

MEDIDA DEL ARRASTRE EN TORRES DE REFRIGERACIÓN

Juan Pedro Solano, Pedro Juan Martínez, Antonio Viedma, Manuel Lucas #

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos
Universidad Politécnica de Cartagena
C/ Dr Fleming, s/n – 30202 Cartagena (Murcia)
Teléfono: +34 968 325 995 , Fax: +34 968 325 999
e-mail : juanp.solano@upct.es

Área de Máquinas y Motores Térmicos
Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales, Universidad Miguel Hernández
Avenida del Ferrocarril, s/n. Edificio "Torreblanca", 03202, Elche (Alicante)
Teléfono: +34 966 658 561 , Fax: +34 966 658 928
e-mail: mlucas@umh.es

RESUMEN

El interés por desarrollar una técnica de medida del arrastre en equipos de enfriamiento evaporativo radica en la necesidad de determinar la emisión de aerosoles en las torres de refrigeración, y predecir sus posibles efectos medioambientales. La técnica del papel hidrosensible se utiliza para registrar las gotas arrastradas que atraviesan una superficie, durante un tiempo de muestreo. El análisis de la imagen con el software Image-Pro Plus proporciona el tamaño y distribución de las gotas que constituyen el arrastre, y permite cuantificar el gasto másico del mismo.

KEYWORDS: arrastre, papel hidrosensible, tratamiento de imágenes

1. Introducción

El principio de funcionamiento de los equipos de enfriamiento evaporativo requiere la distribución de agua pulverizada sobre una superficie de transmisión de calor por la que se hace pasar una corriente de aire. Como resultado, la corriente de aire de salida captura pequeñas gotas de agua, fenómeno conocido como arrastre. Este arrastre constituye una fuente de daño potencial al medioambiente, además de suponer una pérdida de agua del circuito de enfriamiento del sistema. Para reducirlo, las torres de refrigeración emplean comúnmente sistemas denominados separadores de gotas, que modifican la dirección del flujo de aire y reincorporan al circuito de agua las gotas arrastradas. En la medida que no todas las gotas consiguen ser separadas de la corriente de aire, resulta necesario medir las emisiones de las torres de refrigeración, tanto para determinar sus posibles efectos medioambientales como para evaluar la efectividad del sistema instalado para eliminar el arrastre.

Parte del vapor de agua presente en la corriente del aire de salida puede condensar por contacto con componentes estructurales del sistema o con el aire del ambiente, más frío, formándose a su vez otra familia de gotas, biológicamente inocuas, que pueden fusionarse con las gotas del arrastre. La complejidad de este fenómeno ha motivado el desarrollo de diversas técnicas para la medida del arrastre, dispares en cuanto a sofisticación, principios 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. Las últimas referencias bibliográficas sugieren la necesidad de realizar estudios comparativos entre las distintas técnicas (Missinger et al, 1997). Algunos dispositivos tienen carencias evidentes, y muchos de ellos sólo son capaces de ofrecer una información parcial, referente a la población de gotas muestreadas. Generalmente, se deben usar métodos complementarios para poder caracterizar completamente el arrastre de un equipo de enfriamiento evaporativo.

2. Clasificación de las técnicas de medida del arrastre

Las técnicas de medida del arrastre se clasifican en dos grandes grupos, según midan el flujo arrastrado por la corriente de aire, o la densidad del número de gotas. En la figura 1 se muestra un esquema de esta clasificación.

