

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL BINOMIO SEPARADOR DE GOTAS-SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN TORRES DE REFRIGERACIÓN

RUIZ RAMÍREZ, Javier ⁽¹⁾; LUCAS MIRALLES, Manuel ⁽¹⁾, MARTÍNEZ BELTRÁN, Pedro J ⁽¹⁾

SÁNCHEZ KAISER, Antonio ⁽²⁾; ZAMORA PARRA, Blas ⁽²⁾, VIEDMA ROBLES, Antonio ⁽²⁾

j.ruiz@umh.es

⁽¹⁾Universidad Miguel Hernández de Elche, Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía, Edificio Quórum V, Av. Del Ferrocarril, s/n., 03202, Elche (Alicante), España.

Tel.: 965 222 433, Fax: 966 658 979.

⁽²⁾Universidad. Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Campus Muralla del Mar, C/ Dr Fleming, s/n – 30202 Cartagena (Murcia) España,

Tel.: 968 325 984, Fax: 968 325 999.

RESUMEN

Torres de refrigeración y condensadores evaporativos son dispositivos cuya finalidad es evacuar calor en instalaciones. Su principio de funcionamiento se basa en el intercambio de energía y masa entre una corriente de agua y una de aire. Éste último al no estar saturado, hace que se evapore una pequeña parte de agua y se enfríe el resto. A su vez, la corriente de aire captura pequeñas gotas de agua, que no han sufrido cambio de fase, y salen al exterior del equipo. La cantidad de agua arrastrada en una torre de refrigeración depende fundamentalmente del binomio sistema de distribución-separador de gotas. En las torres de refrigeración se incorporan separadores de gotas con el fin de minimizar las pérdidas de agua. El funcionamiento de estos separadores se basa en el cambio de dirección del flujo de aire cuando éste atraviesa la sección del separador. Por su parte, los sistemas de distribución son los encargados de distribuir el agua caliente por encima del relleno. Fundamentalmente se pueden clasificar en sistemas por gravedad y sistemas a presión. El principal objetivo de este trabajo es analizar experimentalmente el comportamiento térmico de una torre de refrigeración instalada en una planta piloto cuando se emplean sistemas de distribución de agua diferentes (un sistema que funciona a presión y otro por gravedad) con distintos separadores de gotas comerciales. El trabajo experimental permitirá conocer la influencia que tiene el binomio separadores de gotas-sistema de distribución en diferentes aspectos de funcionamiento de la torre.

Palabras clave: Torres de refrigeración, binomio sistema de distribución-separador de gotas, comportamiento térmico.

1. Introducción

El uso de sistemas de climatización en edificios está cobrando, cada vez más, una importancia originada por la calidad de vida y los niveles de confort presentes en la sociedad actual. En la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre, relativa a la eficiencia energética de los edificios se recoge que el sector de la vivienda y de los servicios, compuesto en su mayoría por edificios, absorbe más del 40% del consumo final de energía en la Comunidad y se encuentra en fase de expansión, tendencia que previsiblemente hará aumentar el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones de dióxido de carbono. A la vista de esta Directiva, se comprende la importancia que la Unión Europea concede al ahorro energético en el sector terciario. El aire acondicionado participa, como responsable directo, del incremento de la demanda energética del sector terciario. El crecimiento de la potencia instalada para aplicaciones de aire acondicionado, ha causado en España un incremento del pico de consumo eléctrico en el periodo estival llegando a un valor similar al consumo pico registrado en invierno. Entre las alternativas prácticas que se pueden emplear como sistemas de condensación para evacuar el calor del ciclo frigorífico mencionado anteriormente cabe destacar aquellos que emplean el aire atmosférico como medio de condensación (aerorefrigeradores) y sistemas que emplean agua en recirculación para efectuar la misma función, entre los que destacan las torres de refrigeración. Como diferencia fundamental entre la condensación por agua y la condensación por aire, puede indicarse que la condensación por agua origina menor presión de condensación en el sistema de producción de frío, con lo que a igualdad del resto de condiciones de operación, el consumo energético y el coste de funcionamiento del equipo es menor. Además, asociado a la peor eficiencia energética de los sistemas condensados por aire se encuentra el incremento de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Las torres de refrigeración son dispositivos eficaces y económicos para evacuar calor en instalaciones. El principio de funcionamiento de las torres de refrigeración se basa en la pulverización de agua sobre una superficie a través de la que se hace circular una corriente de aire, que al no estar saturado, hace que se evapore una pequeña parte de agua y se enfríe el resto. El agua enfriada cae dentro de la bandeja de la torre y el calor extraído del agua se evacua con la corriente de aire descargada al exterior. Como resultado de este proceso, se incorporan a la corriente de aire pequeñas gotas de agua que serán arrastradas en parte fuera de la torre de refrigeración. A esta emisión se le conoce como arrastre y es independiente del agua que se evapora en la torre como consecuencia del proceso de transferencia de calor y masa que en ella tiene lugar. Las emisiones de gotas de agua de las torres de refrigeración son indeseables por diversos motivos, como pérdida de agua, problemas de corrosión en equipos, formación de hielo en las zonas cercanas a la instalación en períodos invernales o incluso degradación de cultivos del entorno por deposición de sales, pero principalmente porque representan la emisión de productos químicos y microorganismos a la atmósfera. En este sentido y sin lugar a dudas, las sustancias patógenas más conocidas son las múltiples especies de la bacteria conocida comúnmente como legionela. Estas bacterias tienden a desarrollarse bien en el agua presente en las torres de refrigeración dado su rango de temperaturas. De este modo, cualquier persona próxima a la torre puede estar expuesta al arrastre, inhalar aerosoles que contengan la bacteria legionela y resultar infectada con la enfermedad. Son numerosos los brotes de legionelosis asociados a torres de refrigeración, especialmente en la zona climática del sureste español (Murcia 2001, Torreveja 2005, Alcoy 1991-2011).

