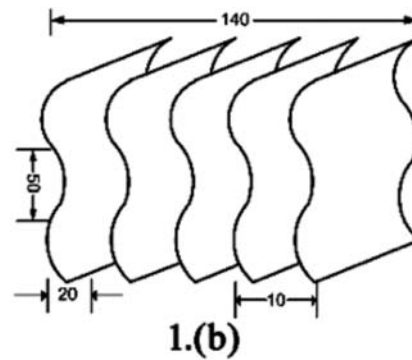
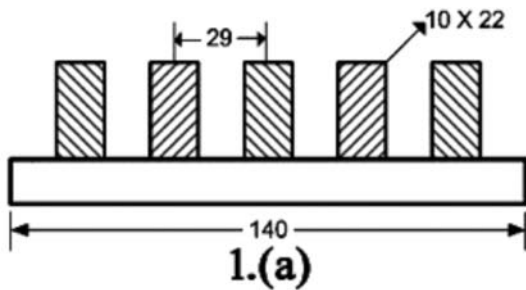
Tabla 2. Dimensiones de la torre de enfriamiento.
Table 2. Dimensions of the packed cooling tower.

Parámetro	Dimensión	Parámetro	Dimensión
Número de pisos empaque tipo salpicadura	4	Altura total de empaque	1,41 m
Espaciado entre empaques tipo salpicadura	0,38 m	Altura total de la torre	1,54 m
Número de pisos empaque tipo película	3	Ancho	0,15 m
Espaciado entre empaque tipo película	0,20 m	Largo	0,15 m

Se construyeron rellenos tipo salpicadura hechos de distintos materiales: madera, aluminio, acrílico y hierro (ver figura 1a y figura 2).

Figura 1. Dimensiones (en mm) del empaque tipo salpicadura (a) y tipo película (b). [14]

Figure 1. Dimensions (in mm) of the splash type packing (a) and film type packing (b). [14]

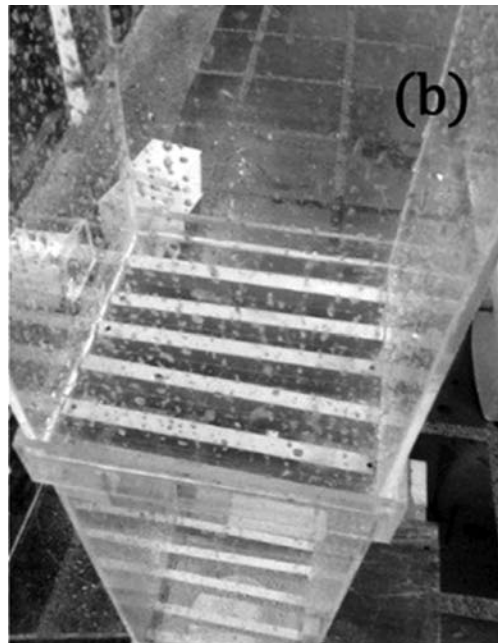
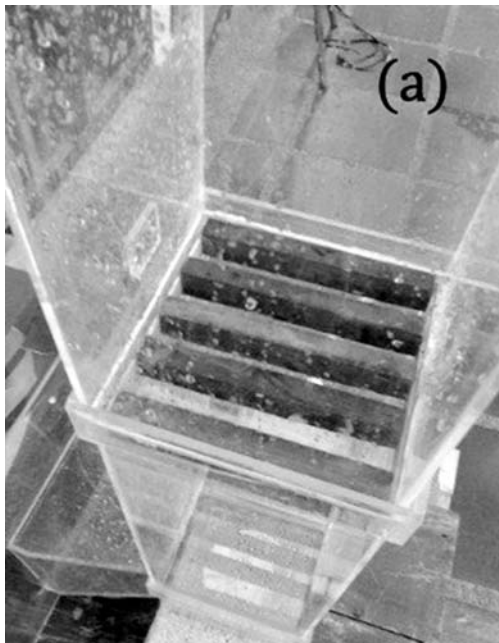


