

# COMPARACIÓN DEL ARRASTRE EN TORRES DE REFRIGERACIÓN Y TECHOS HÍDRICO-SOLARES

**Juan Pedro Solano Fernández, Pedro Juan Martínez Beltrán,  
Antonio Viedma Robles, Manuel Lucas Miralles#**  
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](mailto: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](mailto: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.

PALABRAS CLAVE: arrastre, papel hidrosensible, tratamiento de imágenes, torres de refrigeración

## 1. INTRODUCCIÓN

Emitir una cantidad de energía al medio ambiente es una necesidad que se plantea a la hora de construir ciclos de potencia o refrigeración. Una de las alternativas que alcanzan este propósito son los equipos de enfriamiento evaporativo. Torres de refrigeración y condensadores evaporativos tienen como principio de funcionamiento el intercambio de energía y masa entre una corriente de agua y una de aire. Estos equipos pulverizan agua que se encuentra con una corriente de aire, y que al no estar saturado, hace que se evapore una pequeña parte de ésta y se enfríe el resto. Sin embargo, la corriente de aire captura pequeñas gotas de agua, que no han sufrido cambio de fase, y salen al exterior del equipo. A esta cantidad de agua emitida al exterior se le denomina arrastre. El arrastre tiene dos aspectos negativos a considerar, por un lado constituye una posible fuente de contaminación ambiental y, por otro, una pérdida de agua. Para

reducirlo se 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 los equipos de enfriamiento evaporativo, tanto para determinar sus posibles efectos medioambientales como para evaluar la efectividad del sistema instalado para eliminar el arrastre. De hecho, parte de la legislación existente plantea valores máximos admisibles de arrastre para estos equipos (Decreto 173/2000 del Gobierno valenciano o informe UNE 100.030 de octubre de 2001).

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) [1]. 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.

El techo hídrico-solar es un equipo de enfriamiento evaporativo equivalente a las torres de refrigeración, en el que el flujo de aire inducido por convección natural a través de dos placas inclinadas calentadas por radiación solar, se mezcla en contracorriente con el agua pulverizada. En este trabajo se presenta la técnica del papel hidrosensible, y se aplica a la medida del arrastre en torres de refrigeración y techos hídrico-solares, realizando una comparación de resultados. Esta técnica se fundamenta en las marcas que dejan las gotas de agua del arrastre al impactar en uno de estos papeles, expuesto a la corriente del aire de salida. El tratamiento de la imagen con el software Image-Pro Plus permite evaluar el tamaño y distribución de las gotas que constituyen el arrastre, así como el gasto másico del mismo.

## **2. TÉCNICA DEL PAPEL HIDROSENSIBLE PARA LA MEDIDA DEL ARRASTRE**

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 mismas.

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 1) 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:

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

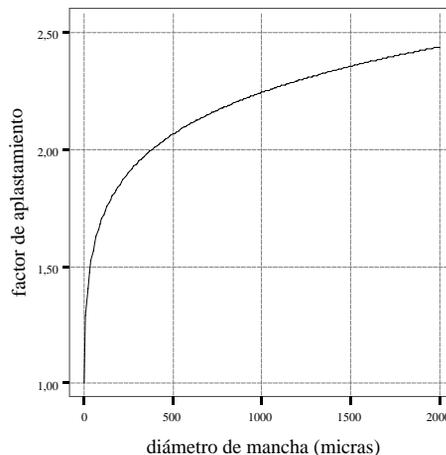


Figura 1. Factor de aplastamiento del agua en papel hidrosensible.

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 procesamiento 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 circular, se calcula su diámetro. Haciendo uso de la curva de calibración de la figura 1, 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:

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

donde:  $\rho$  es la densidad específica de las gotas (se asume 1 g/cm<sup>3</sup>)

$A_p$  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

### 3. MEDIDA DEL ARRASTRE EN TORRES DE REFRIGERACIÓN

#### 3.1 Torres objeto de estudio

La técnica presentada se ha empleado para medir el arrastre en dos torres de refrigeración que operan en equipos de climatización de las instalaciones de la Universidad Politécnica de Cartagena. Las características de estos equipos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las torres de refrigeración estudiadas.