La cantidad de agua arrastrada en una torre de refrigeración depende fundamentalmente del binomio sistema de distribución-separador de gotas. En torres de refrigeración se incorporan unos deflectores denominados separadores de gotas con el fin de minimizar las pérdidas de agua. El funcionamiento de estos separadores se basa en el cambio de dirección del flujo de aire cuando este atraviesa la sección del separador (impacto inercial). De este modo, la mayoría de las gotas de agua que incorpora el flujo de aire son retenidas y devueltas al interior de la torre. Por su parte, los sistemas de distribución son los encargados de distribuir el agua caliente por encima del relleno. Fundamentalmente se pueden clasificar en sistemas por gravedad y sistemas a presión. En los sistemas por gravedad la distribución se realiza bombeando el agua a unas balsas abiertas que sirven de aporte a las toberas rociadoras o bien trabajan mediante rebose en un canal de distribución. En los sistemas a presión el agua se

conduce por el interior de tuberías hasta las boquillas de pulverización. Como consecuencia del mayor nivel de presión al que trabajan las boquillas de pulverización en el caso de distribución a presión consiguen un menor diámetro en las gotas generadas. No obstante, además de afectar a la generación de arrastre, los componentes de torres de refrigeración (sistemas de distribución y separadores de gotas en concreto) tienen influencia sobre los procesos de transferencia de calor y masa que tienen lugar en una torre de refrigeración. En este sentido, la eficiencia térmica de la torre de refrigeración depende fundamentalmente del relleno, el cual está diseñado, bien para la creación de láminas de agua, bien para la formación de pequeñas gotas con objeto de aumentar el tiempo y la superficie de intercambio para favorecer la evaporación de una mayor cantidad de agua. No obstante el sistema de distribución y el separador de gotas también juegan un papel importante en la cantidad de calor evacuada por la torre de refrigeración. El primero se encarga de exponer el agua a la corriente de aire. En función de cómo se realice dicha distribución habrá una cantidad de superficie expuesta para el intercambio de calor u otra. Por su parte, la presencia de un separador de gotas reduce el flujo másico de aire que atraviesa la torre, disminuyendo así su capacidad de enfriamiento. Este efecto puede ser muy perjudicial en torres de refrigeración de tiro natural puesto que a través de ellas únicamente pasa el flujo producido por la diferencia de densidades entre la entrada y la salida de la torre. En torres de refrigeración de tiro mecánico, la reducción de la capacidad de la torre causada por la pérdida de presión adicional introducida por el separador puede compensarse con un aumento en el consumo del ventilador.

Existen en la literatura científica diversos trabajos que abordan el estudio de la influencia de componentes de torres de refrigeración en el comportamiento térmico de las mismas. En lo relativo al relleno, Thomas y Houston [1] y Lowe y Christie [2] obtuvieron correlaciones para los coeficientes de transferencia de calor y masa con los flujos másicos de agua y aire como variables independientes en torres de refrigeración con distintos tipos de relleno. Kelly y Swenson [3] estudiaron la transferencia de calor y la pérdida de presión para una torre de refrigeración equipada con rellenos de salpicadura. Muestran los resultados en función de la relación entre los flujos másicos de agua y aire, y concluyeron que factores adicionales a tener en cuenta eran la altura del relleno, su geometría y la temperatura de entrada del agua. Goshayshi y Missenden [4] estudiaron el coeficiente de transferencia de masa y la pérdida de presión para rellenos lisos y rugosos en torres de refrigeración atmosféricas.

Diversos autores han desarrollado correlaciones para los coeficientes de transferencia de calor y masa en función del cociente entre flujo másico de agua y flujo másico de aire: Bedekar et al. [5] para una torre de refrigeración de tiro mecánico a contracorriente equipada con un relleno de tipo laminar, Milosavljevic y Heikkila [6] en dos prototipos de torres de refrigeración con siete rellenos laminares diferentes, Gharagheizi et al. [7] para dos tipos de rellenos laminares, y Lemouari et al. [8] para una torre de tiro forzado con un relleno vertical en dos regímenes de funcionamiento. Elsarrag [9] llevó a cabo un estudio experimental para evaluar los coeficientes de transferencia de calor y masa en torre de refrigeración de tiro inducido con un relleno cerámico. Obtiene los coeficientes de transferencia como función del cociente flujo másico de agua/flujo másico de aire y de un grupo adimensional basado en la diferencia entre las entalpías del aire y del aire saturado a la temperatura del agua, que marca el grado de dificultad de la transferencia de masa.

Con respecto al separador de gotas Lucas et. al [10] realizó trabajos donde se evalúa la capacidad de enfriamiento de una torre realizando ensayos con seis tipos distintos de separadores de gotas y con un sistema de distribución de agua por presión. Para llevar a cabo el trabajo experimental se emplea un amplio rango de relaciones entre el flujo másico de agua y de aire. Dado que se obtienen niveles diferentes de la característica térmica de la torre con los distintos separadores para las mismas relaciones de flujo másico de agua y aire, se demuestra experimentalmente que la configuración física del separador de gotas influye en el comportamiento térmico, más allá de la reducción del flujo másico de aire. Este resultado se justifica a través de la superficie mojada que presenta el separador de gotas, que se convierte en un volumen adicional de relleno que contribuye al intercambio de masa y energía. Además también desarrolla correlaciones de la característica termodinámica de la torre según ASHRAE, en términos del ratio flujo másico de agua/flujo másico de aire.

