

PREDICCIÓN DE LA DEPOSICIÓN DE GOTAS DE AGUA PROCEDENTES DE UNA TORRE DE REFRIGERACIÓN EN UN ENTORNO URBANO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN DE DICHAS GOTAS

SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, Francisco⁽¹⁾; CONSUEGRO MOLINA, Antonio Javier⁽¹⁾;

RUIZ RAMÍREZ, Javier⁽²⁾; LUCAS MIRALLES, Manuel⁽²⁾; HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, Mónica⁽¹⁾;

ZAMORA PARRA, Blas⁽¹⁾; SÁNCHEZ KAISER, Antonio⁽¹⁾;

psanchezf90@gmail.com

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

⁽²⁾Universidad Miguel Hernández, Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales

RESUMEN

Las torres de refrigeración representan uno de los sistemas de enfriamiento con mayor rendimiento, especialmente en equipos de climatización de potencia considerable. Sin embargo, debido a su principio de funcionamiento, son susceptibles de generar problemas medioambientales, tales como la dispersión de la bacteria “Legionella” u otros contaminantes a la atmosfera, a través de las gotas de agua expulsadas, con el correspondiente riesgo para la población del entorno urbano de la torre.

En este trabajo se investiga la cantidad de agua evaporada en una torre de refrigeración en función de las diferentes variables de entrada: temperatura exterior, humedad relativa exterior, tamaño de las gotas y distribución de tamaños de las gotas. Los resultados obtenidos tienen una aplicación práctica inmediata, pues sirven para predecir bajo qué condiciones atmosféricas y de las gotas hay menos evaporación, y por tanto más gotas de agua (con los contaminantes en su interior) alcanzan el suelo.

El estudio se ha realizado a partir de una modelización numérica de la emisión de gotas procedentes de una torre de refrigeración en un entorno urbano, bajo diferentes condiciones ambientales. Una vez validado experimentalmente el modelo a través de diferentes variables de interés tales como la velocidad, la temperatura o la deposición en diferentes puntos, se realiza el análisis de la evaporación. El análisis consiste en identificar las distintas variables que influyen en la evaporación a través de un análisis dimensional. Una vez identificadas se realiza un análisis estadístico para poder cuantificar la influencia de cada variable en la masa total de agua evaporada.

Palabras clave: Evaporación, Torres de refrigeración, Modelización Numérica

1. Introducción

Las torres de refrigeración representan uno de los sistemas de enfriamiento con mayor rendimiento, especialmente en equipos de climatización de potencia considerable. Sin embargo, debido a su principio de funcionamiento, son susceptibles de generar problemas medioambientales, tales como la dispersión de la bacteria “Legionella” u otros contaminantes a la atmósfera, a través de las gotas de agua expulsadas, con el correspondiente riesgo para la población del entorno urbano de la torre.

El principio de operación de las torres de refrigeración requiere pulverizar agua sobre una superficie de intercambio de calor o directamente al flujo de aire que está pasando. Las gotas de agua son incorporadas al flujo de aire y expulsadas a la atmósfera por la torre, fenómeno llamado arrastre. Un análisis del arrastre ayudaría a controlar y delimitar las áreas susceptibles de ser alcanzadas por la bacteria en un supuesto brote de “Legionella”. El arrastre producido en la torre de refrigeración depende de varios factores, siendo las condiciones atmosféricas y de las gotas los más influyentes. La mecánica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta adecuada para estimar el arrastre, evaporación y deposición en el entorno de las torres de refrigeración [1], [2]. En el trabajo de Lucas et al. [3] se lleva a cabo un estudio de la influencia de las variables psicométricas en el arrastre producido en una torre de refrigeración mediante CFD. Meroney [4] presenta resultados numéricos de la dispersión y el arrastre de gotas de agua procedentes de una torre de refrigeración. Este trabajo está basado en el modelo numérico desarrollado por Consuegro et al. [5], donde se analiza la deposición en función de las condiciones atmosféricas, así como la influencia de los edificios en la deposición.