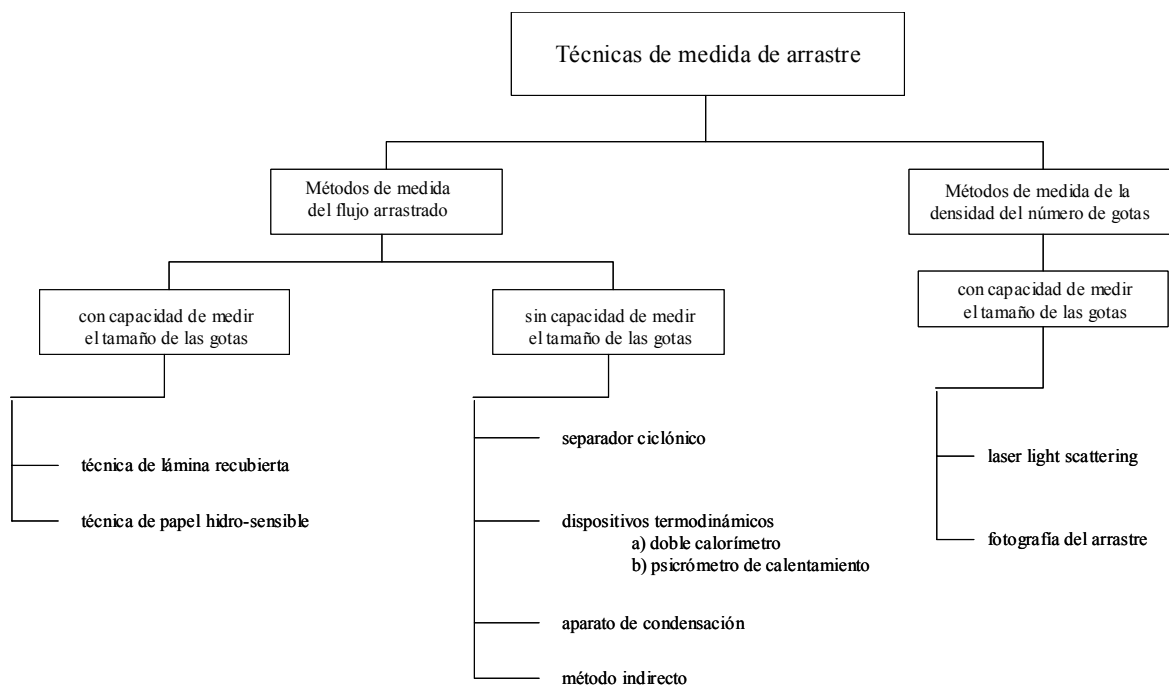


Figura 1. Clasificación de las técnicas de medida del arrastre

Dentro de los métodos de medida del flujo arrastrado, se distinguen dos familias, según puedan medir o no el tamaño de las gotas. En esta última familia destaca el separador ciclónico, los dispositivos termodinámicos y el método indirecto. Las técnicas con capacidad de medir el tamaño de las gotas se basan en el impacto inercial de las mismas sobre una superficie.

El separador ciclónico es un dispositivo mecánico que recoge una muestra isocinética continua de la corriente de salida del aire, de la que separa las gotas arrastradas mediante un ciclón, recogéndolas en una bandeja para su posterior medida. Un estudio detallado se puede consultar en Golay et Al. (1985).

Los dispositivos termodinámicos y el aparato de condensación miden la cantidad de agua en estado líquido que contiene inicialmente una muestra de aire, evaluando las

propiedades termodinámicas de la misma antes y después de ser sometida a procesos psicrométricos característicos de cada método.

El método indirecto se basa en el hecho de que, si se disuelve un material trazador en el agua de circulación, cuando ésta se evapora, el 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 y de aporte, se puede conocer el caudal de agua que ha sido arrastrado por la corriente de aire en forma de gotas.

Las técnicas de lámina recubierta y de papel hidrosensible consisten en la exposición a la corriente de aire de una superficie susceptible de registrar una marca por cada gota que impacte sobre ella. El diámetro de esta marca se puede correlacionar con el tamaño y velocidad de la gota que la generó, de modo que el análisis de estas superficies permite determinar el número y tamaño de las gotas que impactaron sobre ella en un determinado intervalo de tiempo, y consecuentemente calcular el gasto másico arrastrado que atravesó esa superficie.