La principal conclusión que se obtiene de la revisión bibliográfica es que se dispone de múltiples estudios experimentales del comportamiento térmico de torres de refrigeración centrados en el efecto

que tiene el relleno y un trabajo basado en el efecto del separador de gotas. Sin embargo, no se han encontrado en la bibliografía trabajos experimentales relacionados con el efecto combinado que tiene el separador de gotas y el sistema de distribución de agua en el comportamiento térmico de la torre. En ese sentido, el objetivo del presente trabajo es determinar experimentalmente la influencia que tiene el sistema de distribución en el comportamiento térmico de una torre de refrigeración.

2. Método

2.1. Análisis matemático

El presente análisis matemático tiene su origen en el trabajo de Mohiuddin y Kant [11].

Considerando una torre de refrigeración con flujo a contracorriente y asumiendo que no hay resistencia para la transferencia de masa en la interfase agua-aire, no hay evaporación y que el flujo es vertical con el agua y aire fluyendo hacia abajo y hacia arriba respectivamente a través de la torre, se puede resolver flujo como si el problema fuese unidimensional. Cada partícula de agua se encuentra rodeada por una capa de aire saturado a la temperatura del agua. El aire se calienta y se satura a su paso por la torre. La transferencia de calor desde el agua al aire, se realiza en parte como calor sensible, y en parte en forma de calor latente. Ambos procesos fueron combinados por Merkel [12] en una sola ecuación:

$$\dot{m}_w \cdot C_{pw} \cdot dt_w = h_D \cdot A_V \cdot dV \cdot (h_{s,w} - h) = \dot{m}_a \cdot dh \quad (1)$$

Separando variables e integrando:

$$\frac{h_D \cdot A_V \cdot V}{\dot{m}_w} = C_{pw} \int_{t_{w,1}}^{t_{w,2}} \frac{dt_w}{(h_{s,w} - h)} \quad (2)$$

$$\frac{h_D \cdot A_V \cdot V}{\dot{m}_a} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{(h_{s,w} - h)} \quad (3)$$

A pesar que el término situado a la derecha de las ecuaciones (2) y (3) contiene solo cantidades termodinámicas para el proceso de enfriamiento que sólo dependen de las condiciones de entrada y salida del aire presente en la torre, el término situado a la izquierda es independiente de las mismas y se determina a través de las condiciones de diseño de la torre h_D , A_V y V , y los flujos máscicos de aire y agua respectivamente.

El cociente $h_D A_V V/\dot{m}_w$ se conoce también como KaV/L o característica térmica de la torre (CT) y es el término que representa el comportamiento térmico de la torre de refrigeración más ampliamente aceptado. Por su parte el término $h_D A_V V/\dot{m}_a$ o KaV/G es conocido como NTU o número de unidades de transferencia.

$$CT = \frac{h_D \cdot A_V \cdot V}{\dot{m}_w} = C_{pw} \int_{t_{w,1}}^{t_{w,2}} \frac{dt_w}{(h_{s,w} - h)} \quad (4)$$

$$NTU = \frac{h_D \cdot A_V \cdot V}{\dot{m}_a} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{(h_{s,w} - h)} \quad (5)$$

$$CT = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w} \cdot NTU \quad (6)$$

Señalar que la definición del NTU y de la característica térmica de la torre no es homogénea en la literatura intercambiando ambos términos. Por ejemplo, lo que la ecuación (4) define como característica termodinámica, en ASHRAE [13] aparece como NTU y otras fuentes directamente trabajan con el término KaV/L . Sin embargo, en este capítulo se ha tomado como referencia las definiciones comentadas anteriormente.

La resolución analítica de la integral mostrada en la ecuación (2) es inviable por no disponer de funciones integrables para la entalpía del aire y para la entalpía del agua en condiciones de saturación a la temperatura del agua. Por este motivo deben buscarse alternativas para resolver la integral característica. Aplicando el método de integración numérica de Tchebyshev, recomendado por CTI [14], la ecuación (4) se transforma en:

$$C_{pw} \int_{t_{w,1}}^{t_{w,2}} \frac{dt_w}{(h_{s,w} - h)} = C_{pw} \frac{t_{w,2} - t_{w,1}}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{1}{(h_{s,w} - h)_j} \quad (7)$$

Por lo que finalmente se tiene:

$$CT = C_{pw} \frac{t_{w,2} - t_{w,1}}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{1}{(h_{s,w} - h)_j} \quad (8)$$

El procedimiento para calcular la característica térmica de la torre usando el método de Tchebyshev se describe paso por paso en la Tabla 1.

