

Medida experimental del arrastre en torres de refrigeración; influencia del sistema de distribución

Javier Ruiz¹, Manuel Lucas¹, Pedro J. Martínez¹, Antonio S. Kaiser², Blas Zamora², Antonio Viedma²

1 – Departamento Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernández de Elche. Avenida Universidad s/n, Edificio Quorum V, 03202, Elche, España.

Tel: +34 965 222 433, Fax: +34 965 222 493

e-mail: j.ruiz@umh.es - web: <http://www.umh.es>

2 – Departamento Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena. C/ Doctor Fleming, s/n. Cartagena, España.

Palabras clave: Torres de refrigeración, sistema de distribución, separador de gotas, arrastre, papel hidrosensible.

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.

Con objeto de reducir la cantidad de agua arrastrada en torres de refrigeración, a nivel nacional el RD 865/2003, de 4 de julio, establece los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis, limitando el valor del arrastre a 0,05% del agua circulante. Sin embargo no describe el método a utilizar para la medida.

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 del presente trabajo es determinar experimentalmente la influencia que tiene el sistema de distribución en el arrastre emitido por una torre de refrigeración con distintos separadores de gotas comerciales. Para ello se empleará la técnica del papel hidrosensible descrita en la normativa americana. Los resultados obtenidos muestran el mayor nivel de arrastre emitido por la torre cuando esta opera con el sistema de gravedad por presión (un orden de magnitud mayor) y que las combinaciones que cumplirían con el RD 865/2003 serían todas aquellas que incluyen el sistema de distribución por gravedad y aquella que combina separador de gotas C con sistema de distribución por presión.

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. En origen, el interés se asoció a la emisión y deposición de partículas radioactivas desde centrales nucleares Pasquill [1] y Van der Hoven [2]. Los trabajos de Aynsley y Carson [3] y de Pedersen et al. [4] describen diversos problemas medioambientales como pérdida de agua, problemas de corrosión en equipos, formación de hielo en las zonas cercanas a la instalación en periodos 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, Torrevieja 2005, Alcoy 1999-2010). La *Figura 1*, muestra algunas de las implicaciones medioambientales del arrastre asociadas al funcionamiento de torres de refrigeración.

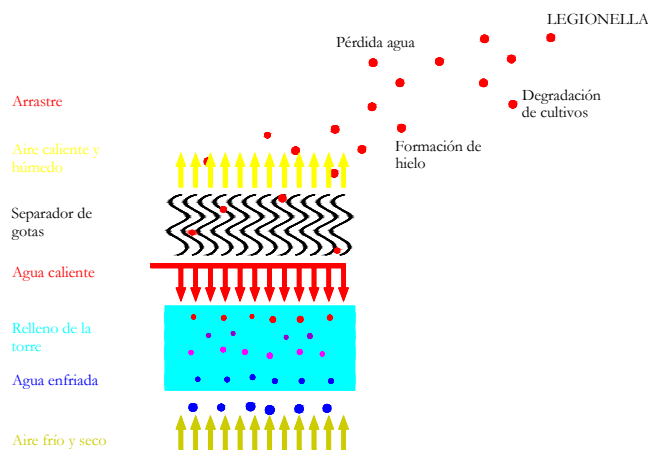


Figura 1: Implicaciones medioambientales del arrastre.

Existen una serie de condiciones que deben aparecer para que se produzca una contaminación por legionella asociada al funcionamiento de las torres de refrigeración: debe existir una vía de penetración de las bacterias en el circuito de agua de la torre, así como unas condiciones de temperatura, estancamiento y presencia de nutrientes en la instalación que facilite la multiplicación de estas bacterias. La siguiente condición es la dispersión de las bacterias en el aire en forma de aerosol. Finalmente, es necesario que se produzca la exposición de los individuos susceptibles al microorganismo, en una concentración y durante un tiempo suficiente para que puedan contraer la enfermedad. Diversas referencias presentan a las torres de refrigeración como equipos de riesgo de desarrollo y dispersión de

la bacteria y causantes del desarrollo de legionelosis. A modo de muestra se pueden destacar por su significación los trabajos de Cooper et al. [5], Navarro et al. [6] y Sumiyi et al. [7].

El modo más eficaz de controlar el contagio de la enfermedad es actuar en cuantos eslabones de la cadena de transmisión sea posible. Esta redundancia en la seguridad tiene su lógica en prevenir posibles fallos en las medidas de seguridad, de forma que si una no es efectiva existirá otra que evite el contagio, ASHRAE [8]. En la actualidad esencialmente se está trabajando en combatir la multiplicación, a través de acciones en fase de diseño y explotación de los equipos, evitando el estancamiento del agua, la proliferación de nutrientes, trabajar en determinadas condiciones de temperatura o disponer de tratamientos de agua adecuados. En lo referido a la dispersión de las bacterias en el aire, es donde aparece la reducción de la cantidad de agua arrastrada. En este sentido existen diversas normativas que limitan este valor. A nivel nacional el RD 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis, limita el valor del arrastre a 0,05% del agua circulante. Sin embargo no describe el método a utilizar para la medida. A nivel internacional, tomando como ejemplo Australia, país de referencia en el control de la legionelosis, fija el valor máximo del arrastre en 0,02% en su norma AS 3666-1986. En España, algunas administraciones locales están restringiendo o dificultando la instalación de torres de refrigeración tras brotes graves de legionelosis. Por ejemplo, el Ayuntamiento de la ciudad de Murcia ha prohibido la instalación de torres de refrigeración en el área metropolitana, BORM 20/6/2006. La Comunidad Autónoma de Valencia ha hecho públicas ayudas, DOGV núm. 5311 de 26.07.2006, para la sustitución de torres de refrigeración por "una alternativa más segura" (aero-refrigeradores). Siguiendo esta tendencia, algunas compañías propietarias de edificios con sistemas centralizados de aire acondicionado (en ocasiones de miles de kilovatios) han sustituido las torres de refrigeración por aero-refrigeradores, con los consiguientes efectos de incremento del consumo energético y de las emisiones de CO₂.

La cantidad de agua arrastrada en una torre de refrigeración para unas condiciones de operación dadas, depende fundamentalmente de la pareja de elementos conocida comúnmente como 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. El comportamiento de los separadores puede cuantificarse mediante dos factores: la eficiencia de captura de gotas, definida como la relación entre la masa de agua capturada y la masa total que llega al separador en el seno de la corriente de aire, y la pérdida de presión producida. La existencia de una caída importante de carga en el interior del cuerpo principal de la torre puede bajar de forma drástica el gasto de aire y reducir por tanto la eficiencia térmica del sistema. En las torres de tiro mecánico puede producirse un incremento considerable en el consumo energético de los ventiladores para un mismo gasto de aire. Obviamente, el mejor diseño debería aunar por un lado una eficiencia de captura alta, y por el otro, una pérdida de carga inducida no demasiado importante.