Este trabajo se centra en el proceso de evaporación. Es interesante identificar y cuantificar las variables que influyen en la cantidad de masa evaporada, ya que en un supuesto brote de “Legionella”, cuanto más agua se evaporara, menos cantidad de agua llegaría al suelo y menor sería la probabilidad de contagio por la bacteria. El objetivo de este trabajo es identificar las variables que influyen en la cantidad de agua evaporada, y obtener una correlación para estimar la cantidad de agua evaporada en función de dichas variables.

2. Modelización numérica

2.1. Ecuaciones de comportamiento

El flujo bifásico mezcla de aire húmedo y gotas de agua se ha modelizado mediante una aproximación Euler-Lagrange, tomando el aire húmedo como fase continua y las gotas de agua como fase discreta. La fase continua se ha modelizado mediante las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por el método de Reynolds (RANS), mientras que las trayectorias de las gotas de agua se obtienen al integrar el balance de fuerzas sobre cada una de las partículas. La explicación detallada de las ecuaciones de comportamiento puede verse en [5].

2.2. Dominio y mallado

El dominio 3D usado en este trabajo consiste en un hexaedro de 800 m de largo, 800 m de ancho y 400 m de alto. El dominio reproduce el entorno urbano de la Universidad Miguel Hernández de Elche donde la torre de refrigeración experimental está instalada. La geometría se divide en dos regiones: un cilindro interior de 260 m de radio donde se encuentra tanto el edificio que tiene la torre de refrigeración como los de alrededor, y el hexaedro exterior, que tiene un agujero donde se aloja el cilindro interior (ver Fig. 1.a). Con esta división de la geometría se consigue simular cualquier dirección del viento con sólo un giro del cilindro interior, de manera que el aire siempre entra al dominio perpendicularmente a la cara exterior del hexaedro, evitando así problemas de convergencia. Se ha realizado un estudio de influencia de las dimensiones del dominio [5], encontrando que las dimensiones 800x800x400 m dan resultados precisos e independientes de las dimensiones del dominio seleccionadas.

La malla llevada a cabo es mayormente hexaédrica y estructurada, siendo los elementos más pequeños en las zonas de alrededor de los edificios que en las zonas más alejadas de estos (ver Fig. 1.b). Un estudio de la incertidumbre de los resultados numéricos basado en el índice de convergencia de la malla (GCI) ha sido llevado a cabo [5]. Se han analizado tres tamaños de malla, encontrando que la malla seleccionada tiene incertidumbres, siguiendo el método GCI, comprendidas entre el 1% y el 4.5

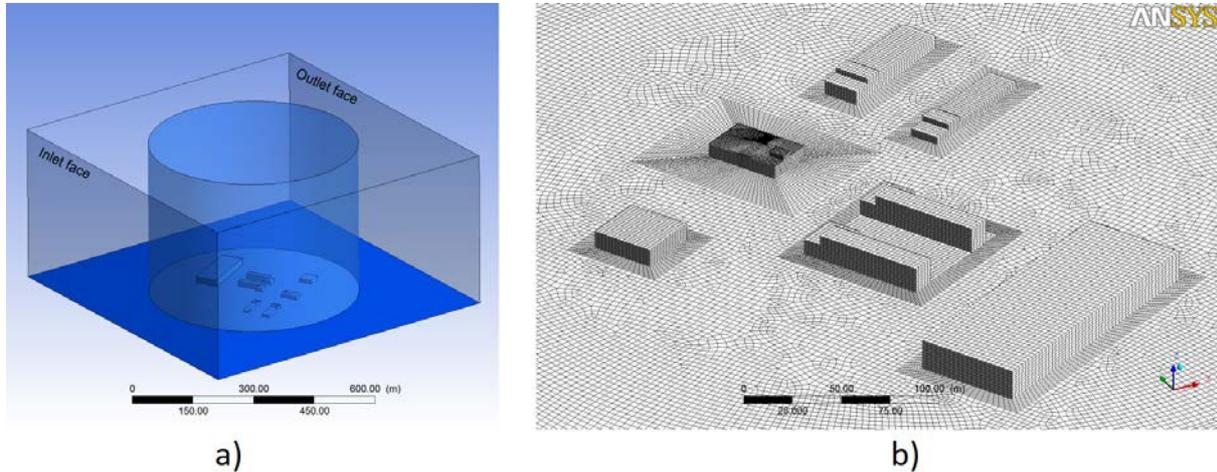


Figura 1. a) Detalle de la subdivisión de la geometría. b) Mallado en el entorno de los edificios.