Tabla 1: Procedimiento de cálculo para la característica térmica.

| Temperatura del agua (t_w) | Entalpía del aire saturado a la temperatura del agua ($h_{s,w}$) | Entalpía del aire (h) | $1/(h_{s,w}-h)_j$ |
|---|--|-------------------------------|--------------------------|
| $t_{w,2}$ | | h_1 | |
| $t_A = t_{w,2} + 0,1 (t_{w,1} - t_{w,2})$ | $h_{s,w}(t_A)$ | $h_A = h_1 + 0,1 (h_2 - h_1)$ | $1/(h_{s,w}(t_A) - h_A)$ |
| $t_B = t_{w,2} + 0,4 (t_{w,1} - t_{w,2})$ | $h_{s,w}(t_B)$ | $h_B = h_1 + 0,4 (h_2 - h_1)$ | $1/(h_{s,w}(t_B) - h_B)$ |
| $t_C = t_{w,2} + 0,6 (t_{w,1} - t_{w,2})$ | $h_{s,w}(t_C)$ | $h_C = h_1 + 0,6 (h_2 - h_1)$ | $1/(h_{s,w}(t_C) - h_C)$ |
| $t_D = t_{w,2} + 0,9 (t_{w,1} - t_{w,2})$ | $h_{s,w}(t_D)$ | $h_D = h_1 + 0,9 (h_2 - h_1)$ | $1/(h_{s,w}(t_D) - h_D)$ |
| $t_{w,1}$ | | h_2 | |

2.2. Instalación experimental

La instalación experimental está localizada en la cubierta del edificio Torrepinet, en el Campus de Elche de la Universidad Miguel Hernández. El elemento central de la planta piloto es la torre de refrigeración cuyas dimensiones son 653 x 525 x 2597 mm. El relleno es de tipo panal de abeja. La carcasa es de fibra de vidrio con resina de poliéster. El ventilador, de tipo axial, está acoplado a un variador de frecuencia que modifica el gasto másico de aire que atraviesa la torre. Por su parte, el flujo másico de agua puede variarse mediante una válvula de equilibrado. La carga térmica se simula mediante resistencias eléctricas situadas en el circuito hidráulico. La Figura 1 muestra esquemáticamente la instalación experimental.

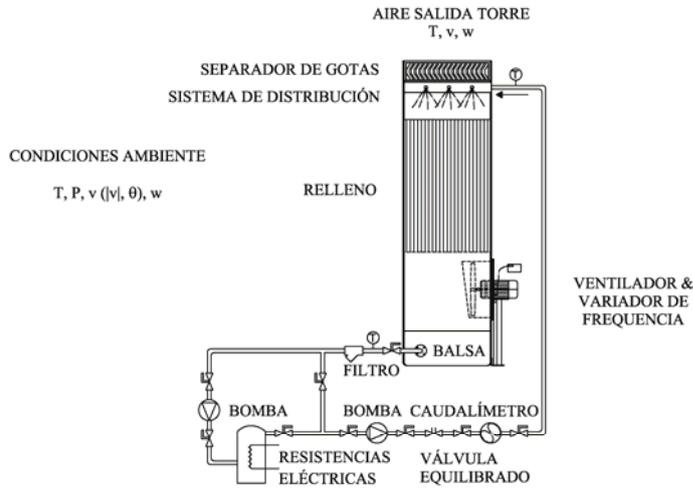


Figura 1: Diagrama esquemático de la instalación experimental.

La eficiencia térmica de la torre de refrigeración se ha estudiado experimentalmente para seis separadores de gotas (denotados con letras de la A a la F) y sin separador de gotas, y para dos sistemas de distribución diferentes (sistema por presión y sistema por gravedad). Ambos se muestran en la Figura 2.

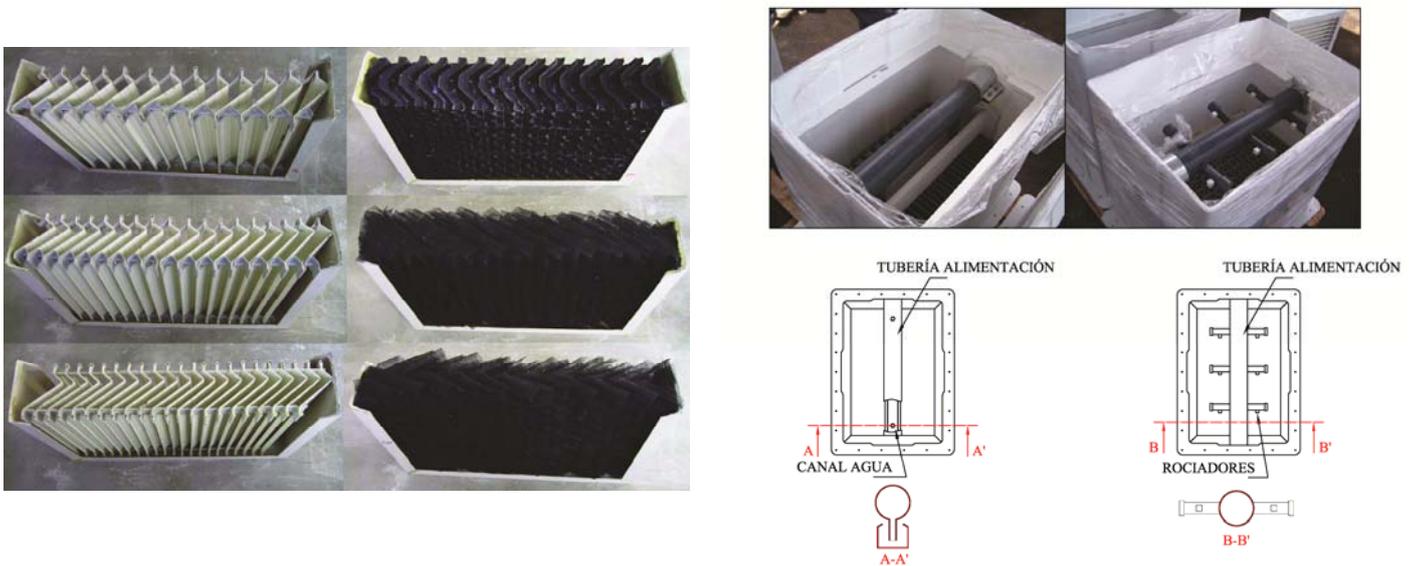


Figura 2: Izquierda: Separadores de gotas empleados en el estudio experimental. De arriba abajo y de izquierda a derecha Separador A, B, C, D, E y F. Derecha: Sistemas de distribución ensayados. Sistema por gravedad (izquierda) y sistema por presión (derecha).

