

Influencia de las condiciones ambientales en la deposición del arrastre de torres de refrigeración

M. Lucas ^{1*}, P.J. Martínez ¹, J. Ruiz ¹, A. Sánchez-Kaiser ², A. Viedma²

¹ Departamento Ingeniería de Sistemas Industriales
Universidad Miguel Hernández
Avda. de la Universidad, s/n, 03202 Elche, España
Telephone: 966 65 88 87 Fax: 966 65 89 79
e-mail: mlucas@umh.es

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

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. Derivado de su propio principio de funcionamiento a 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. Existen diversos aspectos medioambientales destacables relacionados con el arrastre de torres de refrigeración, pero sin duda el más destacable es el referido a la posibilidad de deteriorar la salud humana. La contaminación por Legionella adopta un especial protagonismo dado que han sido numerosos los brotes asociados a este tipo de instalaciones. El objetivo final de este trabajo es la creación de un modelo numérico tridimensional para simular las condiciones de emisión, dispersión y deposición del agua arrastrada de una torre de refrigeración. Posteriormente se analizará la influencia que tienen condiciones ambientales tales como temperatura y humedad relativa con el alcance de las gotas arrastradas en la misma.

Palabras clave: Torres de refrigeración, Legionella, Métodos numéricos, Arrastre, Deposición.

1 Introducción

Las 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. El aire, al no estar saturado, hace que se evapore una pequeña parte de agua enfriándose 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. 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. A esta cantidad de agua emitida al exterior se le denomina arrastre.



Figura 1 Central térmica de Chalk Point, Maryland (E.E.U.U.).

Existen diversos aspectos medioambientales destacables relacionados con el arrastre de torres de refrigeración. Los trabajos de Aynsley y Carson [1] y de Pedersen et al. [6] describen algunos efectos negativos de la emisión de agua arrastrada como la posibilidad de generar problemas de corrosión en

equipos, conductos y elementos estructurales que rodean la torre, la formación de hielo en las zonas cercanas a la instalación en períodos invernales o la degradación de cultivos del entorno por deposición de sales. No obstante, de todos los aspectos medioambientales glosados anteriormente, el más destacable es el referido a la posibilidad de deteriorar la salud humana. La contaminación por *Legionella* adopta un especial protagonismo dado que han sido numerosos los brotes asociados a este tipo de instalaciones [2-4].

El trabajo experimental en el ámbito de la emisión, dispersión y deposición del agua arrastrada de una torre de refrigeración es escaso limitándose a un par de instalaciones. Hanna S.R. [3] y Policastro A.J. et al. [7] describen los estudios experimentales de arrastre y deposición desarrollados en una torre de refrigeración de tiro natural que trabaja como elemento de disipación de calor de la central térmica de 2640 MW de Chalk Point en Maryland. Otro trabajo, también del mismo grupo de científicos, se desarrolló en la central térmica de Pittsburgh CA de 720 MW, siendo en este caso unas torres de refrigeración de tiro mecánico con múltiples celdas, 13 en concreto, ver Policastro A.J. et al.[7]. En ambos trabajos se empleó un trazador denominado Rodamina (sustancia fluorescente) y se midió su deposición en distintas localizaciones en torno a las fuentes de emisión. En cuanto a trabajos numéricos previos en esta problemática únicamente se dispone del trabajo de Meroney [5], que aprovecha los resultados de Policastro para ajustar su modelo. Sin embargo, el trabajo de Meroney presenta algunas limitaciones como asumir que las gotas simuladas son inertes, con lo que no introduce el fenómeno de la evaporación de las mismas. Otro de los aspectos cuestionables de la simulación de Meroney es la referida a la definición de la región de estudio y la excesiva cercanía de las condiciones de contorno a la zona de interés.

El objetivo del presente trabajo es construir un modelo numérico tridimensional para simular las condiciones de emisión, dispersión y deposición del agua arrastrada de la torre de refrigeración de Chalk Point, salvando las carencias detectadas en trabajos previos. Para la validación del mismo se utilizarán los datos experimentales disponibles. El modelo validado se emplea en analizar la influencia de parámetros ambientales tales como humedad específica y temperatura ambiente sobre la deposición del arrastre.

2 Metodología

2.1 Modelo matemático

Los problemas en los que aparecen flujos de fluidos y procesos de transferencia de calor y de masa entre distintas fases están gobernados por principios de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y especies químicas. Estos principios pueden expresarse mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, propuestas para cada elemento diferencial de volumen en los que se divide nuestro dominio.