2.3. Condiciones de contorno y configuración del código

Los resultados numéricos presentados en este trabajo se han obtenido mediante el código CFD de propósito general Ansys-Fuent (V.14). El algoritmo “SIMPLE” ha sido usado para resolver el acoplamiento entre las ecuaciones de continuidad y momento. El esquema “upwind” de segundo orden se ha seleccionado para la discretización espacial. Se ha considerado que el caso ha convergido cuando los residuales normalizados de todas sus variables están por debajo de 10^{-5} .

Respecto a la condiciones de contorno, en la entrada al dominio se han definido los perfiles de velocidad, energía cinética turbulenta y disipación viscosa tomados del trabajo de Richard y Hoxey para la capa límite atmosférica [6]. Los parámetros de los perfiles se han seleccionado a partir de datos experimentales tomados en el área de la torre de refrigeración:

$$U(z) = \frac{u_{ABL}^*}{k_v} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right), \quad (1)$$

$$k = \frac{u_{ABL}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_{ABL}^{*3}}{k_v(z+z_0)}. \quad (3)$$

El perfil de temperaturas a la entrada del dominio se ha obtenido a partir de los datos experimentales de la torre meteorológica localizada en la Universidad Miguel Hernández de Elche (en el entorno de la torre de refrigeración), capaz de medir la temperatura del aire en tres alturas distintas (15, 25 y 40 m). La humedad específica a la entrada del dominio también se toma a partir de la humedad específica experimental tomada por la torre meteorológica. La condición de contorno de superficie simétrica se ha tomado para las superficies laterales del dominio. La superficie superior se ha definido como pared móvil con rozamiento, su velocidad es la correspondiente de la ecuación (1) para la altura $z=400\text{m}$, contribuyendo así a asegurar la homogeneidad de la capa límite viscosa. La condición de contorno “outflow”, que supone flujo totalmente desarrollado se ha tomado para la salida.

Para modelizar la fase discreta que sale de la torre de refrigeración se toman la velocidad, temperatura, humedad y gasto másico de agua tomados en los ensayos experimentales. Se ha supuesto que las gotas tienen una distribución de tamaños Rosin-Rammner, cuya ecuación relaciona el tamaño de la gota D_p con la fracción másica de agua que representan las gotas con mayor tamaño:

$$M_{D_p} = e^{-[D_p/\overline{D_p}]^n} \quad (4)$$

2.4. Validación experimental del modelo

Se han realizado 14 simulaciones numéricas, cada una de ellas con distintas condiciones atmosféricas (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad) y de las gotas de agua. Por cada simulación se han realizado dos ensayos experimentales: el ensayo de arrastre y el ensayo de deposición. En el ensayo de arrastre se mide, mediante papeles hidrosensibles, la distribución de los tamaños de las gotas, así como el gasto másico de agua, temperatura de las gotas al salir de la torre de refrigeración y las variables atmosféricas. En el ensayo de deposición sirve para obtener la masa de agua por metro cuadrado depositada en diferentes puntos del entorno de la torre. A partir de los datos experimentales tomados se validan los resultados numéricos obtenidos. Son cuatro las variables validadas: velocidad del aire, temperatura del aire, deposición y VMD (Volume mean diameter). El VMD está relacionado con el tamaño de las gotas depositadas en cada punto del dominio. El VMD es el tamaño de diámetro tal que todos los diámetros mayores que él depositados en el papel hidrosensible suponen el 50% de la masa de agua depositada en el papel. La validación completa se encuentra detallada en A. Consuegro et al. [5].

3. Resultados numéricos

A continuación se presentan los principales resultados numéricos obtenidos para los 14 casos simulados. La tabla 1 muestra las variables características de cada caso.