Los separadores A, B y C corresponden a separadores de lamina construidas en fibra y montadas sobre un marco de material plástico resistente a las condiciones ambientales. Estos separadores tienen 13, 18 y 22 lamina respectivamente. El separador tipo D está construido de material plástico. La forma de base es un hexágono regular que se extruye con cuatro cambios de dirección. El separador tipo E está construido con malla plástica a rombos pequeños. La forma que tiene es la de una extrusión de un triángulo a lo largo de un eje inclinado unos 45° aproximadamente. El separador tipo F está constituido por la misma malla que el E. La diferencia respecto al separador E está en que se ha dividido en dos partes con la inclinación de la malla girada 180° a mitad de separador.

Por su parte los sistemas de distribución empleados se diferencian que el sistema de distribución de agua por gravedad (SDAG en adelante) consiste en una tubería principal que alimenta a una balsa abierta que opera por gravedad distribuyendo en agua en forma de lámina, mientras que en el sistema de distribución de agua por presión (SDAP) el agua es conducida hacia unas boquillas rociadoras donde se generan gotas de distintos tamaños.

La información registrada durante los ensayos por los sensores fue monitorizada por un sistema de adquisición de datos Agilent 34970.

2.3. Procedimiento de ensayo

Se realizaron un total de nueve ensayos para cada combinación de separador de gotas sistema de distribución fueron realizados (126 ensayos en total). Se fijaron tres niveles para el caudal másico de aire (25, 37,5 y 50 Hz) y otros tres niveles para el caudal másico de agua (0,72 1,083 y 1,44 l/s) para cumplir con este propósito.

Para determinar que un ensayo fuese válido, se tomó como referencia la norma UNE-EN 13741 [15], la cual especifica los límites a los cuales deben ajustarse las condiciones de un ensayo: El caudal de agua de circulación no debe variar más del 2%. La carga térmica no debe variar más del 5%. El salto térmico no debe variar más del 5%. Las lecturas de temperatura del aire pueden fluctuar durante el ensayo bajo los siguientes límites: Valor medio de la temperatura de bulbo húmedo: 1°C/hora. Valor medio de la temperatura media de bulbo seco: 3°C/hora. La velocidad del viento no debe exceder los siguientes límites: Velocidad media del viento: 3.5 m/s y Velocidad instantánea: 7 m/s.

3. Resultados y validación

3.1. Resultados

La Figura 3 muestra la variación experimental de la característica térmica de la torre de refrigeración con los seis separadores de gotas y cuando no había separador equipado para el SDAG. La incertidumbre experimental máxima y media para la CT y para el L/G, calculada de acuerdo a la guía ISO [16] con un nivel de confianza del 95% y usando las especificaciones de los sensores, es del 14,4% y del 6,6% respectivamente para la CT y del 3,7% y 3,3% para el L/G. Además de que la característica térmica de la torre disminuye a medida que aumenta el ratio de caudales másicos agua-aire, el hecho que el valor de la misma sea diferente para dos separadores de gotas distintos para un mismo valor de L/G, hace que se corroboren las conclusiones obtenidas por Lucas et al. [10], donde se evaluó la influencia del separador en los procesos de transferencia de calor y masa que tienen lugar en la torre de refrigeración.

En la Figura 4 se pueden observar los resultados experimentales correlacionados para ambos sistemas (gravedad y presión respectivamente). Si se comparan los resultados obtenidos con el SDAG con los obtenidos en el SDAP se puede verificar la mayor eficiencia de la torre cuando ésta opera con el SDAP equipado (Figura 5).

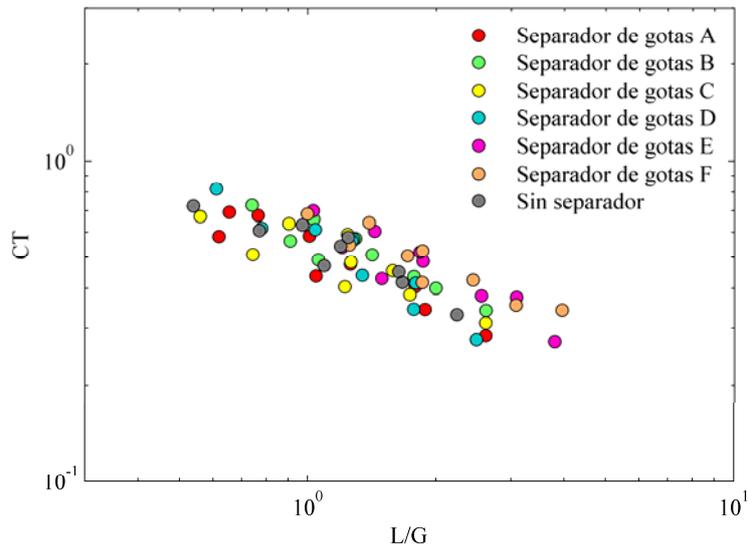


Figura 3: CT frente a L/G para los separadores ensayados y sin separador con el SDAG.