Los métodos de medida de la densidad del número de gotas permiten conocer el tamaño de las mismas. La técnica de laser light scattering se basa en la distorsión que se produce en la intensidad de un rayo láser que atraviesa una muestra de aire con gotas de arrastre. La técnica de fotografía del arrastre consiste en el análisis de la imagen de una corriente de aire, capturada con una cámara alineada axialmente con una luz estroboscópica. La restricción más importante de estos métodos de medida reside en la alta exigencia en el control de las condiciones de medida, por lo que su uso se limita a condiciones de laboratorio.

3. Desarrollo de una técnica de medida del arrastre con papel hidrosensible

Esta técnica 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, de modo que cuando una gota impacta sobre él 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 técnica se emplea correctamente, 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.

El papel hidrosensible adquirido para el desarrollo de la técnica de medida del arrastre es el modelo TeeJet de dimensiones 52x76 mm, fabricado por la empresa suiza Ciba y comercializado por Spraying Systems Co. Este producto está diseñado específicamente para la medida de la distribución y densidad de gotas en aerosoles, encontrando un amplio rango de utilización en el control de la aplicación de herbicidas y plaguicidas.

El fabricante Ciba suministra una curva de calibración (ver figura 2) que proporciona el factor de aplastamiento de la gota (*spread factor*) a partir del diámetro de la mancha generada en el papel, que se define como:

$$\text{factor de aplastamiento} = \frac{\text{diámetro mancha}}{\text{diámetro gota}} \quad (1)$$

La escasa influencia de la humedad relativa del ambiente y el pH del agua sobre el factor de aplastamiento de las gotas en el papel hidrosensible permite utilizar esta curva de calibración con garantías durante el experimento.

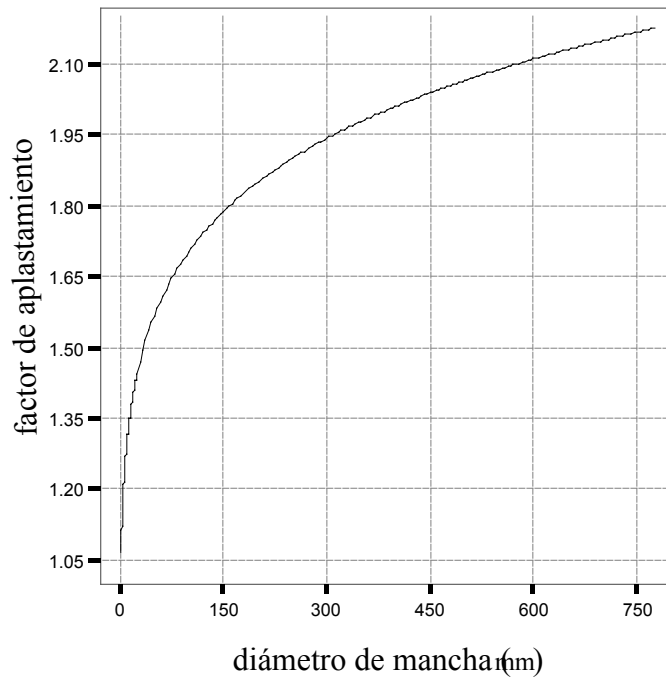


Figura 2. Factor de aplastamiento del agua en papel hidrosensible

El papel hidrosensible con las manchas generadas por las gotas de agua se digitaliza con una resolución de 1200 ppp, y se utiliza el programa de procesado y análisis de imágenes *Image-Pro Plus* para contar, medir y clasificar las manchas según su dimensión. Este análisis devuelve la superficie ocupada por cada mancha de modo que, al suponerse perfectamente circular, se calcula su diámetro. Haciendo uso de la curva de calibración de la figura 2, se obtiene el diámetro de las gotas que generaron cada una de las manchas.

Con esta información ya se puede calcular el arrastre característico de la superficie ocupada por el papel hidrosensible (Wilber y Vercauteren, 1986):

$$\dot{G}_p = \frac{\pi}{6} \frac{\rho}{A_p \cdot t} \sum_{i=1}^N d_i^3 \quad (2)$$

- donde:
- ρ es la densidad específica de las gotas (se asume 1 g/cm^3)
 - 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 que impactó sobre el papel

4. Proceso experimental

La medida del arrastre con la técnica del papel hidrosensible se ha realizado en el techo hídrico-solar situado en el Campus de Alfonso XIII de la Universidad Politécnica de Cartagena. No obstante, esta técnica es extensible a torres de refrigeración.