Tabla 1. Variables características en cada uno de los 14 casos simulados.

nº	T _a °C	HR _a %	T _{ws} °C	D 10 ⁻³ m	d º	dt K/m	m _{ev} kg/s
1	23.85	65.50	20.05	0.072	254.3	-0.0140	72.8%
2	17.45	40.50	11.85	0.330	131.0	-0.0080	48.4%
3	10.70	68.80	9.50	0.332	127.9	-0.0108	0.0%
4	15.65	44.00	10.75	0.033	132.4	-0.0077	92.6%
5	13.85	49.50	9.75	0.033	132.4	-0.0065	91.2%
6	9.16	35.60	9.20	0.332	143.5	-0.0110	0.0%
7	17.75	62.50	14.35	0.331	302.4	-0.0075	40.5%
8	17.45	63.70	14.25	0.331	302.4	-0.0110	42.2%
9	21.43	61.80	17.45	0.281	287.0	-0.0105	46.8%
10	20.20	67.00	17.60	0.281	287.0	-0.0125	44.9%
11	28.81	28.00	17.75	0.327	332.4	-0.0019	53.2%
12	27.15	26.70	17.35	0.327	332.4	-0.0110	53.0%
13	23.55	51.00	17.95	0.357	124.0	-0.0070	51.1%
14	25.15	31.00	16.55	0.390	125.1	-0.0037	51.5%

Donde T_a y HR_a son la temperatura y humedad relativa del aire exterior en el entorno de la torre, T_{ws} la temperatura a la que permanecen las gotas de agua durante la evaporación; D es el tamaño promedio de las gotas expulsadas de la torre, d es la dirección del viento y dt el gradiente vertical de temperatura exterior. La única variable de salida es m_{ev}, correspondiente a la fracción másica de agua evaporada.

3.1. Condiciones en el entorno de la torre de refrigeración

Los resultados numéricos muestran que aunque el aire que sale de la torre de refrigeración lo haga en unas condiciones distintas a las del aire atmosférico exterior (menos temperatura y más humedad

específica), se adapta rápidamente a las condiciones del aire exterior. La figura 2.a muestra el contorno de temperaturas en el entorno de la torre de refrigeración para el caso 9, el aire saturado sale de la torre con una temperatura $T_t = 19^\circ\text{C}$, pero rápidamente se calienta hasta la temperatura exterior ($T_a = 21.4^\circ\text{C}$), igual ocurre con la humedad específica (fig. 2.b), el aire sale saturado de la torre ($HR_t = 99\%$), pero rápidamente alcanza la humedad del aire exterior ($HR_a = 62\%$). Similar fenómeno ocurre con las gotas de agua que salen de la torre (fig. 2.c), abandonan la torre con una temperatura baja, pero en muy poco tiempo alcanzan una temperatura cercana a la de bulbo húmedo del aire exterior ($T_{ws} = 17.45^\circ\text{C}$).