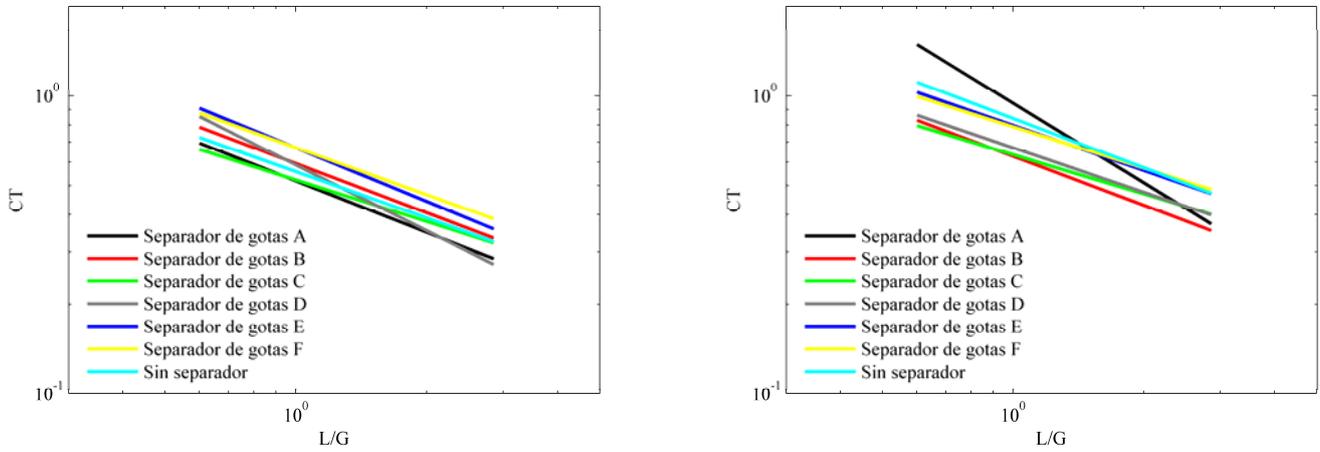


Figura 4: Correlaciones para la CT frente a L/G para los separadores ensayados y sin separador con el SDAG (izquierda) y el SDAP (derecha).

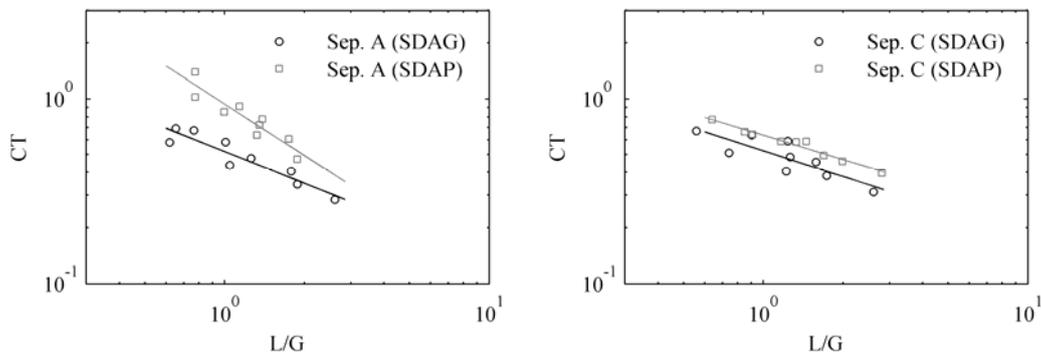


Figura 5: CT frente a L/G para los separadores ensayados y sin separador. Comparativa entre SDAG y SDAP. Separadores A y C.

Las diferencias en enfriamiento, medidas en tanto por cien, que se pueden conseguir en la torre empleando un sistema de distribución u otro se muestran en la Tabla 2. La diferencia media se ha calculado promediando la característica térmica para todos los L/G ensayados mientras que la diferencia máxima se obtiene para aquel ratio caudal másico agua-aire para el cual la CT alcanza una variación máxima entre sistemas.

Tabla 2: Diferencias media y máxima en términos de CT para los separadores ensayados con SDAG.

| | Diferencia máxima | Diferencia media |
|---------------|-------------------|------------------|
| Separador A | 53,25 | 38,66 |
| Separador B | 5,47 | 5,37 |
| Separador C | 19,44 | 18,35 |
| Separador D | 28,80 | 18,30 |
| Separador E | 22,69 | 18,34 |
| Separador F | 19,45 | 16,51 |
| Sin separador | 34,78 | 32,90 |

La modificación de la capacidad térmica de la torre con la instalación de diferentes separadores de gotas (Figura 3) puede justificarse a través de dos fenómenos físicos diferentes; el incremento del término A_V por un lado, y la variación del coeficiente h_D y por el otro. Ambos términos se encuentran presentes en la ecuación (4) y mientras que A_V hace referencia a la superficie de intercambio de masa y energía por unidad de volumen, el término h_D representa el coeficiente de transferencia de masa. Cuando un separador se moja debido al arrastre, éste se convierte en una superficie adicional de transferencia de calor y masa. Por otro lado, el patrón de flujo impuesto por el separador de gotas, afecta a la distribución de velocidades en el interior de la torre, y por tanto al coeficiente h_D (que depende fundamentalmente de la velocidad del aire).