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. Su comportamiento se puede caracterizar básicamente mediante dos factores que se encuentran íntimamente relacionados entre sí, como son la pérdida de presión introducida en el circuito hidráulico y el tamaño de las gotas generadas. Para un funcionamiento eficiente desde un punto de vista térmico parece que el sistema de distribución debe garantizar la mayor transferencia de calor posible entre las corrientes de aire y agua. Para favorecer dicho intercambio el sistema de distribución debe exponer la mayor cantidad de área de intercambio de calor y masa para maximizar la transferencia de calor. Esto es que a igualdad de volumen de agua, es mejor exponer muchas gotas pequeñas que menos gotas de mayor tamaño. No obstante para producir gotas de pequeños diámetros es necesaria la instalación de boquillas rociadoras, las cuales introducen una pérdida de carga elevada que hace que el consumo energético del equipo aumente. Además del problema anterior hay que añadir que las gotas de menor diámetro son las más susceptibles de ser arrastradas por la corriente de aire y escapar a través de la sección de salida de la torre de refrigeración, hecho que como se ha especificado anteriormente es perjudicial desde un punto de vista ambiental e higiénico-sanitario. Se puede concluir por tanto, que para un funcionamiento óptimo del sistema de distribución se debe buscar un compromiso entre el consumo energético de la torre, el comportamiento térmico de la misma y la cantidad de arrastre generada.

En este sentido, el principal objetivo del presente trabajo es determinar experimentalmente la influencia que tiene el sistema de distribución en el arrastre emitido por una torre de refrigeración con distintos separadores de gotas comerciales. Para ello se empleará la técnica del papel hidrosensible descrita en la normativa americana.

2 Procedimiento experimental

2.1 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 2* muestra esquemáticamente la instalación experimental.

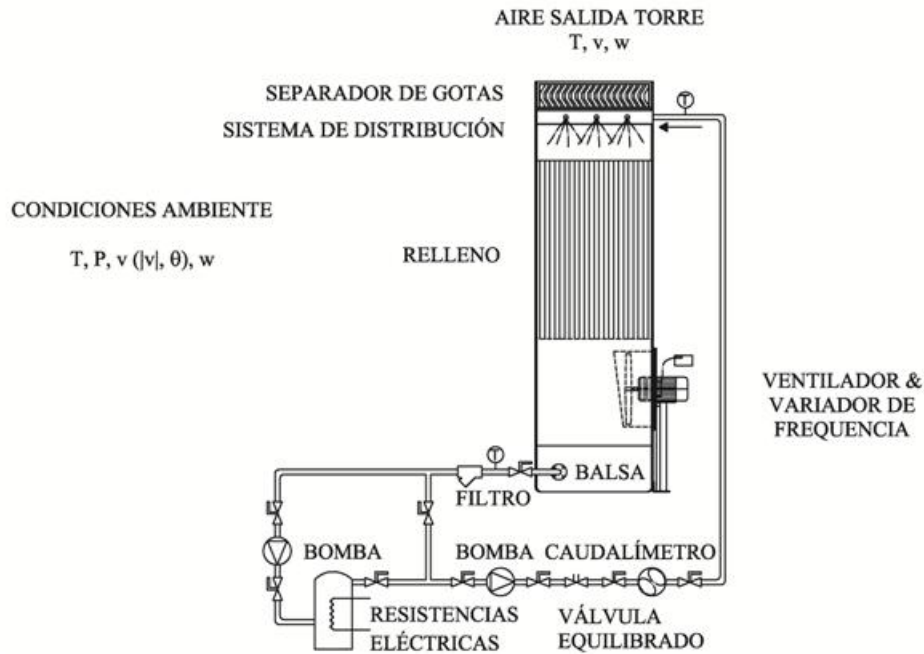


Figura 2: Diagrama esquemático de la instalación experimental.

El nivel de arrastre emitido por la torre de refrigeración se ha estudiado experimentalmente para tres separadores de gotas (denotados con letras de la A a la C) y para dos sistemas de distribución diferentes (sistema por presión y sistema por gravedad). Ambos se muestran en la *Figura 3*.

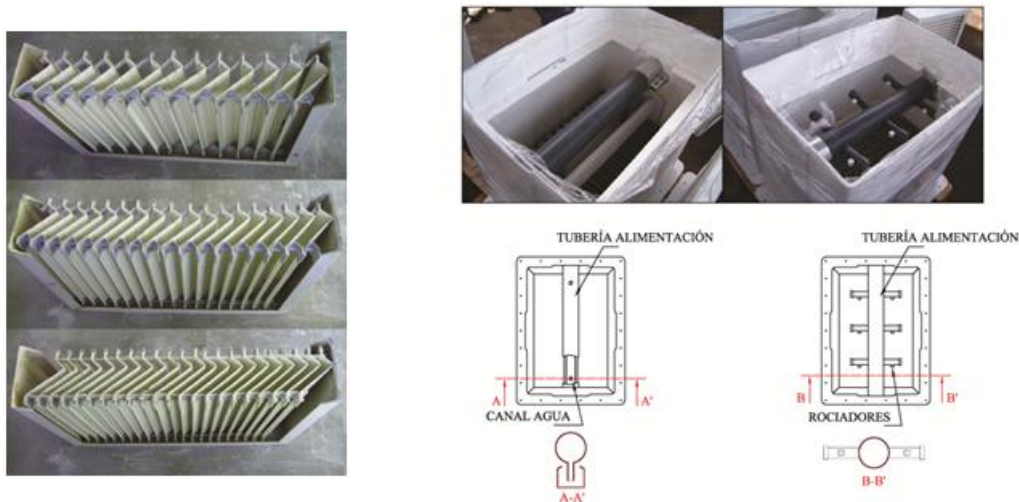


Figura 3: Izquierda: Separadores de gotas empleados en el estudio experimental. De arriba abajo y de izquierda a derecha Separador A, B, C. Derecha: Sistemas de distribución ensayados. Sistema por gravedad (izquierda) y sistema por presión (derecha).