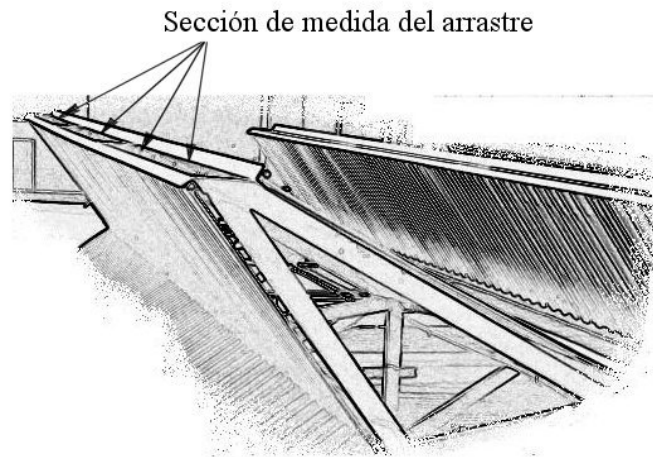
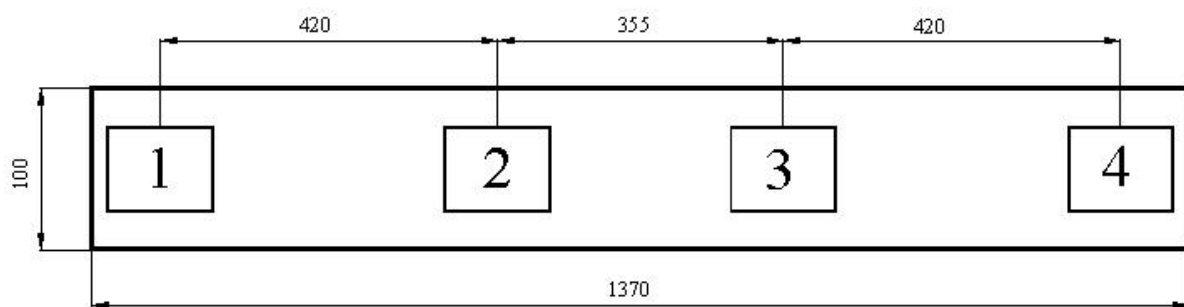


Figura 3. Detalle del techo hídrico-solar

El techo hídrico-solar (Sánchez y Viedma, 2000) es un sistema innovador para enfriamiento de agua que trabaja como parte del sistema convencional de acondicionamiento de aire en edificios. La disposición de las placas reflectantes y absorbentes del techo solar (ver figura 3) forman canales inclinados que cumplen la función de chimeneas solares. En verano, las placas inclinadas que forman el canal reciben la radiación solar, y se alcanza una temperatura relativamente alta, que induce un flujo de aire por convección natural. El viento que circula sobre los canales provoca una depresión barométrica por *efecto venturi* que genera un flujo de aire adicional a través de los mismos. El flujo de aire inducido se mezcla en contracorriente con el agua pulverizada, por contacto directo, creando una versión reducida de una torre de refrigeración. Una mínima parte del agua se evapora, otra escapa en forma de arrastre y el resto se recoge a una temperatura inferior.



NOTA: El dibujo no está a escala

Figura 4. Disposición de los papeles hidrosensibles en la sección de salida de la chimenea solar

Se utilizaron cuatro papeles del modelo especificado en el apartado 3, de dimensiones 52x76 mm, dispuestos como se indica en la figura 4. El tiempo de muestreo fue de 30 segundos. Durante la realización del experimento se midió el caudal de agua pulverizada en la chimenea objeto del estudio. Como la instalación no estaba equipada con ningún caudalímetro, se utilizó un equipo no intrusivo de medida por ultrasonidos, modelo Portaflow 300.