La clasificación de separadores en términos de la CT centrándose en el primero de los criterios (separador mojado) sería la siguiente: Separadores E y F (debido a su mayor compacidad) seguido del separador D y los separadores de lamas C, B y A en este orden debido al decrecimiento del número de lamas quedando en último lugar el caso que se ensaya sin separador de gotas. Atendiendo al segundo de los criterios (alteración del flujo impuesta por el separador) la clasificación quedaría de la siguiente manera: Sin separador (el flujo no se ve alterado), separadores E y F (fabricados en malla de alambre), separador D (geometría tridimensional) quedando en último lugar los separadores A, B y C en este orden por su geometría claramente bidimensional y el incremento en el número de lamas. La importancia relativa de los fenómenos descritos previamente lleva a los diferentes comportamientos térmicos recogidos en la Figura 3. La torre alcanza su máxima capacidad térmica cuando los separadores E y F se encuentran equipados. Esto se produce debido a la mayor compacidad de estos separadores y la leve alteración que producen en el flujo. Si se centra ahora la atención en los separadores de lamas, se puede comprobar que para bajos valores de L/G la secuencia en términos de CT es $(B > A > C)$ mientras que para mayores valores de L/G la secuencia es $(B > C > A)$. Esto indica que el separador B es el separador con tipología de lamas que proporciona el mejor compromiso entre compacidad y alteración de flujo. Cuando los valores de L/G son altos y por tanto el arrastre también lo es, el fenómeno predominante es el de la compacidad. De ahí que en este caso el separador C presente un mejor comportamiento térmico que el A. Por otro lado, para bajos valores de L/G el efecto predominante es el contrario (alteración del flujo por el separador) y de ahí la secuencia obtenida $(A > C)$. En cuanto al separador D, éste experimenta un cambio de posición con respecto a tipología de lamas. Para bajos valores de L/G, el separador D presenta una eficiencia térmica mayor que los formados por lamas, tal y como se preveía de acuerdo a las hipótesis marcadas anteriormente. Sin

embargo, para valores de L/G altos donde predomina el arrastre, el separador D presenta un peor comportamiento, contrariamente a lo que se podía pensar por tener una mayor compacidad. Esta circunstancia sólo se puede justificar por el hecho de que a pesar de tener una mayor superficie que se pueda mojar, ésta se moja menos debido a la disposición de la misma con respecto al flujo. Por último y en respuesta a la posición intermedia que ocupa el experimento sin el separador de gotas, se puede concluir que la presencia de un separador no tiene necesariamente que empeorar el comportamiento térmico de la torre como se espera debido a la pérdida de presión introducida en el flujo. En este caso, la ausencia de separador mejora el coeficiente h_D al no alterar el flujo a la par que no se añade ninguna superficie adicional de intercambio de masa y energía.

3.2. Validación y correlación

La característica térmica de la torre correspondiente a diferentes condiciones de operación puede correlacionarse o bien en términos del ratio de flujos máxicos agua-aire o bien con ambos flujos por separado, tal y como recomienda ASHRAE [13].

$$CT = \frac{h_D \cdot A_v \cdot V}{\dot{m}_w} = c \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \right)^{-n} \quad (9)$$

$$CT = \frac{h_D \cdot A_v \cdot V}{\dot{m}_w} = c \cdot \dot{m}_w^{-n} \cdot \dot{m}_a^m \quad (10)$$

De las correlaciones anteriores, la que se muestra en la ecuación (9) se ha definido como “correlación L/G” ya que la CT sólo depende de este parámetro adimensional, mientras que a la que se presenta en la ecuación (10) se le hará referencia como “correlación L y G” ya que la CT se calcula a partir de cada uno de estos parámetros por separado. Con el doble objetivo de validar los resultados experimentales por un lado y de evaluar cuál de estas correlaciones se aproxima más a los mismos por el otro, se ha realizado una comparación entre ellas.

Para la comparativa se ha empleado como variable respuesta la temperatura de salida del agua de la torre (obtenida tanto experimentalmente como analíticamente con ambas correlaciones). Los resultados se muestran en la Tabla 3, y se puede comprobar que mientras la “correlación L/G” ofrece una desviación promedio máxima de 1,61% con respecto a los experimentales, la “correlación L y G” proporciona tan sólo un 0,95% de desviación. Las constantes c, n y m de las correlaciones de ASHRAE en términos de la CT frente a L/G en el primer caso y L y G en el segundo, obtenidas para los separadores de gotas ensayados con el sistema de distribución por gravedad, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3: Diferencias promedio (%) para cada uno de los separadores ensayados entre temperatura de salida del agua en la torre experimental y calculada para las correlaciones propuestas.

| | Correlación L/G | Correlación L y G |
|---------------|-----------------|-------------------|
| Separador A | 1,59 | 0,64 |
| Separador B | 1,12 | 0,62 |
| Separador C | 1,32 | 0,60 |
| Separador D | 1,22 | 0,75 |
| Separador E | 1,61 | 0,95 |
| Separador F | 1,11 | 0,51 |
| Sin separador | 1,04 | 0,63 |

Tabla 4: Constantes c y n obtenidas para la correlación L/G y c, n y m obtenidas para la correlación L y G en cada uno de los separadores.

| | Correlación L/G | | Correlación L y G | | |
|---------------|-----------------|-------|-------------------|-------|-------|
| | c | n | c | n | m |
| Separador A | 0,518 | 0,573 | 0,522 | 0,373 | 0,768 |
| Separador B | 0,593 | 0,549 | 0,612 | 0,370 | 0,739 |
| Separador C | 0,522 | 0,463 | 0,529 | 0,144 | 0,733 |
| Separador D | 0,586 | 0,733 | 0,601 | 0,507 | 0,960 |
| Separador E | 0,669 | 0,6 | 0,751 | 0,447 | 0,787 |
| Separador F | 0,670 | 0,525 | 0,726 | 0,316 | 0,686 |
| Sin separador | 0,557 | 0,516 | 0,565 | 0,322 | 0,766 |

A la vista de los resultados anteriores se puede concluir que las correlaciones propuestas por ASHRAE predicen bien el comportamiento térmico de la torre ya que los resultados calculados analíticamente tan sólo difieren en un máximo del 3% de los experimentales. Asimismo la “correlación L y G”, donde la CT se calcula a partir de los caudales máscos de agua y aire por separado, proporciona los mejores resultados.