	Torre 1	Torre 2
Marca :	Intercal	TEVA
Modelo:	PI-16 5B3	TMR – 035
Dimensiones:	1970x1970x4437 mm	2480x1285x3250 mm
Potencia a disipar:	620 kW	550 kW
Ubicación:	Rectorado UPCT, Edificio “La Milagrosa”	Residencia de Estudiantes “Alberto Colao”

#### 3.2 Descripción de los ensayos

Para el ensayo de la torre 1 se utilizaron quince papeles del modelo especificado en el apartado 2, de dimensiones 52x76 mm, dispuestos como se indica en la figura 2. El tiempo de muestreo fue de treinta segundos. Durante la realización del ensayo se midió el caudal de agua pulverizada en la torre objeto de estudio. Como la instalación no estaba equipada con ningún caudalímetro, se utilizó un equipo no invasivo de medida por ultrasonidos de la marca Micronics, modelo Portaflow 300.

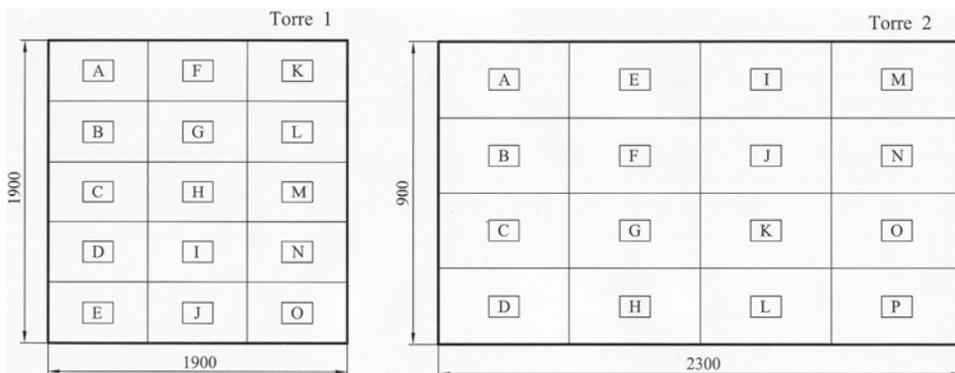


Figura 2. Disposición de los papeles hidrosensibles en la sección de salida de las torres 1 y 2.

El resultado del procesado de las imágenes digitalizadas de los papeles hidrosensibles expuestos al flujo de aire de salida de la torre 1, y su análisis según la metodología explicada en el apartado 2, proporcionaron los valores de gasto másico arrastrado registrados en las tablas 2, 3, 4 y 5. Se ha representado el gasto másico que atraviesa cada papel hidrosensible, en mg/s, y el arrastre por unidad de superficie que asociamos al centro geométrico de cada uno de los papeles. Como criterio de inferencia, atribuiremos a cada región de la sección de salida que ocupa cada papel, su valor de arrastre por unidad de superficie.

Tabla 2. Gasto másico registrado en los papeles hidrosensible A a D

		Papel A	Papel B	Papel C	Papel D
Torre 1	mg/s	0.0026	0.021	0.0551	0.0509
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	$6.59 \cdot 10^{-6}$	$5.31 \cdot 10^{-5}$	$1.39 \cdot 10^{-4}$	$1.29 \cdot 10^{-4}$
Torre 2	mg/s	0.0204	0.0162	0.0154	0.0123
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	$5.16 \cdot 10^{-6}$	$4.11 \cdot 10^{-6}$	$3.90 \cdot 10^{-6}$	$3.11 \cdot 10^{-6}$