Figura 5. Papel hidrosensible expuesto al arrastre de la corriente de salida de una chimenea solar. (Tiempo de muestreo 30 s.)

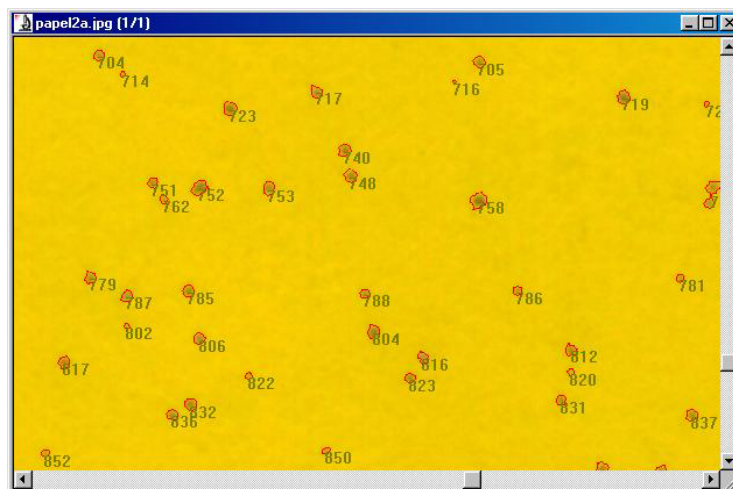


Figura 6. Detalle del procesado de imágenes con Image-Pro Plus

5. Resultados y discusión

El resultado del procesado de las imágenes digitalizadas de los papeles hidrosensibles expuestos en la sección de salida de la chimenea solar, y su análisis según la metodología explicada en el apartado 3, proporcionaron los valores siguientes de gasto másico de arrastre:

Tabla 1. Arrastre en cada uno de los papeles hidrosensibles (mg/s)

Papel 1	Papel 2	Papel 3	Papel 4
0.065	0.1444	0.370	0.4483

Tabla 2. Arrastre por unidad de superficie en los centros geométricos de cada papel hidrosensible (mg/s.mm²)

c.g. 1	c.g. 2	c.g. 3	c.g. 4
$1.64 \cdot 10^{-5}$	$3.65 \cdot 10^{-5}$	$9.36 \cdot 10^{-5}$	$1.13 \cdot 10^{-4}$

Los valores del arrastre mostrados en las tablas 1 y 2 señalan una tendencia creciente del mismo de izquierda a derecha. Esto es debido, como causa fundamental, al funcionamiento no uniforme de los pulverizadores en la chimenea solar donde se realizó la medida, así como al efecto de borde, puesto que el módulo en cuestión constituye parte de un lateral del techo solar, más accesible que el resto.

La observación de las marcas del arrastre en los papeles hidrosensibles utilizados en el experimento, así como en otros colocados para estudiar cualitativamente la variación del arrastre en la sección de salida de la chimenea solar, muestran que éste es prácticamente constante en la dirección transversal. De este modo, afrontamos el cálculo del arrastre total en la chimenea solar integrando la curva de regresión del arrastre por unidad de superficie, $\dot{g}(x)$, según el eje longitudinal de la chimenea, extendiendo el cálculo a la dimensión transversal:

$$\dot{G} = \int_0^{1370} \int_0^{100} \dot{g}(x) dx dy = 9.37 \text{ mg/s} \quad (3)$$

El caudalímetro de ultrasonidos proporcionó un valor medio del agua pulverizada de 0.45 m³/h, de modo que definimos el arrastre de la chimenea solar estudiada, en términos de porcentaje respecto al agua pulverizada, como:

$$\dot{G}(\%) = 0.0075\% \quad (4)$$

Los histogramas de las figuras 7 y 8 permiten caracterizar la distribución del tamaño de las manchas y las gotas que las generaron, respectivamente, en los cuatro papeles hidrosensibles estudiados, y el gráfico de la figura 9 muestra el volumen de agua acumulado en función del número de gotas, pudiéndose concluir que el 50% del arrastre total es emitido en forma de gotas de diámetro inferior a 150 μm .