4. Conclusiones

Este estudio ha permitido comprobar experimentalmente la influencia que tienen los elementos constructivos de torres de refrigeración en el comportamiento térmico de las mismas. Los experimentos se han realizado en una torre de refrigeración de tiro forzado cuando ésta se encuentra equipada con dos sistemas de distribución diferentes y seis separadores de gotas. Las conclusiones obtenidas se pueden resumir de la siguiente manera:

Se ha evaluado mediante el cálculo experimental de la CT que la configuración física de la distribución del agua en la torre por el sistema de distribución de agua influye en el comportamiento térmico de la torre. La CT de la torre siempre es mayor cuando el SDAP se encuentra equipado. Este comportamiento se ha justificado a través del aumento del término A_V cuando el tamaño de las gotas distribuidas por el sistema de distribución es menor.

La diferencia en enfriamiento de la torre entre separadores de gotas ha sido atribuida fundamentalmente a dos factores. Por un lado el hecho que los separadores se mojen debido al arrastre hace que éstos contribuyan a los procesos de calor y masa que tienen lugar en el interior de la torre convirtiéndose así en una especie de relleno adicional (aumento del término A_V). Por otro lado la variación del coeficiente de transferencia de masa h_D afecta a la característica térmica en función del patrón del flujo existente en el interior de la torre. El segundo efecto es predominante cuando la cantidad de agua arrastrada es despreciable, lo que ocurre cuando el SDAG se encuentra equipado. La presencia de un separador no tiene necesariamente que empeorar el comportamiento térmico de la torre como se espera debido a la pérdida de presión introducida en el flujo. En este caso, la ausencia de separador mejora el coeficiente h_D al no alterar el flujo a la par que no se añade ninguna superficie adicional de intercambio de masa y energía.

Las correlaciones propuestas han sido validadas en términos de la temperatura de salida obteniéndose unos valores máximos del 3% de diferencia entre la temperatura experimental y la calculada.

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración del Ministerio de Educación y Ciencia por su subvención con el proyecto PN I+D+I 2008-2011 ENE2010-21679-C02-02.

6. Referencias

- [1] THOMAS, W.J., y HOUSTON, P. *Simultaneous heat and mass transfer in cooling towers*. British Chemical Engineering. 1959, 160-217.
- [2] LOWE, H.J., CHRISTIE, D.G. *Heat transfer and pressure drop data on cooling tower packings, and model studies of the resistance of natural draft towers to air flow*. Inst Mech Eng (Steam Group) Symposium on Heat Transfer. 1962, 113-933.
- [3] KELLY, N.W., y SWENSON, L.K. *Comparative performance of cooling tower packing arrangements*. Chemical Engineering Progress. 1956, 52, 263–268.
- [4] GOSHAYSHI, H.R., y MISSENDEN, J.F. *The investigation of cooling tower packing in various arrangements*. Applied Thermal Engineering. 2000, 20 69–80.
- [5] BEDEKAR, S.V., NITHIARASU, P., y SEETHATAMU K.N. *Experimental investigation of the performance of a counter flow packed bed mechanical cooling tower*. Energy. 1998, 23, 943–947.
- [6] MILOSAVLJEVIC, N., HEIKKILA, P.A. *Comprehensive approach to cooling tower design*. Applied Thermal Engineering. 2001, 21, 899–915.
- [7] GHARAGHEIZI F., HAYATI R., y FATEMI S. *Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing*. Energy Conversion and Management. 2007, 48, 277–280.
- [8] LEMOUARI M., BOUMAZA M., y MUJTABA I.M. *Thermal performances investigation of a wet cooling tower*. Applied Thermal Engineering. 2007, 27, 902–909.
- [9] ELSARRAG E. *Experimental study and predictions of an induced draft ceramic tile packing cooling tower*. Energy Conversion and Management. 2006, 47, 2034–2043.
- [10] LUCAS M., MARTÍNEZ P.J., VIEDMA A. *Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators*. Energy Conversion and Management. 2009, 50, 490–497.
- [11] MOHIUDDIN A.K.M., y KANT K. *Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Parts I and II: selection and tower characteristics and Fill and another design parameters*, International Journal of Refrigeration. 1996, 19 (1) 43–51.
- [12] MERKEL F. *Evaporative Cooling*, Zeits, Verein Deutscher Ingenieure. 1926, 70, 120-128.
- [13] ASHRAE HANDBOOK CD—HVAC. *Systems and Equipment*. 2004, Chapter 36, Cooling Towers.
- [14] COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE CODE, STANDARD SPECIFICATIONS. *Acceptance Test Code for Water Cooling Towers*. 2000, Cooling Technology Institute.
- [15] UNE-EN 14705. *Método de medición y evaluación de las prestaciones térmicas de las torres de refrigeración húmedas*. 2006.
- [16] ISO GUIDE. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. ISBN: 92-67-10188-9. 1993.