Tabla 3. Gasto másico registrado en los papeles hidrosensible E a H

		Papel E	Papel F	Papel G	Papel H
Torre 1	mg/s	0.0175	0.1518	0.1934	0.2301
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	$4.43 \cdot 10^{-5}$	$3.84 \cdot 10^{-5}$	$4.89 \cdot 10^{-5}$	$5.82 \cdot 10^{-5}$
Torre 2	mg/s	0.0091	0.0054	0.0102	0.032
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	$2.36 \cdot 10^{-6}$	$1.37 \cdot 10^{-6}$	$2.58 \cdot 10^{-6}$	$8.10 \cdot 10^{-6}$

Tabla 4. Gasto másico registrado en los papeles hidrosensible I a L

		Papel I	Papel J	Papel K	Papel L
Torre 1	mg/s	0.5119	0.4466	0.0844	0.1178
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	1.30·10 <sup>-4</sup>	1.13·10 <sup>-4</sup>	2.14·10 <sup>-5</sup>	2.98·10 <sup>-5</sup>
Torre 2	mg/s	0.0025	0.0084	0.0139	0.0722
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	6.33·10 <sup>-7</sup>	2.13·10 <sup>-6</sup>	3.52·10 <sup>-6</sup>	1.83·10 <sup>-5</sup>

Tabla 5. Gasto másico registrado en los papeles hidrosensible M a P

		Papel M	Papel N	Papel O	Papel P
Torre 1	mg/s	0.1483	0.2255	0.0969	-
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	3.75·10 <sup>-5</sup>	5.71·10 <sup>-5</sup>	2.45·10 <sup>-5</sup>	-
Torre 2	mg/s	0.0156	0.0133	0.0120	0.0130
	mg/(s·mm <sup>2</sup> )	3.95·10 <sup>-6</sup>	3.35·10 <sup>-6</sup>	3.04·10 <sup>-6</sup>	3.30·10 <sup>-6</sup>

De esta manera, calculamos el gasto másico de agua que escapa por la sección de salida de la torre,  $\dot{G}_s$ , como:

$$\dot{G}_s = A_s \sum_{i=1}^N \dot{G}_{p,i} \quad (3)$$

donde  $A_s$  es la superficie de la región de la sección de salida asociada a cada papel, y  $\dot{G}_{p,i}$  es el gasto másico por unidad de superficie asociado a cada uno de los papeles expuestos.

Finalmente, el arrastre se calcula como la relación entre el gasto másico de agua que escapa de la torre ( $\dot{G}_s$ ) y el gasto másico total que se pulveriza ( $\dot{m}$ ):

$$G(\%) = \frac{\dot{G}_s}{\dot{m}} \times 100 \quad (4)$$

Tabla 6. Cálculo del arrastre en las torres 1 y 2

	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$\dot{G}_s$ (mg/s)	$\dot{q}$ (m <sup>3</sup> /h)	$G$ (%)
Torre 1	2406.67	224	34	0.0023
Torre 2	1293.75	8.90	15	0.0002

En las figuras 3 y 4 se muestra el histograma de frecuencia para las manchas registradas en los papeles hidrosensibles expuestos, y la contribución de los

diferentes diámetros de gota al gasto másico total expulsado por la sección de salida del aire de la torre.

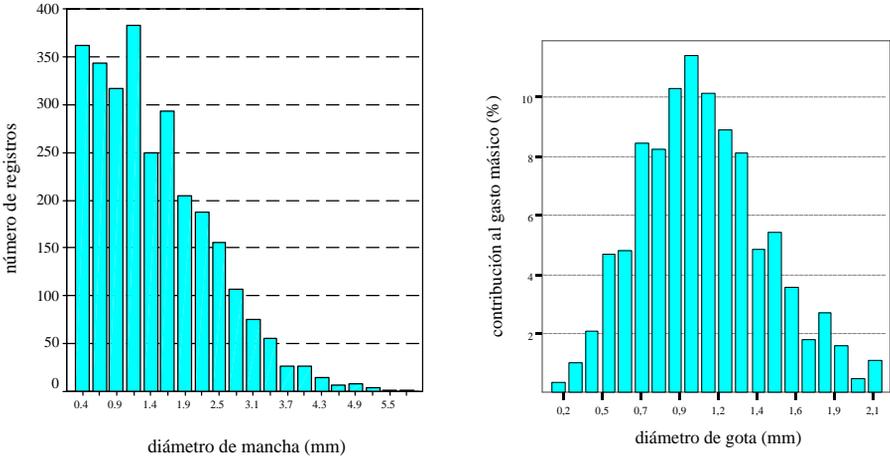


Figura 3. Espectros del tamaño de gotas para la torre 1.