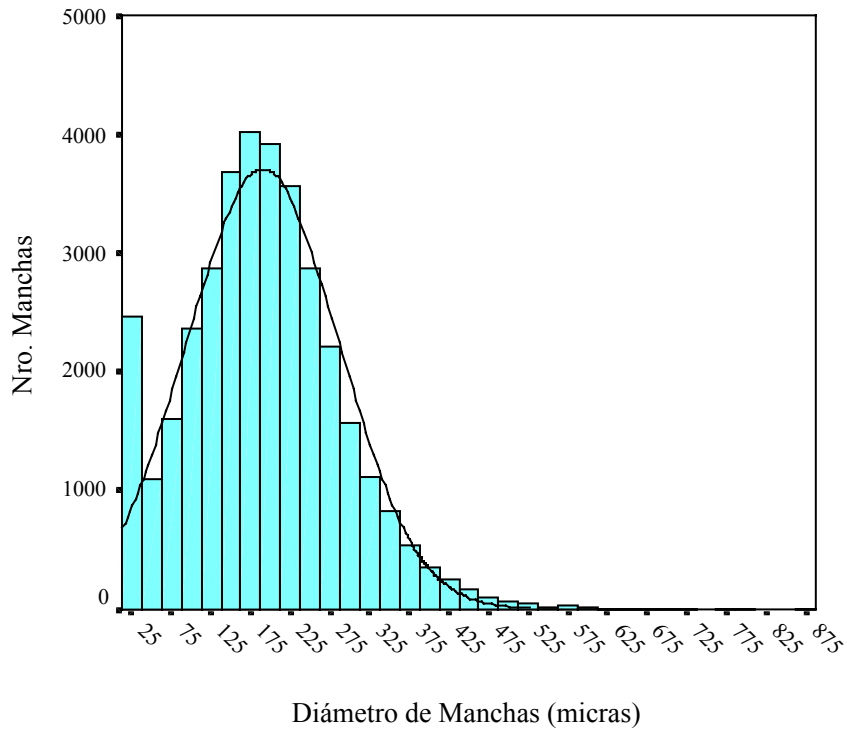


Figura 7. Histograma de frecuencias del diámetro de manchas

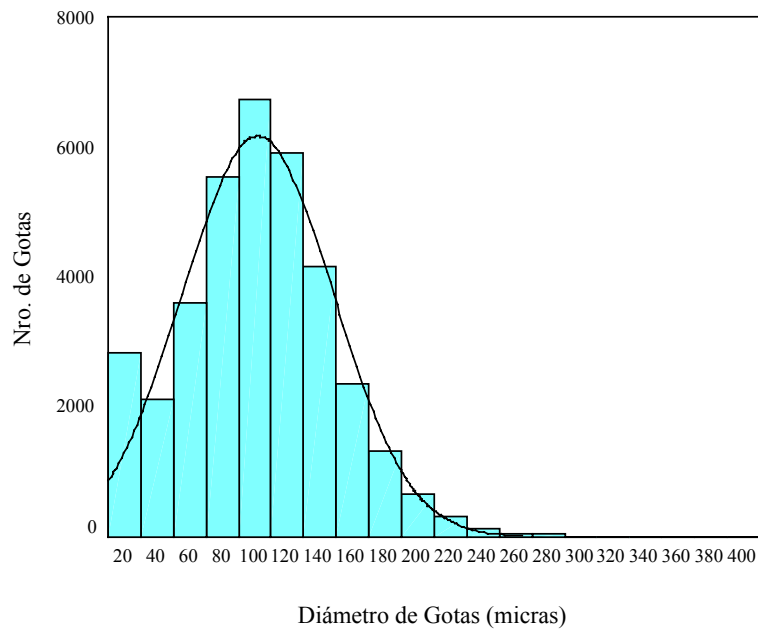


Figura 8. Histograma de frecuencia del diámetro de las gotas

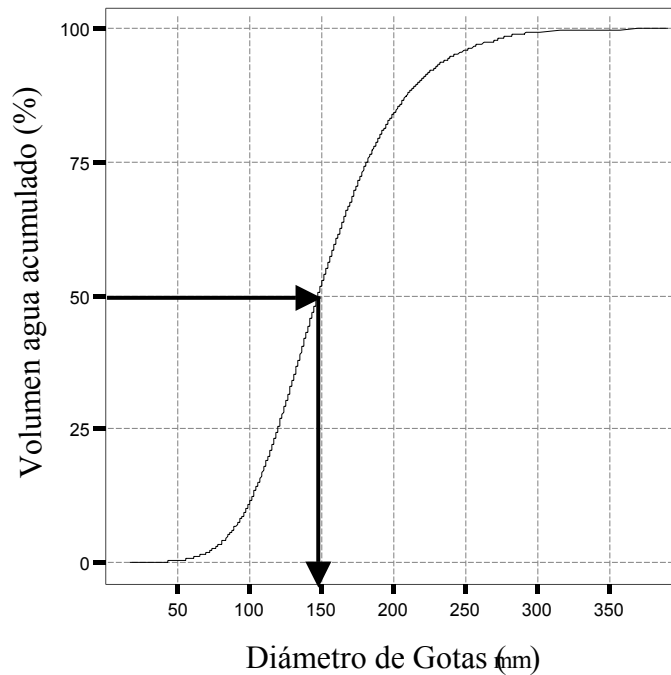


Figura 9. Volumen acumulado de agua emitida frente al diámetro de la población de gotas

7. Conclusiones

Se presenta una técnica de medida del arrastre económica y sencilla, que no sólo permite cuantificar el gasto másico arrastrado por el aire en equipos de enfriamiento evaporativo, sino también conocer la distribución de las gotas en el mismo, información que puede utilizarse para modelar el proceso de transporte y deposición del aerosol. Aunque se ha aplicado el ejemplo a la medida del arrastre en un techo hídrico-solar, la técnica del papel hidrosensible se puede extender a la medida en torres de refrigeración.

El desarrollo de esta técnica permitirá en futuros trabajos realizar ensayos de arrastre de distintas torres de refrigeración en condiciones de funcionamiento reales, así como realizar una comparativa con los valores referidos en la normativa: el Decreto 173/2000 del Gobierno valenciano establece como valor máximo del arrastre el 0.1% del caudal de agua pulverizada en el aparato, y el informe UNE100030 de octubre de 2001 fija un valor máximo de arrastre del 0.05%.