2.2 Métodos de medida del arrastre

Actualmente existen diversas técnicas y dispositivos para medir el arrastre en torres de refrigeración, dispares en cuanto a sofisticación, principios básicos de funcionamiento y capacidad de medida. No obstante, ninguno de estos métodos ha alcanzado un reconocimiento universal como la mejor técnica de medida del arrastre. Algunos dispositivos tienen carencias evidentes, y muchos de ellos sólo son capaces de ofrecer una información parcial, referente a la población de gotas muestreadas. Una primera división se puede realizar diferenciando entre las técnicas directas de medida, cuya localización es en la sección de salida de las torres, y los métodos indirectos que realizan balances globales del sistema. Las técnicas de medida directa se han diferenciado entre aquellas que miden el agua que atraviesa una sección de medida, determinando el flujo arrastrado, de aquellas que miden la cantidad de gotas en un volumen determinado, obteniendo la densidad de gotas. Además las técnicas de medida se clasifican según tengan, o no, capacidad de medir el tamaño de las gotas que escapan de la torre. Golay et al. [9], realizan un detallado trabajo experimental de comparación de técnicas de medida de arrastre en el MIT (Massachusetts Institute of Technology). Para ello, construyen una planta piloto compuesta por un túnel de ensayo donde instalan el sistema de simulación de las condiciones de salida de la torre de refrigeración y el arrastre. Invitan a diversas organizaciones a probar sus equipos de medida y toman como método patrón la técnica de láser light scattering. Se ensayan hasta un total de diez técnicas diferentes cubriendo una gran parte de las técnicas directas de medida de arrastre. Las conclusiones que obtienen es que ninguna de las técnicas supera al resto en todo el rango de medidas, destacando las de superficie sensible para bajos y medios valores de arrastre y las isocinéticas para altos. Descarta a los aparatos termodinámicos como técnicas adecuadas por la inconsistencia que han mostrados sus resultados. Una de las limitaciones que se encuentran a este trabajo es que el método patrón utilizado (laser light scattering), únicamente mide gotas por encima de 95 μm , por lo que existe un sesgo.

Entre las diversas técnicas empleadas, algunos países han seleccionado una de ellas para tenerlas como referencia. De esta forma, se ha comprobado que en las distintas normas recopiladas se describen diferentes técnicas de medida para cuantificar el arrastre.

País	Técnica de referencia	Normativa
Australia	Balance Químico	Australian Standard [1994]. AS-4180.1 <i>Drift loss from cooling towers – Laboratory measurement. Part 1: Chloride balance method.</i>
Reino Unido	Balance Térmico	British Standard [1988]. BS- 4485. <i>Water cooling towers. Part 2: Methods for performance testing. British Standards Institution.</i>
EE.UU.	Método Isocinético HGBIK y Papel Hidrosensible	CTI ATC-140 Code Tower. Standard Specifications [1994]. <i>Isokinetic Drift Test Code. Cooling Technology Institute.</i>
Japón	Balance Térmico	JIS B 8609 [1981] Performance tests of mechanical draft

Tabla 1. Normativa internacional de medida del arrastre.

A nivel nacional, la norma UNE-EN 14705 Método de medición y evaluación de las prestaciones térmicas de las torres de refrigeración húmedas, de febrero de 2006, que es de obligado cumplimiento únicamente en torres no fabricadas en serie, en su Apartado 6.4.9 Ensayos de prestaciones de pérdidas por dispersión, cita: "El caudal volumétrico de agua arrastrada debe medirse utilizando una sonda isocinética donde el volumen de agua recogida se deduce de la cantidad de sales recogida, o por cualquier otro método equivalente".

A continuación se describen de forma resumida las técnicas de medida citadas en la normativa internacional.

El método indirecto del Balance Químico se basa en el hecho de que, si se disuelve un material trazador adecuado en el agua de circulación, cuando ésta se evapora, este soluto no se transportará con el vapor de agua, sino que permanecerá en el caudal de circulación, mientras que aquellas gotas arrastradas por la corriente de aire en estado líquido sí que transportarán una cantidad determinada de soluto. Conociendo la concentración inicial y final de este material trazador en el agua de circulación, la concentración del agua de aporte y el caudal aportado durante el experimento, se puede conocer el caudal de agua que ha sido arrastrado por la corriente de aire en forma de gotas. El primer artículo que describe este método de medida es el de Campbell [10] en el que se plantean los balances sin considerar el agua evaporada, lo que en determinadas ocasiones implica errores inaceptables. Posteriormente, Maclaine et al. [11] plantea los balances de nuevo teniendo en cuenta la evaporación aunque considerado una serie de simplificaciones.

En el método del Balance Térmico, la cantidad de agua arrastrada se determina calculando la diferencia entre la cantidad de agua de aporte y la suma de la purga y las pérdidas por evaporación. La exactitud de las medidas de las distintas cantidades se tendrá en cuenta a la hora de conocer la precisión de las medidas realizadas. El ensayo se llevará a cabo preferiblemente en condiciones sin carga térmica y habitualmente se realiza en cámaras isotermas.

El Método Isocinético de muestreo HGBIK (Heated Glass Bead Isokinetic), Schrecker et al. [12], recoge las emisiones de arrastre extrayendo una porción de la corriente de salida de la torre de refrigeración con la misma velocidad y dirección que la de esta corriente. La primera etapa del sistema HGBIK consiste en una tobera de cristal rellena de bolitas. Un elemento calefactor y un dispositivo de control mantienen la sonda a una temperatura suficiente para evaporar las gotas de agua. La temperatura de la corriente gaseosa que abandona la sonda debe estar por encima del punto de ebullición del agua. Los minerales o trazas contenidos en las gotas de arrastre se depositan en las bolitas de cristal. La segunda etapa del sistema es un filtro montado en serie con la tobera. Su función es recoger cualquier mineral o partícula trazadora que atraviesa la primera etapa de recogida. El filtro debe estar colocado tan cerca de la tobera como sea posible, y orientado de manera que se minimice la interferencia con la corriente de aire muestreada. La etapa final consiste en filtros adicionales que recogen cualquier posible partícula trazadora que haya atravesado las dos etapas anteriores. Con la cantidad de trazador capturado por

las distintas etapas del sistema y conociendo la concentración del mismo en el agua circulante en la torre se determina la cantidad de agua arrastrada.

La técnica del Papel Hidrosensible se basa en la recogida de las gotas de arrastre de la corriente de aire, por impacto inercial de las mismas en un papel hidrosensible, Wilber y Vercauteren [13]. Este papel está tratado químicamente, de modo que cuando una gota impacta en él se genera una mancha azul sobre el fondo amarillo pálido del papel. Si la exposición de los papeles es perpendicular al flujo de aire, la mancha tendrá una forma circular o casi circular. La relación entre la dimensión de la mancha y de la gota se puede conocer calibrando el sistema de papel sensible mediante un generador de gotas monodispersas, en diferentes rangos de tamaño y velocidad de las gotas. Cuantificando el número y tamaño de las gotas capturadas se puede determinar el gasto másico de agua arrastrada.