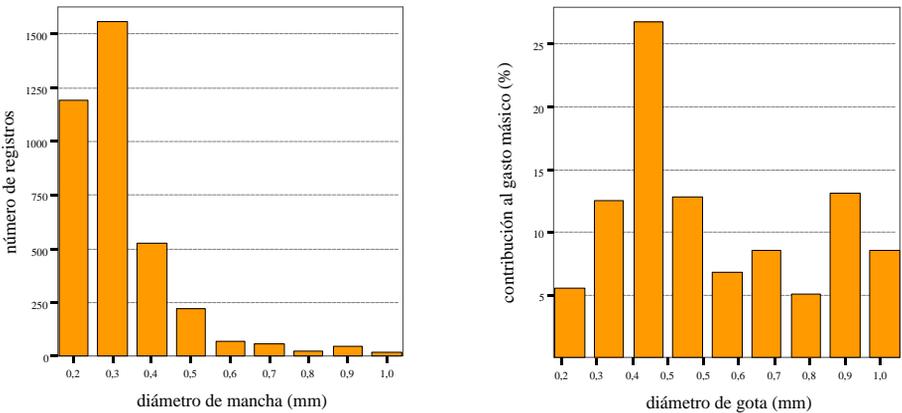


Figura 4. Espectros del tamaño de gotas para la torre 2.

Las figuras 5 y 6 muestran el volumen acumulado frente al diámetro de gota, de donde se observa que, para la torre 1, la mitad del volumen que escapa como arrastre lo hace en forma de gotas de diámetro inferior a 1050 micras (vm), mientras que para la torre 2, el valor de vm es 475 micras.

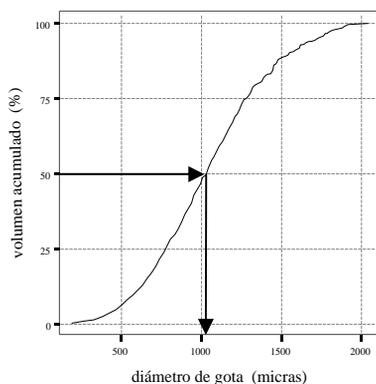


Figura 5. Volumen acumulado para la torre 1.

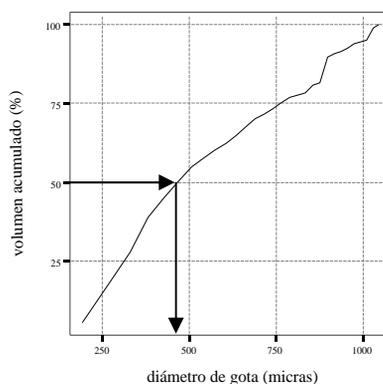


Figura 6. Volumen acumulado para la torre 2.

#### 4. MEDIDA DEL ARRASTRE EN TECHOS HÍDRICO-SOLARES

Se ha realizado la medida del arrastre en el techo hídrico-solar ubicado en el Campus de Alfonso XIII de la Universidad Politécnica de Cartagena, siguiendo una metodología similar a la de la medida en torres de refrigeración. En condiciones normales de operación, no se registró emisión de aerosoles en la sección de salida de las chimeneas solares. Para poder caracterizar las gotas emitidas por el equipo, se incrementó el caudal de pulverización a cuatro veces su valor.

Tabla 7. Gasto másico registrado en los papeles hidrosensibles A a E (mg/s).