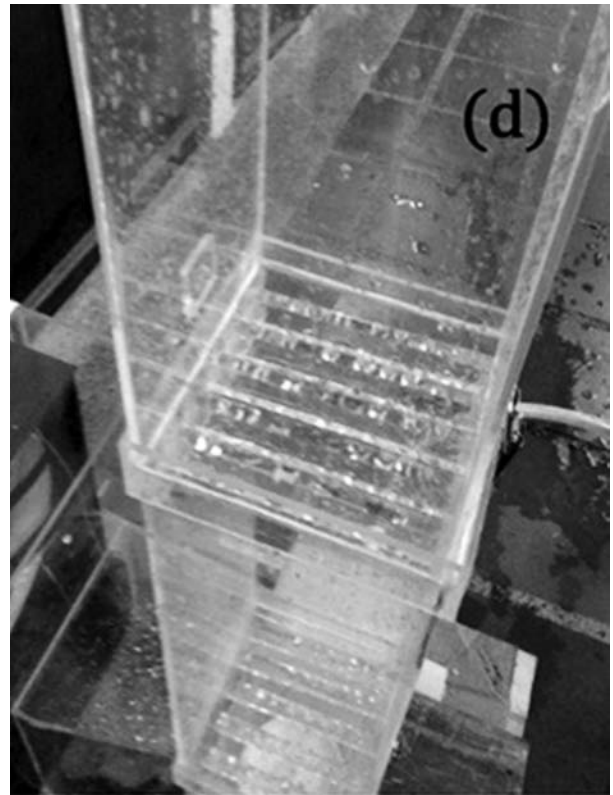
Fuente: A. K. M. Mohiuddin and K. Kant, 1996. [14]

También se tomó en cuenta un empaque tipo película de acrílico como se puede observar en la figura 3. con el fin de comparar la influencia de la forma de este con los demás [14].

Figura 2. Empaques tipo salpicadura utilizados en la torre de enfriamiento. Tipos de material: Madera (a), aluminio (b), hierro (c) y acrílico (d).

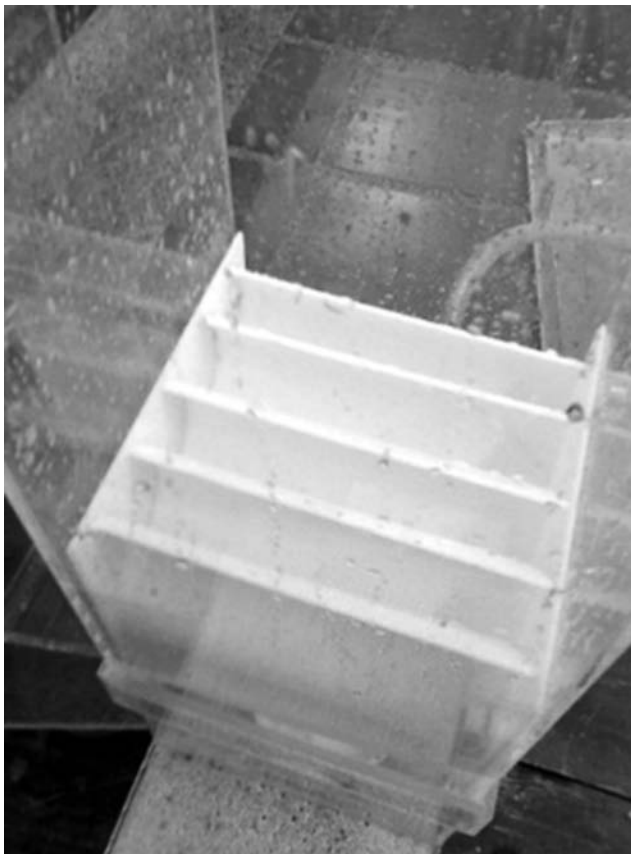
Figure 2. Splash type packing used in the cooling tower. Material types: wood (a), aluminum (b), iron (c) and acrylic (d).





Fuente: El autor

Figura 3. Empaque de acrílico tipo película.
Figure 3. Acrylic film type packing.



En la figura 4 se muestra el diagrama de tuberías y accesorios del montaje de la torre de enfriamiento, todas las líneas y accesorios (codos y reducciones) de material PVC, a excepción de las válvulas V-1/2 las cuales son de bronce y tipo globo. Además, en la Tabla 3 se expone información relevante con respecto a los equipos de la torre e instrumentos de medición y control empleados para la construcción del sistema.