Para plantear el modelo matemático que rige el problema planteado distinguiremos el conjunto de ecuaciones que gobiernan la fase continua (flujo de aire generado por convección natural en la chimenea), de las que gobiernan la fase discreta (conjunto de gotas de agua pulverizadas) y de las que proporcionan las especies (aire seco y vapor de agua). El acoplamiento entre la fase discreta y la fase continua se efectúa a través de los términos fuente de las ecuaciones de conservación. Las ecuaciones de conservación que gobiernan la fase continua (mezcla entre aire seco y vapor de agua) están representadas por el siguiente sistema:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = S_i'', \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \right] + \rho f_{mi} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i, \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + v_i \frac{\partial e}{\partial x_i} \right) = -p \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \Phi_v + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{j=1}^n h_j' J_j' \right) + S_n, \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial m_i'}{\partial t} + v_i \frac{\partial m_i'}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial J_{i,i}'}{\partial x_i} + S_i', \quad (4)$$

$$J'_{i,i} = -\rho D'_{i,m} \frac{\partial m'_i}{\partial x_i}, \quad (5)$$

donde los términos S'_i , F_i y S_h constituyen los términos fuente de las ecuaciones, m'_i es la fracción másica local de la especie i' , $(\sum_{j=1}^n h'_j \cdot J'_j)$ representa el transporte de entalpía debido a la difusión de la especie j' , $J'_{i,i}$ es el flujo de difusión de la especie i' , que procede de los gradientes de concentración y $D'_{i,m}$ es el coeficiente de difusión para la especie i' en la mezcla.

Por otro lado, las ecuaciones de la fase discreta (gotas de agua líquida) planteadas para cada gota mediante un sistema de referencia lagrangiano, están representadas por la ecuación de balance de fuerzas sobre la partícula, la ecuación de la trayectoria y la ecuación de la energía en la partícula, tal como se muestra a continuación:

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{\partial x_i} (v_i - u_{pi}) + g_i \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{\rho}{\rho_p} u_{pi} \frac{\partial v_i}{\partial x_i}, \quad (6) \quad \frac{dx_i}{dt} = u_p \quad (7)$$

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg}, \quad (8) \quad Re = \frac{\rho D_p (u_{pi} - v_i)}{\mu}, \quad (9)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad (10) \quad F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{\partial x_i}, \quad (11)$$

donde los coeficientes a_j son constantes que se aplican para partículas esféricas para diferentes rangos del número de Re, $F_D(v_i - u_{pi})$ es la fuerza de arrastre por unidad de masa sobre la gota, $g_i(\rho_p - \rho)/\rho_p$ es la fuerza sobre la gota debido a la gravedad por unidad de masa y $(\rho/\rho_p)u_{pi}(\partial v_i/\partial x_i)$ es la fuerza por unidad de masa debida al gradiente de presiones en el medio continuo, siendo respectivamente v_i y ρ la velocidad y la densidad de la fase gaseosa en contacto con la gota; u_{pi} , ρ_p , m_p , T_p , h_{fg} y C_p la velocidad, la densidad, la masa, la temperatura, el calor latente y la capacidad calorífica de la gota, h el coeficiente de transmisión de calor convectivo y dm_p/dt el promedio de evaporación en la gota.

La forma de acoplar ambos sistemas de ecuaciones correspondientes a distintas fases fluidas se realiza a través de los términos fuente de las ecuaciones de conservación de la fase continua. Esto será correcto siempre y cuando el volumen ocupado por la fase discreta sea despreciable en comparación con el ocupado por la fase continua. Para el caso de la ecuación de continuidad y la ecuación de las especies, el término fuente viene definido por:

$$S'_i = \frac{\Delta m_p \dot{m}_{p_o}}{m_{p_o} d\forall}, \quad (12)$$

siendo Δm_p la masa evaporada de una gota dentro del diferencial de volumen considerado en un tiempo dt , \dot{m}_{p_o} el flujo másico de la fase discreta a la entrada de ese diferencial y m_{p_o} la masa de una gota a la entrada de ese diferencial de volumen. La masa evaporada de una gota vendrá dada por

$$\Delta m_p (d\forall) = m_p(t) - m_p(t - dt) = N'_i M'_i A_p dt, \quad (13)$$

donde $dt = ds/(u_p + v)$, siendo ds el tramo de trayectoria comprendido dentro del $d\forall$ considerado; M'_i es el peso molecular de la especie i' , A_p el área de la gota y N'_i la relación de vaporización dada por:

$$N'_i = K_c (C'_{i,s} - C'_{i,\infty}), \quad (14)$$

siendo $C'_{i,s}$ la concentración de vapor en la superficie de la gota y $C'_{i,\infty}$ la concentración de vapor en el aire húmedo que circunda la gota, ambas dadas por:

$$C'_{i,s} = \frac{P_{sat}(T_p)}{R(T_p)} \quad C'_{i,\infty} = \frac{x'_i P_\infty}{R(T_p)}. \quad (15)$$

El coeficiente de transferencia de masa K_c se obtiene de la correlación

$$K_c = \frac{\text{Nu } D'_{i,m}}{D_p} = \frac{(2 + 0,6 \cdot \text{Re}^{1/2} \text{Sc}^{1/3}) D'_{i,m}}{D_p}, \quad (16)$$

Para determinar el término fuente en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, F_i , hemos de obtener la fuerza que experimentan las gotas de agua al atravesar un determinado diferencial de volumen, $d\forall$. Este valor vendrá dado por el producto de la aceleración que experimenta la partícula dentro del $d\forall$ multiplicado por la masa de partículas que hay contenidas en ese $d\forall$. Así,

$$F_i = \left(\frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{\partial x_i} (v_i - u_{p_i}) + g_i \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{\rho}{\rho_p} u_{p_i} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right) \frac{\dot{m}_{p_o} dt}{d\forall} \quad (17)$$

donde D_p es el diámetro de gota y \dot{m}_{p_o} es el flujo másico de partículas que están entrando en ese diferencial de volumen.

Para obtener el término fuente de la ecuación de la energía hemos de determinar el cambio de energía térmica que experimentan las partículas mientras atraviesan un determinado elemento diferencial de volumen. En ausencia de una reacción química, este intercambio de calor se puede calcular como:

$$S_h = \left[\frac{\bar{m}_p}{m_{p_o}} C_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p_o}} \left(-h_{fg} + h_{pyrol} + \int_{T_{ref}}^{T_p} C_{p,i} dT \right) \right] \frac{\dot{m}_{p_o}}{d\forall}, \quad (18)$$

donde \bar{m}_p es la masa promedio de la partícula en el $d\forall$, m_{p_o} la masa inicial de la partícula, C_p el calor específico de la partícula, ΔT_p el cambio de la temperatura de la partícula en el $d\forall$, Δm_p el cambio de masa de la partícula en el $d\forall$, h_{fg} el calor latente de los volátiles producidos, h_{pyrol} el calor de pirólisis de los volátiles, $C_{p,i}$ la capacidad calorífica de los volátiles producidos, T_p la temperatura de la partícula a la salida del $d\forall$ y T_{ref} la temperatura de referencia para el cálculo de la entalpía.

2.2 Procedimiento

Para la creación del modelo numérico se emplea el código de propósito general FLUENT. La información geométrica se refiere a la disponible de la torre de refrigeración de la central térmica de Chalk Point. La región de estudio se define como un paralelepípedo de 1000x2000x750 m, situando la torre de tipo hiperboloide en la coordenada (500, 500, 0). Para el mallado se emplean 505455 celdas tetraédricas. Las condiciones de contorno empleadas se muestran en la figura Figura 4, refiriendo las condiciones ambientales a las descritas en el trabajo experimental de Plicastro [6]. La ubicación de las condiciones de contorno de simetría en los laterales y en la zona superior garantiza la independencia de resultados. La condición de contorno de la velocidad de entrada se describe con una ley potencial ($v = 0,3523 z^{0,6781}$), hasta cota 100 m, a partir de la cual se considera constante e igual a 8 m/s. La inyección de gotas desde la sección de salida de la torre se describe con una distribución Rosin-Rammler ($D_{min}=0,001$ mm, $D_{med}=0,09$ mm, $D_{max}=1$ mm y factor de forma $n=0,65$). Las características principales de la simulación son la utilización de un modelo segregado, empleando un modelo de turbulencia k-ε estandar wall functions con discretizaciones upwind de segundo orden.