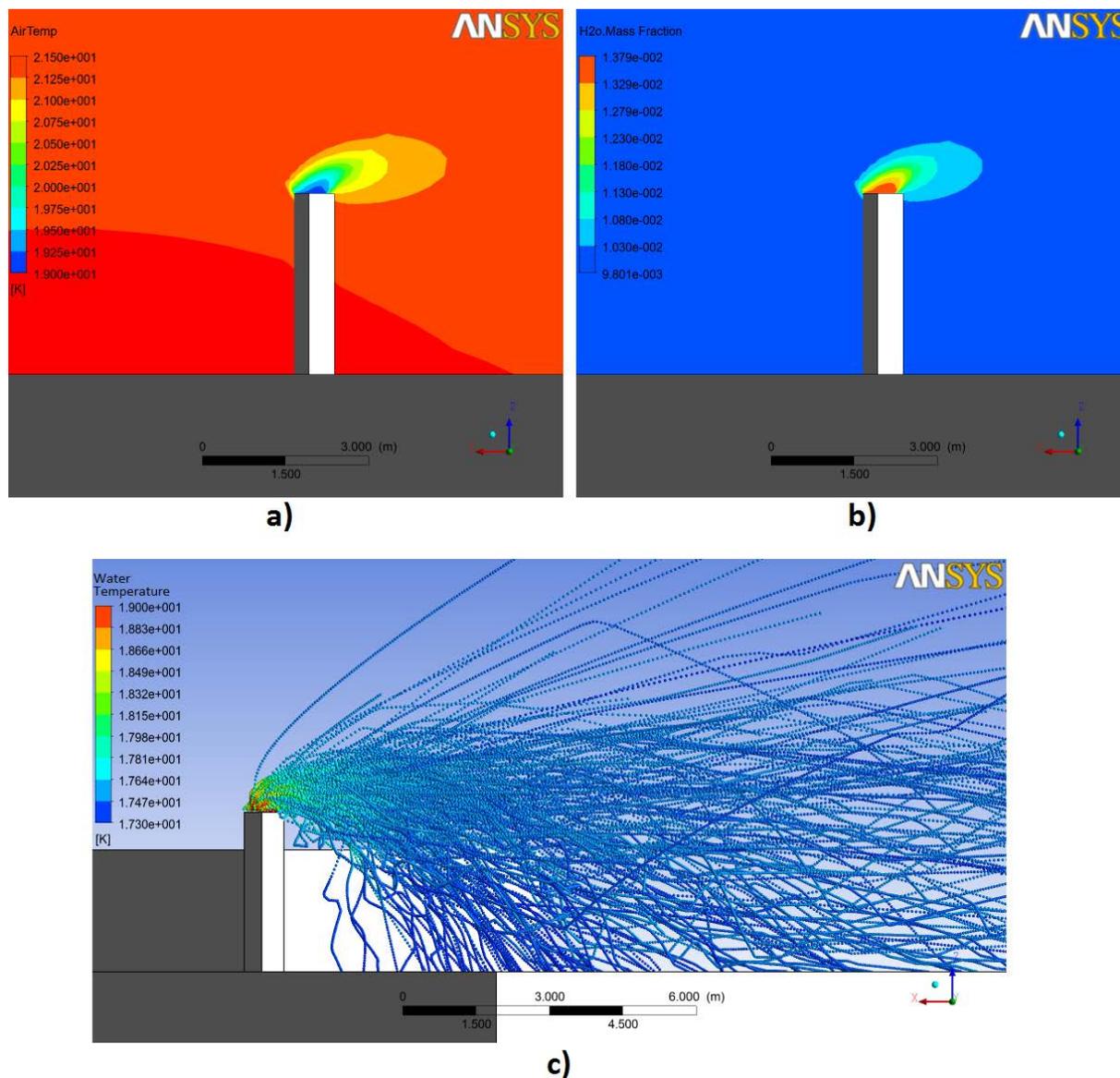


Figura 2. Resultados numéricos en el entorno de la torre para el caso 9. a) Temperatura atmosférica; b) Humedad específica; c) trayectorias y temperatura de las gotas de agua.

3.2. Descripción de la evaporación de las gotas de agua

Observando los resultados numéricos obtenidos, se pueden diferenciar claramente tres patrones de evaporación, dependiendo de las condiciones atmosféricas y de las gotas.

- En los casos 4 y 5, la mayor parte de las gotas se evaporan totalmente, menos del 10% del agua expulsada por la torre llega al suelo. Ambos casos tienen una característica común y que los diferencia del resto de casos, el diámetro medio de las gotas liberadas de las torres es 10 veces menor que en el resto de casos. La figura 3.a muestra la evaporación en el caso 4.

- El segundo patrón de evaporación es el producido en los casos 3 y 6. En ambos casos la mayor parte del agua (en torno al 80%) se deposita en el suelo, y el resto escapa del dominio, sin que se produzca apenas evaporación. Esto se debe a que en ambos casos las condiciones atmosféricas dificultan enormemente la evaporación. Para que haya evaporación la temperatura alcanzada por las gotas debe de ser mayor de la temperatura de vaporización $T_{vap} = 10.85^{\circ}\text{C}$. Las gotas salen de la torre a una temperatura T_t , y en un periodo muy corto de tiempo alcanzan y mantienen una temperatura cercana a la de bulbo húmedo del aire atmosférico. Sin embargo, en ambos casos la temperatura del aire exterior es tan baja que no permite que las gotas alcancen T_v , imposibilitando la evaporación de las mismas. La figura 3.b muestra la evaporación en el caso 6.
- En el resto de casos, donde el tamaño de las gotas no es tan pequeño ni la temperatura exterior tan baja, tiene lugar un tercer patrón de evaporación, aproximadamente la mitad de la masa de agua liberada de la torre se evapora, mientras que el resto se deposita en el suelo. La figura 3.c muestra la evaporación en el caso 9.