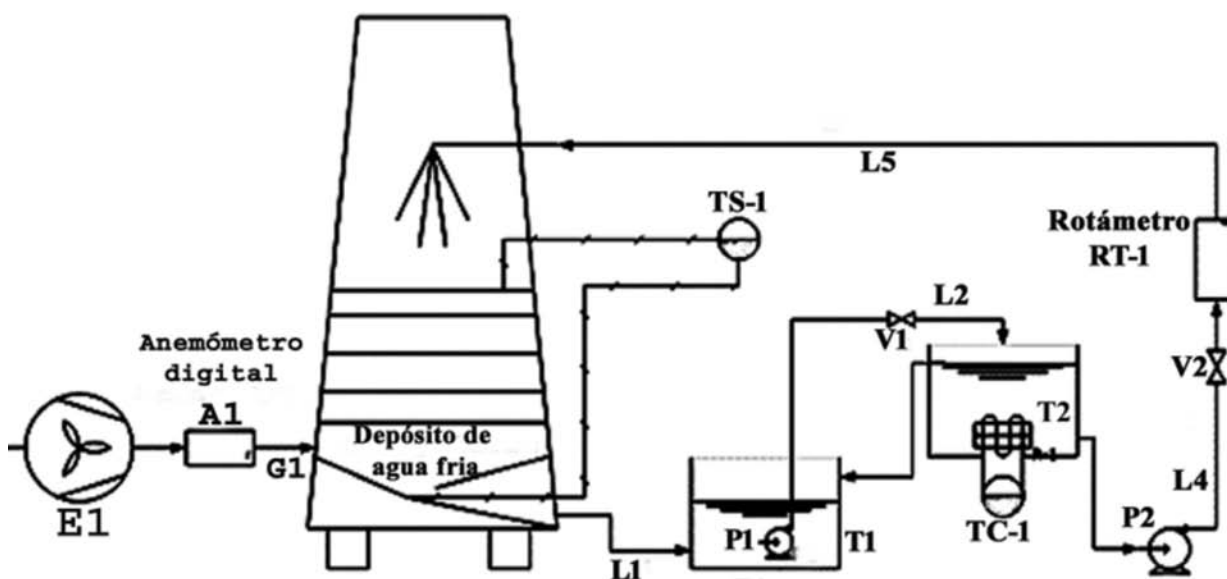
El procedimiento de experimentación fue el siguiente: con el tanque de agua de entrada (T-2) lleno, se encendió el sistema de control de temperatura en conjunto con la resistencia eléctrica, ajustándolo en el set-point deseado. Este tanque posee un agitador de paletas impulsado por un motor eléctrico para la lectura correcta de la termocupla en el sensor/controlador. Se toman datos de las condiciones ambiente, la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo. Luego, se enciende el extractor de aire y con el anemómetro digital se mide la velocidad del aire para calcular el flujo volumétrico que pasa a través de la torre y ajustar el flujo de agua para las diferentes relaciones L'/G' .

Para empezar las corridas con variación de flujo, se enciende la bomba P-2. Luego se regula el flujo de agua con la válvula V-2 y trabajar con los flujos 1.0, 0.8, 0.6, 0.4 y 0.2 gpm. Al mismo tiempo se van midiendo las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire a la salida de la torre, con sensores de temperatura (TS-1). Luego se realiza una perturbación en el flujo de agua con la válvula V-2 hasta llegar a estado estable con el fin de tener la repetición de los datos. Al finalizar las corridas con las

Tabla 3. Descripción equipos e instrumentación.**Table 3.** Instrumentation and description of equipment.

Equipos			
Nombre	TAG	Tamaño	Temperatura Diseño
Extractor de aire semi-industrial 8"	E-1	(1 / 12 HP)	30 °C
Bomba sumergible	P-1	30 W	40°C
Bomba centrífuga	P-2	70-140 W	50°C
Resistencia sumergible	R-1	3,5 kW	50°C
Tanque 1. Agua de reposición	T-1	50 L	40°C
Tanque 2. Agua caliente	T-2	50 L	50°C

Instrumentos			
Nombre	TAG	Rango	Temperatura Diseño
Anemómetro digital	A-1	0-30 m/s	45 °C
Sensor de temperatura digital 1. Tope de la torre	TS-1	0-100 °C	100°C
Rotámetro	RT-1	0-9,46 lpm	60°C
	TAG	Set-point	Acción del actuador
Sistema de control de temperatura On/Off con termopar	TC-1	48-40°C	Inversa

Figura 4. Diagrama de tuberías e instrumentos.**Figure 4.** Diagram of pipes and instruments.

Fuente: el autor

repeticiones hechas se apaga el sistema y se recircula el agua utilizada que se encuentra en el tanque T-1 con la bomba sumergible P-1, para calentarla nuevamente e iniciar el ciclo una vez más a una temperatura diferente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos tomados de las temperaturas de bulbo

seco y bulbo húmedo en la entrada y la salida de la torre de enfriamiento, se pueden determinar todas las propiedades del aire en las corridas utilizando la carta psicrométrica para después calcular el coeficiente global de transferencia de masa ($K_g a$) y otros cálculos de desempeño de la torre como el calor retirado, masa de agua evaporada y la eficiencia.

A. Cálculo del coeficiente $K_y a$ y otro indicadores de desempeño.

Para el cálculo del coeficiente volumétrico de transferencia de masa ($K_y a$) se utilizó el método de Merkel el cual se basa en una serie de asunciones para reducir la solución a un cálculo simple, una de las cuales es simplificar la transferencia de calor y masa a una diferencia de entalpía despreciando los efectos de la evaporación del agua en el proceso como se ve en la ecuación 6.

$$Me_M = \frac{K_y a V}{L'} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C p_w dT_w}{h_{yi} - h_y} \quad (6)$$

Donde,

Me_M , es el número de Merkel.