2.3 Método del papel hidrosensible

De acuerdo a Golay et al. [9], para valores bajos y medios de arrastre las técnicas de superficie sensible son las más adecuadas. Este motivo junto con el hecho de que se trata de una técnica económicamente asequible, hacen de ella la candidata idónea para las medidas de arrastre objeto en el presente trabajo.

La técnica del papel hidrosensible se basa en la recogida de las gotas de arrastre de la corriente de aire, por impacto inercial de las mismas sobre un papel hidrosensible perpendicular al flujo. Este papel está tratado químicamente, mediante un baño de "potassium ferrocyanide" y un tratamiento superficial de sulfato de amonio ferroso. De modo que cuando una gota impacta sobre él, disuelve ambos productos y se genera una mancha azul sobre el fondo amarillo pálido del papel. El tamaño y la forma de la mancha dependen de la velocidad del impacto y del diámetro original de la gota. Si la exposición de los papeles es perpendicular al flujo de aire, la mancha tendrá una forma circular o casi circular. La relación entre la dimensión de la mancha y de la gota se puede conocer calibrando el sistema del papel hidrosensible mediante un generador de gotas monodispersas, en diferentes rangos de tamaño y velocidad de las mismas.

El fabricante suministra una curva de calibración que proporciona el factor de aplastamiento de la gota (spread factor) a partir del diámetro de la mancha generada en el papel. Este factor relaciona el tamaño del diámetro de la mancha con el diámetro de la gota que dio origen a la mancha. El papel hidrosensible con las manchas generadas por las gotas de agua es sometido a un proceso de digitalización de la imagen. En primer lugar se captura la imagen del papel hidrosensible quedando ésta digitalizada para posteriormente pasar esta información al ordenador, que mediante un programa de procesado y análisis de imágenes será capaz de contar, medir y clasificar las manchas según su dimensión. De este análisis se obtendrá una distribución de las gotas según su tamaño. Con la superficie ocupada por cada mancha, supuesta circular, se calcula su diámetro. Haciendo uso de la curva de calibración se obtiene el diámetro de las gotas que generaron cada una de las manchas.

La *Figura 4* muestra el procedimiento seguido en la aplicación de la técnica del papel hidrosensible para la medida del arrastre en la torre de refrigeración instalada en la planta piloto.

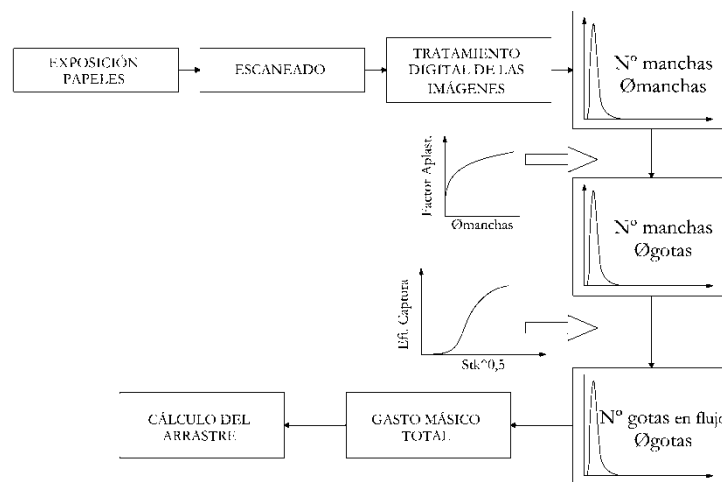


Figura 4: Esquema del procedimiento de medida con el papel hidrosensible.

Las fases en las que se divide el procedimiento de medida del método del papel hidrosensible son las siguientes:

- Realización de los ensayos (definición número/posición papeles y tiempo de exposición y realización ensayos)
- Procesado de la imagen (escaneado y tratamiento digital)
- Procesado de datos (cálculo del arrastre)

REALIZACIÓN ENSAYOS

Una vez puesta en marcha la instalación con el separador de gotas a ensayar ya colocado, será necesario esperar aproximadamente media hora para que la torre alcance las condiciones nominales de funcionamiento. La condición más importante que se busca durante este periodo de tiempo es que el separador de gotas se encuentre saturado. Como paso previo al inicio del ensayo se deberá establecer según las dimensiones de la sección de salida de la torre, el número de papeles y la disposición de éstos sobre dicha sección. En el caso

de la instalación experimental de la U.M.H. en la que el eje longitudinal de la torre está en dirección Norte-Sur, se han establecido nueve regiones, separadas en tres zonas, la zona sur, la zona central y la zona norte opuesta al ventilador (*Figura 5*).

Con el fin de poder ubicar correctamente las varillas que sujetan los papeles en lo alto de la torre de refrigeración y poder reproducir fielmente su posición de un ensayo a otro así como eliminar la influencia del viento, se construyó un soporte que se coloca en la sección de salida de la torre. Este soporte rectangular tiene el mismo tamaño que la torre y sus tres ranuras equidistantes se utilizan para que cada ensayo se realice en la misma posición.

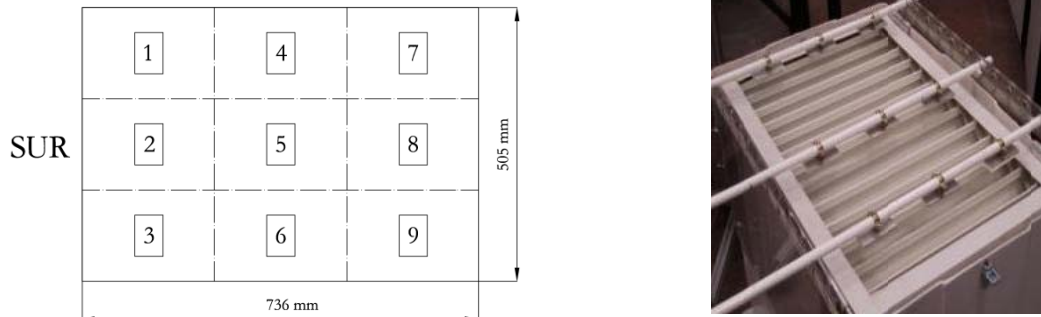


Figura 5: Disposición de los papeles hidrosensibles en la sección de salida de la torre.

Una vez la torre se encuentra funcionando en régimen nominal (5200 l/h de caudal circulante y 50 Hz en el ventilador), hay que establecer el tiempo de exposición de los papeles, siendo éste un factor muy importante para la realización de un buen ensayo. Así pues se realizarán ensayos de prueba para determinar el tiempo de exposición óptimo siendo este la solución de compromiso entre la cantidad de información recogida y evitar el solapamiento de gotas, manchas de humedad, etc. Una vez preestablecido el tiempo de exposición, se pasará a la realización del ensayo, el cual se realiza con tres varillas con tres soportes cada una que hacen de soporte a los papeles y permiten ponerlo perpendicularmente al flujo durante el tiempo establecido (*Figura 5*), y al almacenaje de los papeles al vacío (para que no les afecten las condiciones ambientales y permanecen inalterables durante el tiempo que sea necesario hasta el proceso de digitalización) cuando éstos se encuentren totalmente secos.