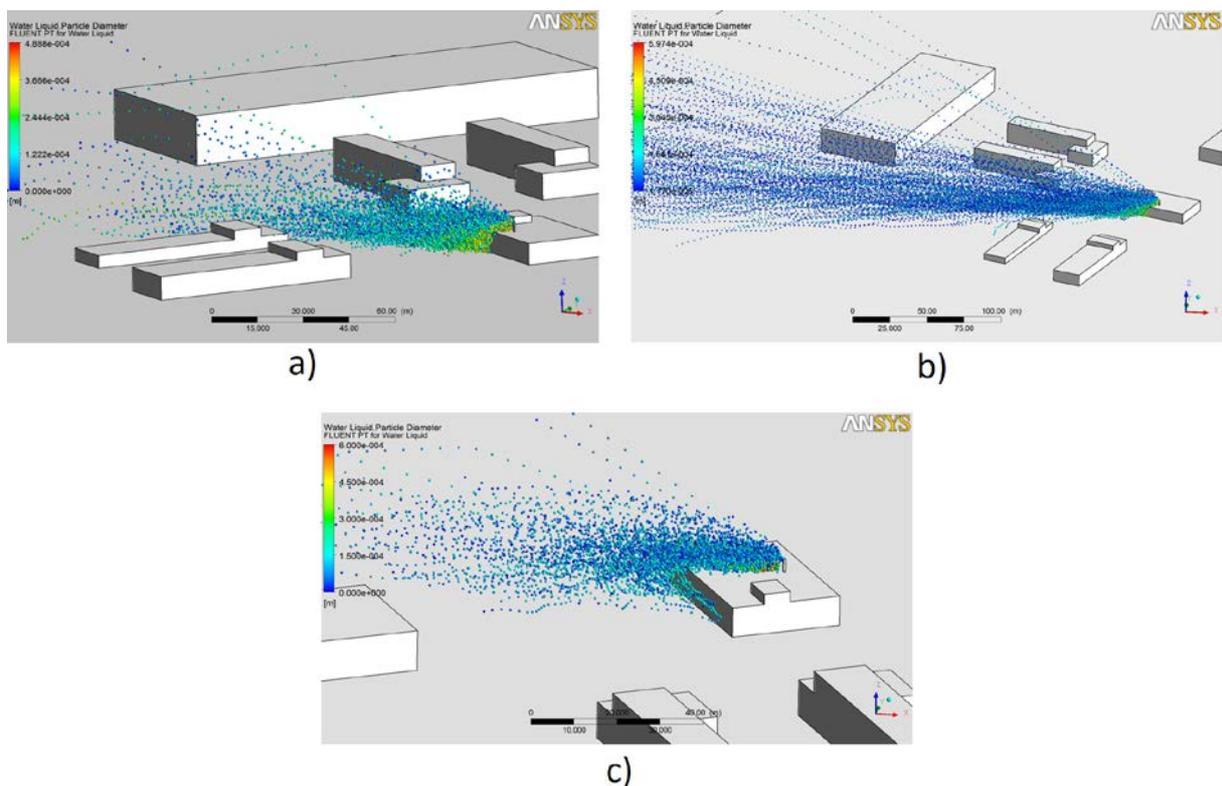


Figura 3. Distintos patrones de evaporación identificados en las simulaciones numéricas: a) Primer patrón (caso 4); b) Segundo patrón (caso 6); c) Tercer patrón (caso 9).

3.3. Análisis estadístico de las variables que intervienen en la evaporación

Una vez comprendidos e identificados los distintos los distintos fenómenos de evaporación que tienen lugar en las simulaciones numéricas llevadas a cabo, es posible identificar las variables que influyen en la evaporación, así como cuantificar su efecto en la cantidad de agua evaporada.