L' , es el flujo másico de agua.

$K_y a V$, es el coeficiente volumétrico global de transferencia de calor y masa

h_{yi}, h_y , son las entalpías de la mezcla aire-agua en la interface y en los puntos de referencia de la torre respectivamente.

$C p_w$, es el calor específico del agua.

T_w , es la temperatura del agua.

Para obtener la solución de $K_y a$ se debe resolver la integral (K_m) también conocida como índice global de desempeño o número de unidades de difusión ecuación (7).

$$K_m = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT_w}{h_{yi} - h_y} \quad (7)$$

Donde:

$$h_{yi} = 0,0041T_w^3 - 0,2751T_w^2 + 10,801T_w - 86,28 \quad (8)$$

y h_y es la línea de operación que va variando con cada experimento que se realiza ya que las temperaturas de entrada y salida cambian además de la relación L'/G' . Luego obtenemos la ecuación (9) de (6) para cambiar la variable de volumen por la de longitud del

$$K_y a = \frac{L' C p_w K_m}{Z} \quad (9)$$

empaque. Debido a las simplificaciones del método de Merkel es necesario medir la eficiencia de la torre de enfriamiento, en la cual se tienen en cuenta el rango y la aproximación (*approach*). El rango es la diferencia entre la temperatura de entrada del agua a la torre y la de salida, y la aproximación es la diferencia entre la temperatura de salida del agua de la torre y la temperatura de bulbo húmedo ambiente.

La eficiencia de la torre de enfriamiento, ver ecuación (10), es la relación entre el rango de operación y rango

ideal, el cual sería la diferencia entre la temperatura del agua de entrada y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

$$\varepsilon (\%) = \frac{\text{Rango}}{\text{Rango} + \text{Aprox.}} * 100 = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_{wb}} * 100 \quad (10)$$

Donde,

T_i, T_o , son las temperaturas de entrada y salida del agua respectivamente.

T_{wb} , es la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

B. Conductividad térmica de los materiales de empaque

Los valores de la conductividad de los materiales de los empaques se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Conductividad térmica para cada material de empaque.

Table 4. Thermal conductivity for each tower packing.

Material	k , Conductividad térmica (W/K m)
Acrílico	0.2
Aluminio	209.3
Hierro	80.2
Madera	0.13
Vidrio	0.8

El empaque de aluminio tiene un espesor de 1 mm de aluminio y en el interior del empaque hay vidrio, por lo que la conductividad térmica del empaque de aluminio se determina como una pared compuesta.

Figura 5. Esquema de empaque de aluminio con interior de vidrio tipo salpicadura.

Figure 5. Aluminum splash type packing scheme with glass inside.



Fuente: el autor

De la ecuación de Fourier para la transferencia de calor se tiene que:

$$Q = \frac{kA}{L} \Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (11)$$

Para la pared compuesta de estudio en la Figura 5, si se considera una k del empaque R viene siendo:

$$R = \frac{L_{\text{empaque}}}{k_{\text{empaque}} A} = 2 \frac{L_{Al}}{k_{Al} A} + \frac{L_{\text{vidrio}}}{k_{\text{vidrio}} A} \quad (12)$$

Donde:

$$k_{Al} = 209.3 \text{ W/K m}; k_{vidrio} = 0.8 \text{ W/K m}; L_{empaquet} = 22 \text{ mm}; L_{Al} = 1 \text{ mm}; L_{vidrio} = 20 \text{ mm}.$$

Reemplazando y despejando tenemos:

$$k_{empaquet} = 0.88 \text{ W/K m} \quad (13)$$

C. Análisis estadístico de resultados

Después de calcular los valores del coeficiente global de transferencia de masa ($K_y a$) se empleó un análisis estadístico para determinar el efecto de las variables L'/G' , T_w y conductividad térmica (k) del empaque frente al valor de $K_y a$. A partir de los resultados de la literatura, se realizó una regresión lineal utilizando los logaritmos de las variables con el fin de obtener toda la información estadística pertinente del modelo. La ecuación (14) muestra la semejanza de la ecuación de Kloppers [17] en su tesis doctoral, ver ecuación (3), con la diferencia de que no se tuvo en cuenta la altura de empaque sino la conductividad del material y además las variables de flujo de aire y agua se relacionaron en una sola que es el L'/G' .

$$K_y a = c_1 \left(\frac{L'}{G'} \right)^{c_2} (T_w i)^{c_3} (k_{empaquet})^{c_4} \quad (14)$$

En la tabla 5 se muestra los factores trabajados junto con sus respectivos niveles. Una repetición fue hecha para un total de 200 experimentos. La tabla 6 muestra el análisis de varianza obtenido como también la ecuación de regresión (15).