PROCESADO DE LA IMAGEN

El procesado de los papeles empleados en los ensayos abarca desde el escaneado de los papeles hasta la obtención de la distribución de los datos de interés. En primer lugar y para proceder al tratamiento digital de las imágenes, se escanean los papeles hidrosensibles expuestos en la sección de salida de la torre de refrigeración. Se ha elegido este método porque es el más adecuado para la digitalización de imágenes 2D. El equipo utilizado es un escáner fotográfico profesional modelo CanonScan 9950F. Se trata de un escáner plano de 4800 x 9600 ppp de resolución óptica. En cuanto a los parámetros de escaneado, se ha decidido escanear los papeles con la máxima resolución posible del escáner, que en nuestro caso es de 4800 píxeles por pulgada (5,291 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) para perder la mínima información posible. Respecto a la profundidad de píxel se ha trabajado a 24 bits, color real, para conseguir todos los cambios de tono existentes en los papeles. Trabajar con estos parámetros para conseguir imágenes de tan alta calidad tiene un inconveniente, y es que las imágenes que se crean son muy grandes (alrededor de 400 MB). Para el procesado de estas imágenes con el ordenador, el formato elegido ha sido el formato .bmp. El proceso anteriormente indicado se lleva a cabo mediante el software de adquisición de imágenes que se suministra con el escáner.

La *Figura 6* muestra un ejemplo de cómo queda un papel hidrosensible escaneado:

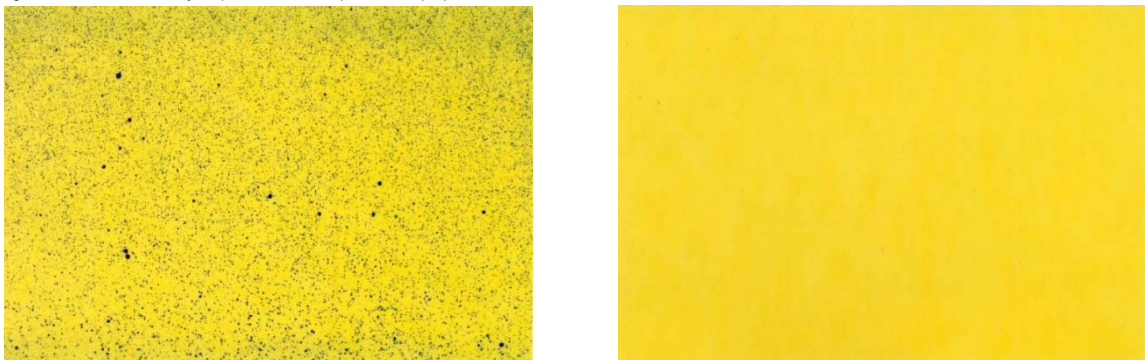


Figura 6: Papel hidrosensible escaneado. Sistema de distribución por presión (izquierda) y gravedad (derecha).

Partiendo de las imágenes de los papeles almacenadas en formato .bmp, se pasa al tratamiento digital de la imagen con el objetivo de obtener la información necesaria. Para tener capacidad de control sobre todo el proceso de extracción de la información (definición algoritmos que definen el borde de la mancha, nivel de diferencias de contraste con el fondo, etc...) se ha realizado la programación de un algoritmo de cálculo en entorno C++. El tratamiento realizado sobre las imágenes consta de tres fases; en la primera se extrae la máxima información de los papeles, es decir, se extrae del papel todo aquel cambio de intensidad que se produzca, ya sea gota o no. Para ello se emplea el algoritmo de detección de bordes de "Canny" además de operaciones booleanas de erosión y dilatación de contornos. En la segunda fase se realiza una clasificación de toda la información extraída de los papeles mediante propiedades de las manchas como pueden ser la redondez, o momentos de inercia medidos respecto a su centro de masas agrupando así de forma estadística aquellos registros cuyo origen es una gota de aquellos que no. Para ello y tras una serie de estudios previos, se decide emplear un clasificador en forma de árbol J48 debido al mayor nivel de precisión en la clasificación alcanzado (situado por encima de los clasificadores bayesianos). Como resultado de esta fase se obtiene un vector que incluye los valores de las manchas que finalmente se considera que tienen su origen en gotas.

PROCESADO DE DATOS

El resultado del tratamiento digital de imágenes es un vector de datos con información de la superficie de cada una de las manchas cuyo origen es una gota. El siguiente paso necesario para determinar el arrastre es la conversión de la superficie de las manchas en los diámetros de las gotas que generaron esas manchas. El papel hidrosensible adquirido para el desarrollo de la técnica de medida del arrastre es el modelo Teejet de dimensiones 52 x 76 mm, fabricado por la empresa Syngenta Crop. Protection AG. y comercializado por Spraying Systems Co. El fabricante suministra una curva de calibración (*Figura 7*) que proporciona el factor de aplastamiento de la gota (Spread factor) a partir del diámetro de la mancha generada en el papel.

La aplicación del factor de aplastamiento al vector con la información de las manchas, proporciona un nuevo vector en el que se incluye la información del tamaño de las gotas que dieron lugar a las manchas medidas.

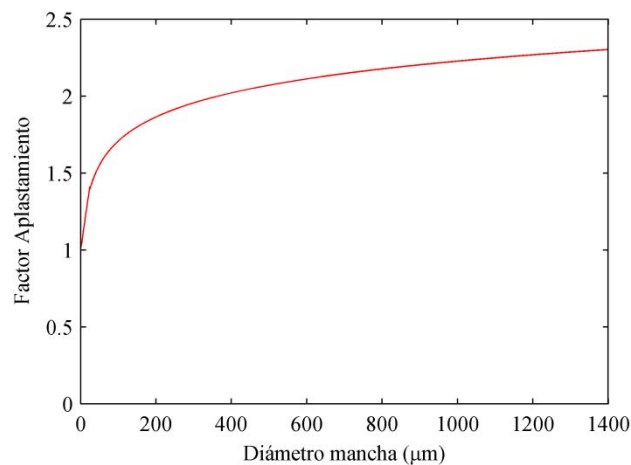


Figura 7: Factor de aplastamiento del agua en papel hidrosensible.