Dicho estudio ha sido llevado a cabo mediante análisis estadístico con el programa SPSS. Se ha realizado una regresión lineal por mínimos cuadrados a partir de los resultados obtenidos en los 14 casos simulados. Se han definido 5 variables adimensionales independientes, además de la variable dependiente:

- $y = \frac{\dot{m}_{ev}}{\dot{m}}$; es la variable dependiente, representa la fracción másica de agua evaporada. \dot{m}_{ev} es la cantidad de agua que se evapora (kg/s), \dot{m} es la cantidad de agua que sale de la torre de refrigeración (kg/s).

- $\pi_1 = \frac{P_{vsat,T_{ws}} - P_{v,T_a,HR_a}}{P_{vsat,T_{ws}}}$; este parámetro independiente representa las condiciones atmosféricas del caso. $P_{vsat,T_{ws}}$ es la presión de vapor en la película de aire saturado que rodea a las gotas, asumiendo que dicho aire tiene la misma temperatura que la gota T_{ws} . P_{v,T_a,HR_a} es la presión de vapor en el aire atmosférico exterior (T_a, HR_a). La diferencia entre ambas presiones de vapor Δp actúa como fuerza motriz en el proceso de evaporación. La máxima diferencia posible es cuando $HR_a = 0\%$, en ese caso $\Delta p = P_{vsat,T_{ws}}$.
- $\pi_2 = D \left(\frac{\pi \rho_w}{6m} \right)^{1/3}$; este parámetro tiene en cuenta el diámetro medio de las gotas D . Si todas las gotas tuvieran el mismo diámetro D , el área total de las gotas sería $A_d = n4\pi D^2$, donde n es el número de gotas expulsadas cada segundo, luego $m = n\rho_w \frac{4}{3}\pi \frac{D^3}{8}$, siendo m la masa de agua liberada en cada segundo. El área total de las gotas se podría reescribir como $A_d = \frac{24m}{D\rho_w}$. El mínimo área total se produciría si toda la masa de agua que sale cada segundo se concentrara en una sola gota de gran tamaño D_1 ; en ese caso $m = \rho_w \frac{4}{3}\pi \frac{D_1^3}{8}$, y el área de dicha gota sería $A_1 = 4\pi \left(\frac{6m}{\rho_w\pi} \right)^{2/3}$. El cociente entre ambas áreas totales es $\frac{A_1}{A_d} = D \left(\frac{\pi\rho_w}{6m} \right)^{1/3}$. Luego esta variable adimensional relaciona el área total de las gotas con el mínimo área posible.
- $\pi_3 = \frac{d}{360}$; parámetro que caracteriza la dirección del viento d .
- $\pi_4 = \frac{dT}{dT_{lim}}$; Este parámetro representa la inestabilidad atmosférica del caso. $dT [K/m]$ es el gradiente vertical de temperatura; $dT_{lim} = -0.0097 K/m$ es el gradiente adiabático seco. Si el gradiente de temperatura es mayor (en valor absoluto) que dT_{lim} , significa que la atmósfera es inestable, si el gradiente es menor que dT_{lim} , la atmósfera es estable.

Usando el software estadístico SPSS, se ha encontrado que la ecuación lineal que minimiza la suma de cuadrados de los residuales es:

$$y = 0.770 + 0.408\pi_1 - 7.853\pi_2 - 0.126\pi_3, \quad \text{con } R^2 = 0.979. \quad (5)$$

Los casos 3 y 6 no han sido incluidos en la regresión debido a que sus condiciones atmosféricas son demasiado frías para que haya algo de evaporación.

Al realizar la regresión, se realiza un test de significancia para cada variable independiente. La hipótesis nula establece que el coeficiente correspondiente a dicha variable es cero, y la hipótesis alternativa que el coeficiente es distinto de cero. El valor de significancia (Sig.) es la probabilidad de que la hipótesis nula sea correcta. Para este trabajo, el nivel de significancia (alpha) es 0.05, lo que significa que la hipótesis nula será rechazada cuando tenga menos de un 5% de posibilidades de ser correcta. El valor de significancia de π_4 es 0.548, considerablemente mayor de 0.05. Luego no se puede concluir que dicho coeficiente sea distinto de cero con más de un 95% de posibilidades.