Tabla 5. Factores y niveles estudiados.

Table 5. Factors and levels studied.

L/G	$T_{in}, ^\circ C$	$K, \text{ W/m K}$
0,2	40	0,13
0,4	42	0,2
0,6	44	0,88
0,8	46	80,2
1	48	

Tabla 6. Análisis de varianza de la regresión lineal para $\log(K_y a)$

Table 6. Analysis of variance of the lineal regression for $\log(K_y a)$

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor P
Regresión	3	1,80324	0,60108	215,08	0.000
Log L'/G'	1	1,53556	1,53556	549,45	0.000
Log T_w	1	0,02003	0,02003	7,17	0,008
Log $k_{empaquet}$	1	0,24766	0,24766	88,62	0.000
Error	196	0,54776	0,00279		
Total	199	2,35101			

$$\log K_y a = -0,978 + 0,3550 \log \left(\frac{L'}{G'} \right) + 0,357 \log(T_w) - 0,03184 \log(k) \quad (15)$$

El valor P de las variables $\log L'/G'$, $\log T_w$ y $\log k$ son inferiores a 0.05 por lo que todas tienen efecto significativo en el $K_y a$.

La ecuación (15) es llevada a la forma de la ecuación (14) y obtenemos:

$$K_y a = 0.1052 \left(\frac{L'}{G'} \right)^{0.3549} (T_w i)^{0.358} (k_{empaquet})^{-0.03184} \quad (16)$$

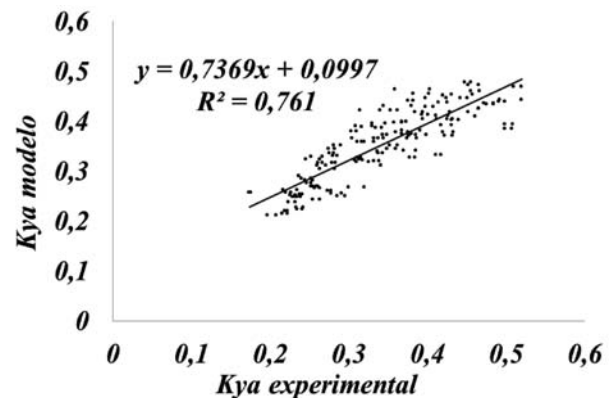
de donde se muestra que $K_y a$ aumenta con el aumento de L'/G' y temperatura y con la disminución de la conductividad térmica del material.

A continuación, se presenta la figura 6 donde se muestra $K_y a$ obtenido del modelo anterior contra el $K_y a$ experimental a fin de encontrar el valor R^2 y observar el ajuste. El modelo resultante presentó un R^2 de 76,1 %, lo que puede atribuirse a la variabilidad de las variables flujo y temperatura.

Figura 6. Comparación de los datos de $K_y a$ obtenidos del modelo con los de los datos experimentales.

Figure 6. Comparison between data of $K_y a$ obtained from the model and from the experimental data.

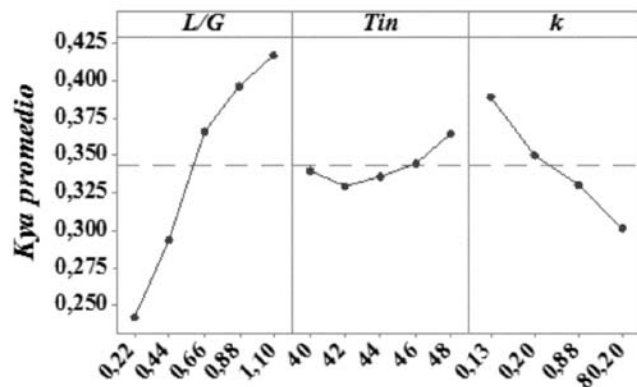
Fuente: el autor



En la figura 7 podemos observar que la relación L/G es la que tiene mayor efecto en $K_y a$ al igual que la conductividad térmica. Un incremento en L/G causa un incremento en $K_y a$ mientras que la conductividad térmica (k) causa un efecto inverso. La temperatura ejerce un efecto bajo, sin generar mayor impacto, disminuyendo en un sector y aumentando en el resto y esto puede deberse al fenómeno de que la temperatura de bulbo seco dentro de la torre puede estar disminuyendo y luego aumentando internamente cuando se disminuye la temperatura de entrada de agua manteniendo constante L/G algo que se debe al fenómeno de cual ejerce mayor efecto, la evaporación o la convección y que podría analizarse con el método de Mickley.