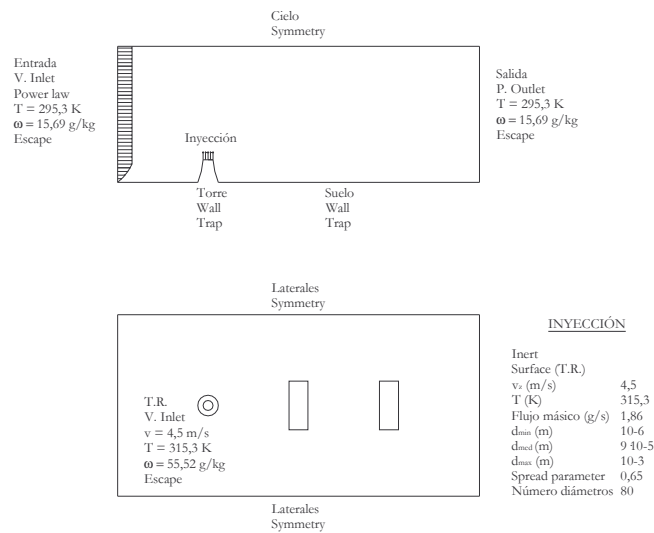


Figura 2 Resumen de las condiciones de contorno empleadas.

Para la validación de los resultados obtenidos por FLUENT, se comparan los niveles de deposición en dos zonas de control situadas a 500 m y 1000 m, aguas abajo de la torre de refrigeración. Aunque FLUENT permita obtener la deposición en todas las zonas de control deseadas (Figura 4), las zonas de control situadas a 500 m y 1000 m son las empleadas por los experimentadores para situar sus elementos de medida. La Figura 3 muestra la evolución de las trayectorias de las gotas en la región de estudio. En la Figura 4 se pueden comparar los resultados obtenidos por el modelo numérico construido en FLUENT con los resultados experimentales. Además, se han incluido los resultados obtenidos por dos modelos analíticos como son el ISC3 y el de Hanna.

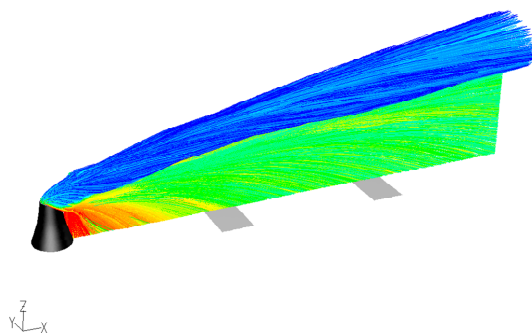


Figura 3 Trayectorias obtenidas en el modelo numérico.

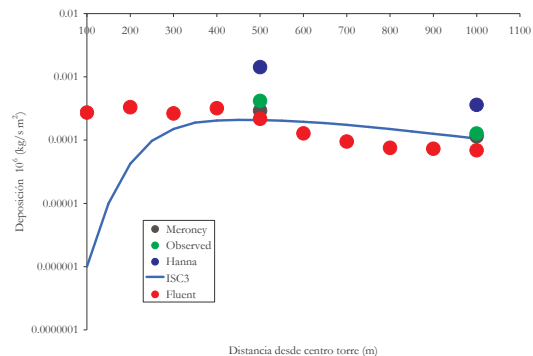


Figura 4 Deposición. Fluent vs experimental.

3 Resultados

Una vez validado el modelo se trata de evaluar la influencia de las condiciones ambientales en la deposición del arrastre. Para ello, primero han de seleccionarse aquellas variables que van a intervenir en el proceso. Después deberán definirse los rangos de valores adecuados para estas variables y por último se obtendrán resultados y se comprobará la coherencia física de los mismos. Las variables escogidas son cuatro variables ambientales (temperatura y humedad ambiente, diámetro medio de la distribución y temperatura de inyección de las gotas de agua en fase líquida) y éstas han sido seleccionadas atendiendo al criterio de seleccionar aquellas variables que tengan influencia sobre la deposición y que además ésta tenga un carácter termodinámico. Asimismo, los rangos de valores definidos para estas variables se definen en relación a las condiciones de funcionamiento real del sistema. Los niveles de las variables estudiadas son: Temperatura ambiente (K):295,3-307,2; Fracción másica (g_v/kg_{ah}):12,5 - 15,45; Diámetro medio (μm): 90 - 180 y Temperatura de salida del agua (K): 305,3 - 315,3.