Los resultados muestran que la variable que más afecta a la evaporación es el tamaño de gota; las condiciones atmosféricas también tienen un notable efecto en la cantidad de masa evaporada. La regresión también muestra influencia, aunque mucho menos que en las anteriores variables, de la dirección del viento, esto tiene sentido en este modelo numérico, ya que los edificios que rodean la torre actúan como pantalla ante algunas direcciones del viento. Ante un hipotético caso de "Legionella" convendría que las gotas fuesen del mínimo tamaño posible, y que las condiciones atmosféricas fueran de temperatura alta y baja humedad relativa, lo que incrementaría el valor de la variable π_1 . Bajo dichas condiciones se conseguiría una alta cantidad de agua evaporada, disminuyendo el riesgo de que las gotas llegaran al suelo portando la bacteria en su interior. El test de

inferencia muestra que la variables π_4 , relacionada con la estabilidad atmosférica del caso no es suficientemente influyente en el proceso de evaporación. Esto puede ser debido a que en este caso la torre de refrigeración tiene poca altura (3.3 m), por lo que la temperatura en el entorno de la torre puede verse afectada por la temperatura del suelo, y su gradiente vertical de temperaturas no ser el mismo que en los puntos más altos de la atmósfera. De igual manera, una variable interesante a analizar en el proceso de evaporación es la altura de la salida de la torre de refrigeración, ya que a más altura más tiempo tendrán las gotas para evaporarse. En este trabajo, al no variar la altura de la torre de refrigeración en ninguno de los casos simulados, no es posible analizar su influencia en la cantidad de agua evaporada.

4. Conclusiones

Se ha realizado un modelo numérico capaz de simular el arrastre, evaporación y dispersión de las gotas de agua procedentes de una torre de refrigeración en un entorno urbano. Tras validar el modelo experimentalmente, se ha realizado un análisis de la evaporación a partir de los resultados numéricos de los 14 casos simulados. Obteniendo las siguientes conclusiones:

- Aunque el aire salga de la torre con una temperatura y humedad diferentes a la exterior, sufre un rápido calentamiento, alcanzando la temperatura y humedad exterior en muy poco tiempo. Algo similar ocurre con la temperatura de las gotas de agua: independientemente de su temperatura de salida, sufren un rápido enfriamiento hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo del aire atmosférico, la cual mantienen durante su evaporación.
- Las variables más influyentes en la cantidad de agua evaporada son el tamaño de la gotas y las condiciones atmosféricas, favoreciéndose una alta evaporación cuando las gotas son pequeñas y el aire exterior tiene una temperatura alta y una baja humedad relativa.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España y por los fondos europeos FEDER a través del Proyecto ENE2013-48696-C2-2-R.

6. Referencias bibliográficas

- [1] K. Takata, K. Nasu, H. Yoshikawa, *Prediction of the plume from a cooling tower*, Cooling Tower Institute Annual Conference, Houston, 1996.
- [2] A. Riddle, D. Carruthers, A. Sharpe, C. McHugh, J. Stocker, *Comparisons between FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling*, Atmospheric Environment 38 (2004) 1029-1034.
- [3] M. Lucas, P. Martínez, J. Ruiz, A. Kaiser, A. Viedma, *On the influence of psychrometric ambient conditions on cooling tower drift deposition*, International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010) 594-604.
- [4] RN. Meroney, *CFD prediction of cooling tower drift*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94 (2006) 463-490.
- [5] AJ. Consuegro, A. Kaiser, B. Zamora, F. Sánchez, M. Lucas, M. Hernández, *Numerical modeling of the drift and deposition of droplets emitted by mechanical cooling towers on buildings and its experimental validation*, Building and Environment 78 (2014) 53-67.
- [6] P. Richards, R. Hoxey, *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using $k - \epsilon$ turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46 & 47 (1993) 145-153.