Figura 7. Efectos principales para $K_y a$. T_{in} (oC), k (W/K m)

Figure 7. Main effects for $K_y a$. T_{in} (oC), k (W/K m)



Fuente: el autor

Los resultados de $K_y a$ se relacionan con el agua evaporada, siendo necesario complementarlos con los resultados de la eficiencia obtenida para cada factor. En la tabla 7 se muestra el reporte estadístico del efecto de la temperatura, la conductividad térmica y la temperatura de entrada en la eficiencia de la torre. En ésta podemos ver que todos los factores tienen un efecto significativo, aunque el que más efecto muestra según la figura 8.a es el de la relación

L/G que a medida que aumenta, disminuye la eficiencia lo que indica que es importante trabajar a altos flujos de aire o a bajos flujos de agua caliente. Esto se debe a que el aire es el que está más frío y estaría en mayor proporción causando una mayor disminución de la temperatura en el agua. Además, observamos en la figura 8.a que la temperatura de entrada a pesar de que tiene un efecto más bajo que el de L/G hace que la eficiencia aumente cuando la temperatura de entrada aumenta debido a que el gradiente de temperatura aire – agua en la torre incrementa con la temperatura de entrada causando una mayor pérdida de calor en el líquido.

Analizando ahora el tipo de material vemos en la figura 8.a que para mejorar la eficiencia es necesario trabajar con empaques que tengan baja conductividad térmica como lo es la madera. El uso de empaques en las torres de enfriamiento incrementa el área de transferencia de calor y masa entre los fluidos, por lo tanto, el mecanismo principal de transferencia de energía es por convección y evaporación. Sin embargo, parte del calor también es transmitido a través del empaque por conducción térmica lo que incrementa la transferencia de calor a través de este para altos valores de conductividad térmica del material. Esto causa que el calor transmitido por conducción (ver figura 9) penetre nuevamente al agua por la parte inferior en contacto con el empaque aumentando su temperatura de salida afectando el desempeño de la torre de enfriamiento. Parte del calor que el agua debería transferir a la corriente ascendente de aire por convección y evaporación, se transfiere en realidad al empaque y este a su vez al agua nuevamente. Es por esto que los rellenos de materiales con conductividad térmica elevada (hierro y aluminio) presentan una eficiencia menor que los materiales aislantes térmicos (acrílico y madera).

En la figura 8b. vemos el efecto de las interacciones de los factores en la eficiencia. Para obtener los valores más altos de eficiencia es necesario utilizar valores bajos de la relación de L/G y valores bajos de conductividad térmica K . También vemos que cuando incrementamos la temperatura de entrada junto con una disminución de L/G

Tabla 7. Análisis de varianza para la eficiencia.

Table 7. Analysis of variance for the efficiency.

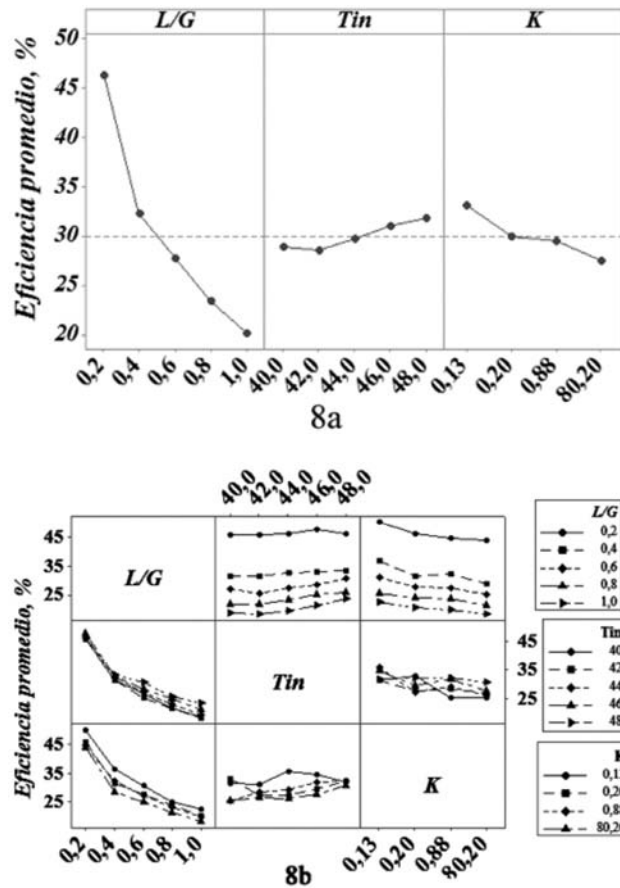
Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor P
L/G	4	16667.7	4166.93	10365.13	0.000
T_{in}	4	315.2	78.79	195.98	0.000
K	3	811.5	270.50	672.86	0.000
$L/G * T_{in}$	16	95.6	5.97	14.86	0.000
$L/G * K$	12	90.3	7.53	18.72	0.000
$T_{in} * K$	12	623.7	51.97	129.28	0.000
$L/G * T_{in} * K$	48	406.2	8.46	21.05	0.000
Error	100	40.2	0.40		
Total	199	19050.3			

la eficiencia aumenta con la excepción del límite cuando L/G es 0.2 ya que la cantidad de aire que esto demanda desprecia el efecto de la temperatura de entrada.