En la figura 5 se muestran algunos resultados de la fase continua del problema. Concretamente se muestran contornos de humedades específicas de un caso con $T_{amb} = 307,2$ K; Fracción másica

(g_v/kg_{ah}):12,5; Diámetro medio (μm): 180 y Temperatura de salida del agua (K): 305,3. Se puede apreciar la coherencia física de la mezcla de corrientes de aire relacionándolas con las propiedades psicrométricas. En la Figura 6 se muestra la deposición medida en las zonas de control en los dieciséis casos definidos. Los resultados obtenidos muestran que el alcance de las gotas es claramente dependiente de las condiciones psicrométricas ambientales, encontrándose situaciones en las que todas las trayectorias llegan al suelo a una distancia menor de 500 m desde la torre

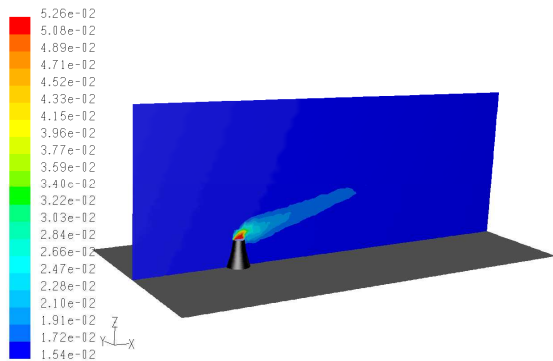


Figura 5: Contornos de humedades en caso 7.

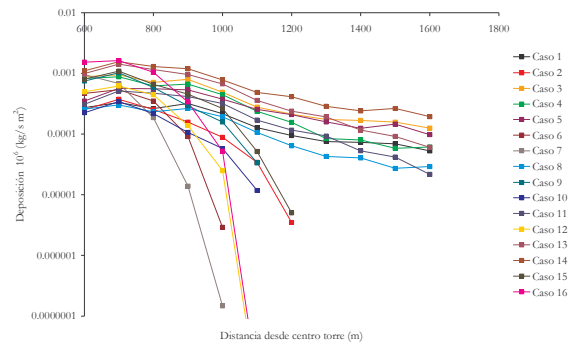


Figura 6: Deposición obtenida.

4 Conclusiones

Se ha creado, validado a través de resultados experimentales, y explotado un modelo numérico de torre de refrigeración determinando la influencia de parámetros ambientales en los resultados relativos a deposición obtenidos. Los resultados muestran que el alcance de las gotas es claramente dependiente de las condiciones psicrométricas ambientales abriendo la posibilidad para futuros estudios de evaluar torres de tiro mecánico en entornos urbanos.

5 Referencias

- [1] Aynsley, E. y Carson, J.E. (1973). Atmospheric effects of water cooling facilities. Cooling tower institute. (Tecnichal paper TP-107B).
- [2] Brown C.M., P.J. Nuorti, R.F. Breiman, A.L. Hathcock, B.S. Fields, H.B. Lipman, G.C. Llewellyn, J. Hofmann and M. Cetron, A community outbreak of Legionaries' disease linked to hospital cooling towers: an epidemiological method to calculate dose of exposure. International Journal of Epidemology 28 (1999) 353-359.
- [3] Hanna, S.R. (1978), A Simple Drift Deposition Model Applied to the Chalk Point Dye. Tracer Experiment, Environmental Effects of Cooling Tower Plumes, Symposium on, May 2-4, 1978, U. of Maryland, PPSP CPCTP-22, WRRRC Special Report No. 9 pp. III-105 to III-118.
- [4] Isozumi, R., Y. Ito, I. Ito, M. Osawa, T. Hirai, S. Takakura, Y. Iinuma, S. Ichiyama, K. Tateda, K. Yamaguchi, M. Mishima. An outbreak of Legionella pneumonia originating from a cooling tower. Scand J Infect Dis. 37(10) (2005) 709-11.
- [5] Meroney, R. CFD prediction of cooling tower drift. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94 (2006) 463-490.
- [6] Pedersen, G.C. Lamkin V.K., Seich, M. (1987). An economical solution to cooling tower drift. Cooling tower institute. (Tecnichal paper T-87-08).
- [7] Policastro, A.J., Dunn, W.E., Gavin, P, Boughton, B., and Ziebarth, J. (1981), Studies on Mathematical Models for Characterizing Plume and drift Behavior from Cooling Towers, Volume 3: Mathematical Model for Single- Source(Single-Tower) Cooling Tower Drift Dispersion, CS-1683, Volume 3, Research Project 906-2, Argonne National. Laboratory, prepared for Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.