No obstante además hay que tener en cuenta el fenómeno de la eficiencia de captura asociada a los papeles hidrosensibles. Una partícula suspendida en una corriente fluida tiende a moverse en línea recta a causa de su inercia. Consecuentemente, cuando el fluido rodea un obstáculo, la partícula tiende a dirigirse hacia el obstáculo. La eficiencia de captura de partículas de un obstáculo tiene en cuenta si las partículas terminan impactando con el obstáculo o si son desviadas por el cambio de dirección del fluido. Los impactadores inerciales, como lo son los papeles hidrosensibles, han sido estudiados extensamente a través de estudios teóricos y experimentales (Ranz y Wong [14], Golovin y Putnam [15], May y Clifford [16]).

La *Figura 8a* muestra una representación de la eficiencia de captura por impacto inercial sobre una banda. La zona sombreada describe el espacio en el que las trayectorias de las partículas impactan sobre el objeto. La eficiencia de captura de impacto, E , se define como la relación entre el número de partículas que son capturadas, frente al total de partículas que se inyectan en la superficie proyectada del objeto colector. Realizando un análisis dimensional aparece el número de Stokes como el parámetro fundamental que afecta a la eficiencia de captura por impacto inercial.

$$Stk = \frac{\rho_p \cdot D_G^2 \cdot v \cdot C_c}{18 \cdot \mu_a \cdot L} \quad (1)$$

donde ρ_p es la densidad de la partícula, D_G es el diámetro de la partícula, v es la velocidad relativa entre la partícula y el gas, C_c es el factor de corrección de Cunningham, μ_a es la viscosidad dinámica del fluido y L es la dimensión característica. La dimensión característica, L , se determina como la proyección de la anchura del objeto en la dirección perpendicular al flujo. El factor de corrección de Cunningham debe aplicarse para tener en cuenta que la Ley de Stokes deja de tener exactitud cuando el tamaño de las partículas es similar al

desplazamiento medio libre de las moléculas del gas que contiene a las partículas. Este factor corrector es próximo a la unidad, y por lo tanto despreciable, para partículas en aire en condiciones normales de temperatura y presión hasta $1 \mu\text{m}$ de diámetro, Baron y Willeke [17]. Con partículas menores o en bajas condiciones de presión, el factor de corrección de Cunningham puede ser importante.

La Figura 8b muestra la curva de eficiencia de captura para bandas, obtenida a partir de los datos experimentales de May y Clifford [16].

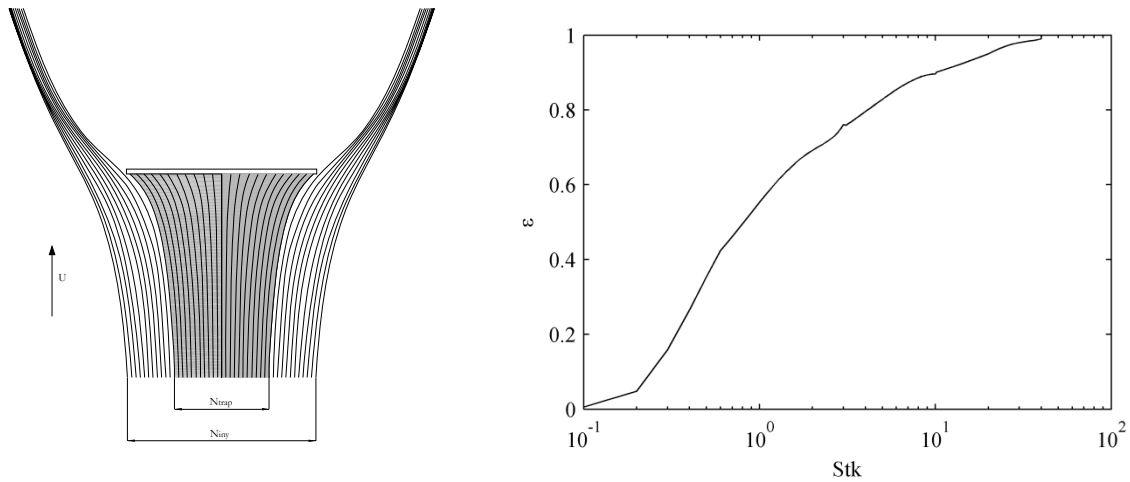


Figura 8: a) Fenómeno eficiencia de captura. b) Curva de eficiencia captura según los datos experimentales de May-Clifford [16] para bandas.

La eficiencia de captura se usa para corregir el error cometido en este tipo de mediciones al contabilizar sólo las partículas que impactan en la superficie de recogida sin considerar aquellas partículas que por su tamaño han sido arrastradas por el flujo de aire. Para incorporar este efecto en el cálculo se ha correlacionado la curva de eficiencia del impactador aplicando un factor corrector para cada tamaño de gota que ha sido capturada.

Con la información obtenida por el tratamiento digital de los papeles y la aplicación del factor de aplastamiento y el de eficiencia de captura ya se puede calcular el arrastre característico de la superficie ocupada por cada papel hidrosensible m_{dj} en (kg/s m^2) :

$$m_{dj} = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{\rho_p}{A_p \cdot t} \cdot \sum_{i=1}^N d_i^3 \cdot \epsilon^{-1} \quad (2)$$

donde ρ_p es la densidad de la partícula, A_p es la superficie del papel hidrosensible, t es el tiempo de muestreo, d_i es el diámetro de cada una de las gotas, ϵ es la eficiencia de captura asociada a ese d_i y N es el número de gotas el cual contempla la eficiencia de captura.

El gasto másico de agua que escapa por la sección de salida de cada torre, m_s (kg/s), se calcula como

$$m_s = A_s \cdot \sum_{i=1}^9 m_{dj} \quad (3)$$

donde A_s es la superficie de la región de la sección de salida asociada a cada papel.

Finalmente, el arrastre se calcula como la relación entre el gasto másico de agua que escapa de la torre (m_s) y el gasto másico total que se pulveriza (m_w):

$$D = 100 \cdot \frac{m_s}{m_w} \quad (4)$$

3 Discusión de resultados

3.1 Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados con el sistema de distribución por gravedad y los separadores descritos. Además de los valores medios de las variables medidas durante los ensayos de arrastre, se muestran aquí los histogramas de manchas y gotas recogidas en cada papel así como el cálculo de los caudales máxicos por unidad de superficie y el arrastre emitido por el separador concreto.