Como resultado podemos decir que es propicio trabajar a bajos valores de L/G , con empaques de materiales con baja conductividad térmica y con altas diferencias de temperatura agua – aire.

Figura 8. Gráfica de efectos principales para la eficiencia (a). Gráfica de interacciones para la eficiencia (b). T_{in} (oC), k (W/K m).

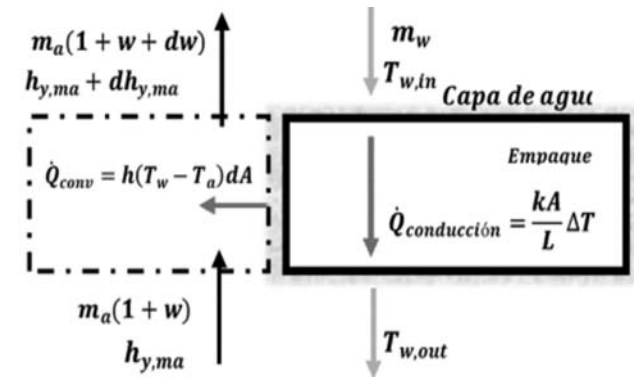
Figure 8. Main effect plot for efficiency (a). Interaction plot for efficiency (b). T_{in} (oC), k (W/K m).



Fuente: el autor

Figura 9. Esquema de la transferencia de calor por conducción en la zona de empaque.

Figure 9. Scheme of the heat transfer by conduction in the packing zone.



Fuente: el autor

Luego del anterior análisis, al comparar la figura 7 con la figura 8a. es necesario considerar la cantidad de agua evaporada. Si bien es importante la eficiencia, también es importante la cantidad de agua evaporada por lo que debe haber un equilibrio debido a las muchas pérdidas que se pueden obtener. Bajos valores de L/G sería lo ideal debido a que se obtiene la mayor eficiencia y la menor cantidad de agua evaporada y ayudaría aún más el trabajar con empaques con conductividad térmica alta que aun cuando tiende a disminuir la eficiencia el impacto no es tan fuerte como en la cantidad de agua evaporada.

Por último, en la tabla 8, se puede observar que el empaque tipo película tiene una eficiencia superior al tipo salpicadura hasta un 30% comparado con respecto al mismo material que fue el acrílico, debido al aumento en el área superficial (350%) causado por el cambio de forma. Como podemos observar este empaque obtuvo el valor mayor de $K_y a$ causando la mayor cantidad de agua evaporada y a pesar de que se obtuvo un incremento notable en la eficiencia con respecto a los demás tipos de empaque, también se obtuvo un incremento muy grande en el $K_y a$ demostrando la importancia de hacer balances

Tabla 8. Coeficiente volumétrico global de transferencia de masa $K_y a$ y eficiencia promedio para cada tipo de empaque.

Table 8. Total volumetric mass transfer coefficient $K_y a$ and average efficiency for each type of packing.

Tipo de empaque	k , Conductividad térmica (W/Km)	Coeficiente $k_y a$ promedio	Eficiencia promedio (%)
Acrílico (película)	0.20	0,5698	42,81
Madera (salpicadura)	0.13	0,3893	32,99
Acrílico (salpicadura)	0.20	0,3503	29,79
Aluminio (salpicadura)	0.88	0,3298	28,48
Hierro (salpicadura)	80.2	0,3016	27,47

económicos que permitan saber con cuanta pérdida agua se puede trabajar y así escoger el empaque adecuado.

4. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se encontró que la relación L'/G' , la conductividad térmica k , y la temperatura de entrada del líquido caliente T_{in} , tienen un gran efecto en el coeficiente volumétrico global de transferencia de masa $K_y a$ el cual está directamente relacionado con la cantidad de agua evaporada. $K_y a$ incrementa para incrementos de L'/G' , mientras que disminuye con incrementos de conductividad térmica. Por otro lado, $K_y a$ también aumenta con incrementos en la temperatura de entrada, sin embargo, esto no sucede a temperaturas bajas.

- Conjuntamente, la eficiencia también se ve altamente afectada por los factores mencionados. Para incrementos en L'/G' la eficiencia disminuye debido a que el gas estaría en mayor proporción causando un enfriamiento rápido por transferencia de calor sensible.

- La eficiencia disminuye al poner en contacto el líquido con empaques con conductividad térmica alta como los metales tal como el hierro debido al efecto de la transmisión de calor al empaque por conducción.