	Papel 1	Papel 2	Papel 3	Papel 4	Papel 5	Papel 6
mg/s	0.015	0.024	0.029	0.042	0.031	0.032
mg/(s·mm <sup>2</sup> )	3.80E-06	6.07E-06	9.36E-06	1.06E-05	7.84E-06	8.10E-06

Tabla 8. Cálculo del arrastre en el techo hídrico-solar.

$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$\dot{G}_s$ (mg/s)	$\dot{q}$ (m <sup>3</sup> /h)	$G$ (%)
333.33	1.53	0.45	0.0012

Las figuras 7 y 8 muestran las curvas que caracterizan el aerosol en el techo hídrico-solar.

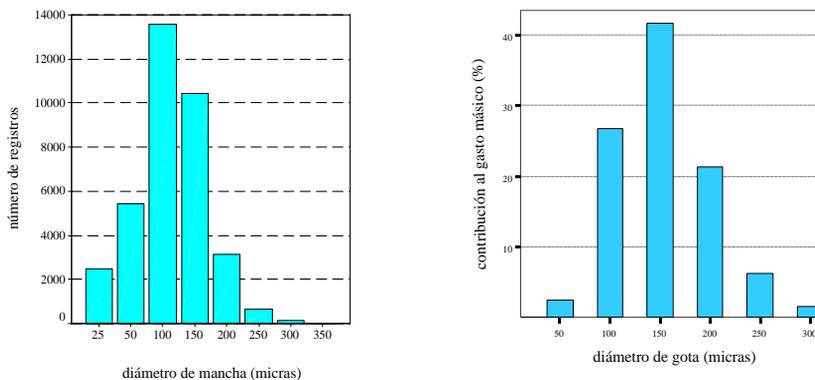


Figura 7. Espectros del tamaño de gotas para el techo hídrico-solar

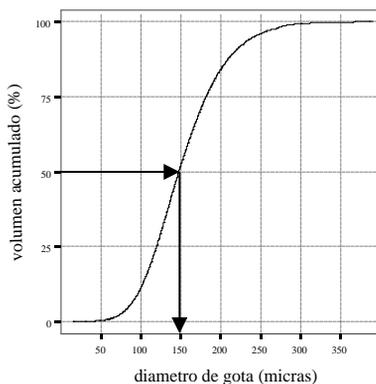


Figura 8. Volumen acumulado para el techo hídrico-solar

## 5. CONCLUSIONES

	Torre 1	Torre 2	Techo hídrico-solar
arrastre G(%)	0.0021	0.0002	0.0012
vm (micras)	1050	475	150

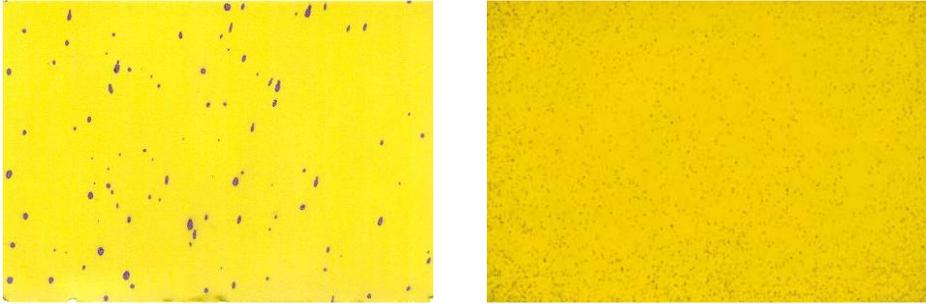


Figura 5. Papel hidrosensible expuesto al arrastre de la corriente de salida de una torre de refrigeración (izqda.) y un techo hídrico solar (dcha.). Tiempo de exposición: 30 s

## REFERENCIAS

- [1] Braum, A. (1998), Título del artículo. *Título de la revista en cursiva*. Vol. 43, Nº 5, pág. 456-468.
- [2] Graham, T. y Whiler, M. (1999), Título del artículo. *Libro de Actas del II Congreso de Ingeniería*, Editores, Ciudad.
- [3] Chu, H., Lee, W., Zhuo, K. (2000). *Título del libro*, Editorial, Ciudad.