ENSAYO DE ARRASTRE EN TORRES DE REFRIGERACIÓN U.M.H. ELCHE									
Disposición papeles			Fecha		Hora				
SUR	1	4	7	23/06/2011		10			
	2	5	8						
	3	6	9						
ESTE			Separador gotas		Sistema distribución				
			A		Gravedad				
Velocidad viento a la salida de la torre de refrigeración									
Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9	
2,9608	3,4040	2,2632	3,4440	3,5101	2,6143	4,0762	3,9657	3,3896	
Frecuencia ventilador (Hz)				Media velocidad (m/s)			Dirección viento (°)		
50				3,2920			137,2514		
Condiciones particulares del ensayo									
Caudal (l/h)		Humedad relativa (%)		Temp entrada (°C)		Temp salida (°C)			
5308,8234		99,25		24,4182		22,0280			
Tiempo exposición (s)		Temp agua ent-sal (°C)							
5		22,18 - 20,7229							

Figura 9: Ficha de medida para el ensayo del separador A.

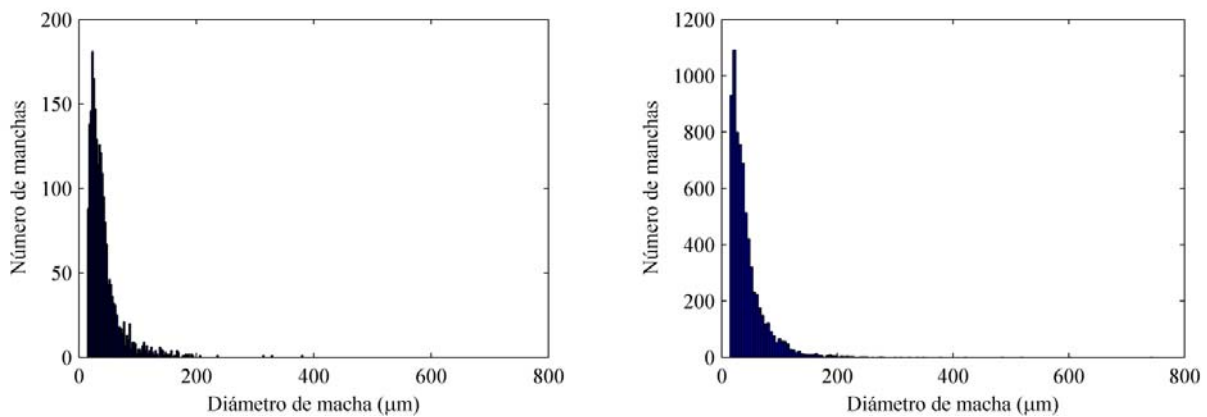


Figura 10: Ejemplo de histogramas de gotas capturadas en papel 1 (izquierda) y 2 (derecha) para el separador A.

Con la información descrita en los histogramas de las manchas registradas en los papeles y el factor de aplastamiento se puede determinar la cantidad de agua recogida. Aplicando el de eficiencia de captura se puede determinar la cantidad de agua que atraviesa la proyección de los papeles y el arrastre característico de la superficie ocupada por cada papel hidrosensible.

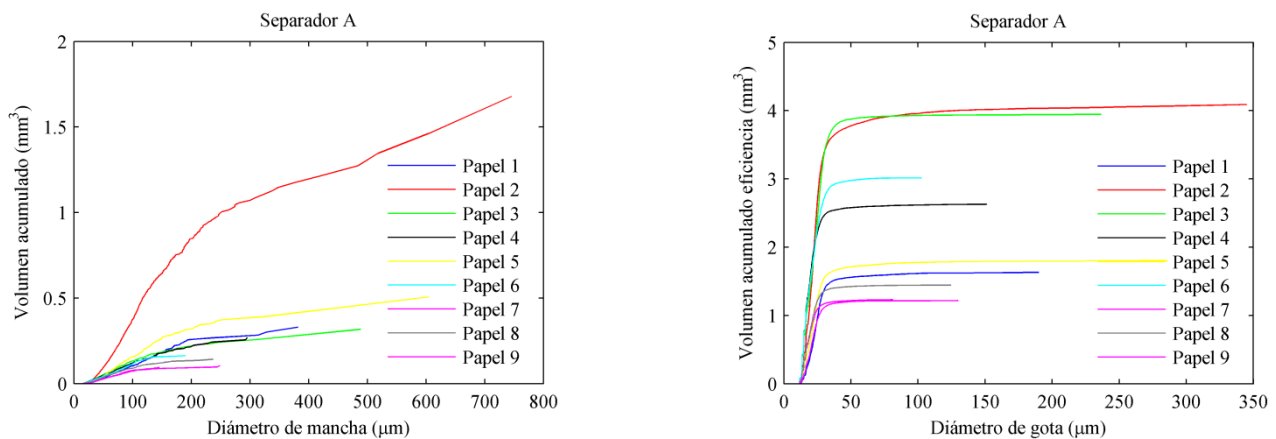


Figura 11: Volumen acumulado de agua capturada (izquierda), volumen acumulado de agua capturada con eficiencia de captura (derecha).

d_i (kg/s m ²)	Sistema presión			Sistema gravedad		
	A	B	C	A	B	C
Papel 1	7,086E-03	2,184E-03	1,549E-03	8,240E-05	8,512E-06	5,435E-06
Papel 2	3,404E-03	2,434E-03	8,579E-04	0,0002065	2,176E-05	1,452E-05
Papel 3	1,399E-02	2,520E-03	6,206E-04	0,0001992	1,279E-05	5,644E-06
Papel 4	7,568E-03	3,068E-03	7,948E-04	0,0001327	6,414E-06	3,817E-06
Papel 5	5,957E-03	2,438E-03	5,201E-04	9,112E-05	9,278E-06	6,764E-06
Papel 6	6,075E-03	2,178E-03	3,092E-04	0,0001522	6,622E-06	2,947E-06
Papel 7	7,028E-03	1,825E-03	7,403E-04	6,215E-05	5,485E-06	4,153E-06
Papel 8	6,222E-03	1,938E-03	4,729E-04	7,295E-05	9,589E-06	6,232E-06
Papel 9	6,767E-03	2,311E-03	5,958E-04	6,149E-05	4,140E-06	3,51E-06

Tabla 2. Arrastre por unidad de superficie d_i (kg/s m²) recogido por cada papel y sistema de distribución.

Finalmente, el arrastre se calcula como la relación entre el flujo de agua que escapa de la torre (s) y el flujo total de agua que se pulveriza (w):

	Sistema presión			Sistema gravedad		
	A	B	C	A	B	C
s (kg/s)	2,647E-03	8,630E-04	2,668E-04	4,38126E-05	3,49389E-06	2,19028E-06
w (kg/s)	1,440	1,454	1,429	1,474	1,439	1,482
D (%)	0,1838	0,059346	0,01866	0,002977754	0,000242991	0,000147917

Tabla 3. Arrastre s (kg/s), caudal de agua pulverizada w (kg/s) y arrastre (%) emitido por cada separador y sistema de distribución.