Otros trabajos planteados son la comparación de los resultados obtenidos del arrastre para el techo solar y las torres de refrigeración, así como el estudio de la influencia del régimen de giro del ventilador (mediante la instalación de un variador de frecuencia) en la emisión del arrastre en torres de refrigeración.

Agradecimientos: Los autores desean mostrar su agradecimiento a la Consejería de Ciencia, Tecnología, Industria y Comercio de la Región de Murcia, por la financiación del proyecto "Evaluación de la sustitución de torres de refrigeración por techos hídrico-solares.

Aspectos energéticos y de emisión de aerosoles”. El trabajo descrito en este artículo es una parte de dicho proyecto.

Referencias

- Golay M.W., Glantschnig W.J. y Best F.T. (1985), Comparison of methods for measurement of cooling tower drift. *Cooling Tower Institute (Houston, Texas, USA)*. Paper No. TP85-06. Category: Drift
- Missimer J.R., David P.E., Wheeler E., Hennon K.W., (1997), The Relationship Between SP and HGBIK Drift Measurement Results - New Data Creates a Need for a Second Look. *Cooling Tower Institute*. Paper No. T-98-16. Category: Drift
- Sánchez, A., Viedma, A., (2000), Hydrosolar roof for integrated energy dissipation and capture in buildings. *Energy and Buildings* 33 (2001) 673-682
- Wilber, K., Vercauteren, K. (1986), Comprehensive drift measurements on a circular mechanical draft cooling tower. *Cooling Tower Institute (Houston, Texas, USA)*. Paper No. TP86-01. Category: Drift