- La eficiencia aumenta a medida que la temperatura de entrada aumenta debido a que el gradiente de temperatura aire – agua en la torre incrementa con la temperatura de entrada causando una mayor razón de pérdida de calor en el líquido.

- Se obtuvo una correlación no lineal de $k_y a$ con respecto a la relación L'/G' , la conductividad térmica k , y la temperatura de entrada del líquido caliente T_{in} . Esta tiene en cuenta el término de la conductividad térmica k siendo más efectiva al considerar el tipo de empaque de la torre.

- Para este tipo de análisis de torres es necesario determinar la eficiencia como también la cantidad de agua evaporada debido a las muchas pérdidas que se pueden obtener. En la interacción de los factores vemos que es recomendable trabajar a bajas relaciones de L/G con empaques con conductividad térmica alta. Este último aun cuando tiende a disminuir la eficiencia, su efecto no es tan fuerte como el que causa en la cantidad de agua evaporada.

- El aumento del área superficial de los empaques hasta un 350% puede mejorar altamente la eficiencia, pero a su vez puede hacer que se evapore mucha agua por lo que es necesario hacer balances económicos que permitan saber con cuanta pérdida agua se puede trabajar y así escoger el empaque adecuado.

REFERENCIAS

[1] C. Jingyu, L. Wuquan, and Z. Jingwei, "Research on applying dry cooling technology in conventional island of ap1000 nuclear power in china," in 17th IAHR International Conference on Cooling Tower and Heat Exchanger, Queensland, Australia 2015, pp. 101-108.

[2] Y. An, J. Feng, and L. Li, "Technical research and economic analysis for cooling tower with water collecting device of 1000 mw coal-fired power plant," in 17th IAHR International Conference on Cooling Tower and Heat Exchanger, The University of Queensland, 2015, pp. 13-20.

[3] S. V. Bedekar, P. Nithiarasu, and K. N. Seetharamu, "Experimental investigation of the performance of a counter-flow, packed-bed mechanical cooling tower," *Energy*, vol. 23, pp. 943-947, 1998.

[4] W. M. Simpson and T. K. Sherwood, "Performance of small mechanical draft cooling towers," *Am Soc Refrig Eng* vol. 52, pp. 535-43; 574-576, 1946.

[5] N. W. Kelly and L. K. Swenson, "Comparative performance of cooling tower packing arrangements," *Chemical Engineering Progress*, vol. 52, 1956.

[6] H. J. Lowe and D. G. Christie, "Heat transfer and pressure drop data on cooling tower packings, and model studies of the resistance of natural draft towers to airflow," presented at the International Heat Transfer Conference, Colorado, 1961.

[7] J. C. Kloppers and D. G. Kroger, "Loss coefficient correlation for wet-cooling tower fills," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 2201-2211, 2003.

[8] J. C. Kloppers and D. G. Kroger, "Refinement of the Transfer Characteristic Correlation of Wet-Cooling Tower Fills," *Heat Transfer Engineering*, vol. 26, pp. 035-041, 2005.

[9] F. Gharagheizi, R. Hayati, and S. Fatemi, "Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 277-280, 2007.

[10] J. C. Kloppers and D. G. Kroger, "A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counter-flow wet-cooling towers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 765-777, 2005/2 / 2005.

[11] A. Mirabdollah Lavasani, Z. Namdar Baboli, M. Zamanizadeh, and M. Zareh, "Experimental study on the thermal performance of mechanical cooling tower with rotational splash type packing," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 530-538, 11 / 2014.

[12] T. Ning, D. Chong, M. Jia, J. Wang, and J. Yan, "Experimental investigation on the performance of wet cooling towers with defects in power plants," *Applied Thermal Engineering*, vol. 78, pp. 228-235, 3/5 / 2015.

[13] P. Shahali, M. Rahmati, S. R. Alavi, and A. Sedaghat, "Experimental study on improving operating conditions of wet cooling towers using various rib numbers of packing," *International Journal of Refrigeration*, vol. 65, pp. 80-91, 5 / 2016.

[14] A. K. M. Mohiuddin and K. Kant, "Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part II: selection and tower characteristics," *Int. J. Refrig*, vol. 19, pp. 52-60, 1996.

[15] F. Merkel, "Evaporative cooling," *Journal of the Association of German Engineers*, vol. 70, pp. 123-128, 1925.

[16] M. Lemouari, M. Boumaza, and A. Kaabi, "Experimental analysis of heat and mass transfer phenomena in a direct contact evaporative cooling tower," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1610-1617, 2009.

[17] J. C. Kloppers, "A critical evaluation and refinement of the performance prediction of wet-cooling towers," Doctoral Thesis, University of Stellenbosch, 2003.