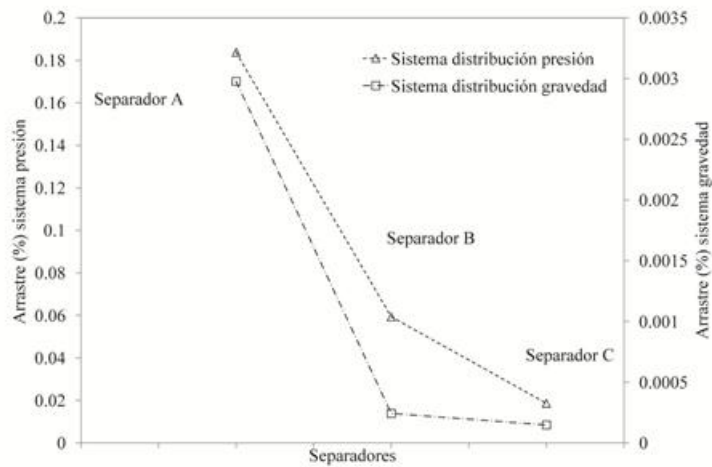


Figura 12: Comparativa arrastre emitido por la torre para los distintos sistemas de distribución y los distintos separadores ensayados.

En cuanto a la comparativa entre los resultados obtenidos con la instalación de los distintos separadores y sistemas de distribución, el nivel de las medidas con el sistema de distribución por presión es de un orden de magnitud mayor que las obtenidas por el sistema de distribución por gravedad. Esto se justifica a través del mayor nivel de gotas emitidas conseguido cuando se instala el sistema de distribución por presión. Si para una misma cantidad de agua se pulverizan muchas más gotas, el arrastre será mayor.

Como se puede observar en la Figura 12, la jerarquización en términos de clasificación de los separadores se mantiene independientemente del tipo de sistema distribución. Como era de esperar el arrastre disminuye a medida que aumenta el número de lamas para ambos sistemas. Así el separador A sería el que más emitiría y el separador C el que menos. Si se tratara de comprobar el umbral marcado por el RD 865/2003 (Arrastre máximo=0,05%) todos los ensayos realizados con sistema por gravedad cumplirían la normativa, mientras que sólo el separador C estaría dentro de rango si se emplea el sistema por presión.

4 Conclusiones

Este estudio ha permitido comprobar experimentalmente la influencia que tienen los elementos constructivos de torres de refrigeración en el arrastre emitido por 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 tres separadores de gotas y empleando la metodología del papel hidrosensible. Las conclusiones obtenidas se pueden resumir de la siguiente manera:

Se ha evaluado mediante la técnica del papel hidrosensible la cantidad de agua arrastrada emitida por la torre y se ha encontrado que ésta siempre es mayor cuando el sistema de distribución de agua por presión se encuentra equipado. Este comportamiento se ha justificado a través de la reducción del tamaño de las gotas distribuidas por el sistema de distribución para una misma cantidad de agua.

Se ha encontrado también que la jerarquización en términos de nivel de arrastre se mantiene para los distintos separadores para ambos sistemas de distribución. Esto se ha justificado a través de la relación inversamente proporcional entre el número de lamas y la cantidad de agua emitida.

Por último se ha determinado qué combinación de separador de gotas – sistema de distribución cumpliría con el RD 865/2003 el cual fija un arrastre máximo igual al 0,05% del agua pulverizada. Las combinaciones que cumplirían serían todas aquellas que incluyen el sistema de distribución por gravedad y aquella que combina separador de gotas C con sistema de distribución por presión.

Referencias

- [1] Pasquill, F, *Section 6.2 Deposition of Airborne Materials, Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources*, D. Van Nostrand Company, Ltd., London, pp. 226-239, 1962.
- [2] Van der Hoven, I, *Deposition of Particles and Gases, Meteorology and Atomic Energy 1968 (editor D. Slade)*, US. Atomic Energy Commission, pp. 202-207, 1968.
- [3] Aynsley, E, Carson, JE. *Atmospheric effects of water cooling facilities*, Cooling Tower Institute. (Technical Paper TP-107B), 1973.
- [4] Pedersen, GC, Lamkin, VK, Seich, M. *An economical solution to cooling tower drift*, Cooling Tower Institute. (Technical Paper- T-87-08), 1987.
- [5] Cooper AJ, Barnes HR, Myers ER, *Assessing risk of legionella*, Ashrae Journal Vol, 46 nº 4. pp 22-27, 2004.
- [6] Navarro C, et al., *Update on the outbreak of legionnaires' diseases in Murcia Spain*, Eurosurveillance Weekly. 5 (21), 2001.
- [7] Sumiyo, I, Miyamoto, H, Hori, H, Tanak, I, Yoshida, S, *Sampling and detection of legionella pneumophila aerosols generated from industrial cooling tower*, Ann. Occup. Hyg., Vol. 45, nº 6, pp. 421-42, 2001.
- [8] Ashrae Guideline-12, *Minimizing the risk of Legionellosis associated with buildings water systems*, 2000.
- [9] Golay, MW, Glantschnig, WJ, Best, FR, *Comparison of methods for measurement of cooling tower drift*, Atmospheric Environment. Vol, 20 nº 2. pp 269-291, 1986.
- [10] Campbell, J, *A review of CTI work on the measurement of cooling tower drift loss*, Cooling Technology Institute, (Technical Paper- TP69-02), 1969.
- [11] Maclaine-cross, IL, Behnia, M. *Measurement of drift loss from cooling towers*. ASHRAE transactions. Vol 100, part 1. pp 131-139, 1992.
- [12] Schrecker GO, Webb RO, Rutherford DA, Shoftner FM. *Drift Data acquired on Mechanical salt Water cooling Devices*. EPA-650/2-75-060, 1975.
- [13] Wilber, K, Vercauteren K. *Comprehensive drift measurements on a circular mechanical draft cooling tower*. CTI paper number TP-86-01. 1986.
- [14] Ranz WE, Marshall WR, *Evaporation from drops, Part I*, Chem. Eng. Prog. 48 (3) 141-146, 1952.
- [15] Golovin, MN, Putnam, A, *Inertial impaction on single elements*, Ind. Eng. Chem. Fund. 1:264-273, 1962.
- [16] May, KR, Clifford, R, *The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs*, Ann. Occup. Hyg., Vol. 10, pp. 83-95, 1967.
- [17] Baron, PA, Willeke K, *Aerosol measurement: Principles, Techniques and Applications, 2nd Edition*. Editorial John Wiley and Sons Inc. ISBN: 978-0-471-78492-0, 2001.