

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE SEPARADORES DE GOTAS EN TORRES DE REFRIGERACIÓN

Kaiser, A.S.#, Hernández, M. #, Herrero, R. #, Kling, U.#, Lucas, M.*, Martínez, P.J.*, Ruíz, J.*,
Viedma, A.#, Zamora, B.#

* Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales

Universidad Miguel Hernández

Avda. del Ferrocarril, s/n. Edificio "Torreblanca", 03202, Elche (Alicante) España

Tel.: 966 658 561, Fax: 966 658 979

e-mail: mlucas@umh.es

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

Universidad Politécnica de Cartagena

C/ Dr Fleming, s/n – 30202 Cartagena (Murcia) España

Teléfono: 968 325 984 , Fax: 968 325 999

Resumen

El principio de funcionamiento de torres de refrigeración y condensadores evaporativos se basa en el intercambio de energía y masa entre una corriente de agua y una de aire. Estos dispositivos 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. 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. Existen diversos aspectos medioambientales destacables relacionados con el arrastre de torres de refrigeración. Con objeto de reducir la cantidad de agua arrastrada se instalan en la sección de salida del aire unos deflectores, llamados separadores de gotas. Éstos limitan la cantidad de agua arrastrada mediante impacto inercial. El comportamiento de los separadores de gotas puede cuantificarse por dos factores: la eficiencia de captura de gotas y la pérdida de presión generada. Si la eficiencia de captura de gotas tiene relación con el impacto ambiental del equipo, la pérdida de presión afecta al comportamiento térmico de la torre. En este trabajo se realiza el estudio numérico de la pérdida de presión de diferentes geometrías de separadores de gotas. Para la construcción del modelo numérico se emplea el código numérico de propósito general Fluent. La validación de los resultados numéricos obtenidos se realiza mediante datos experimentales disponibles en la bibliografía.

Palabras clave: torres de refrigeración, arrastre, pérdida de presión, separador de gotas.

1. Introducción

El principio de funcionamiento de torres de refrigeración y condensadores evaporativos se basa en el intercambio de energía y masa entre una corriente de agua y una de aire. Estos dispositivos 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. 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.

Existen diversos aspectos medioambientales destacables relacionados con el arrastre de torres de refrigeración. En origen, el interés se asoció a la emisión de partículas radioactivas desde centrales nucleares (Pasquill [1962] y Van der Hoven [1968]). Los trabajos de Aynsley y Carson [1973] y de Pedersen et al. [1987] describen diversos problemas medioambientales como: pérdida de un bien escaso, como es el agua, sin realizar la función de enfriamiento para la que se ha ubicado en la torre; posibilidad de generar problemas de corrosión en equipos, conductos y elementos estructurales que rodean la torre; formación de hielo en las zonas cercanas a la instalación en períodos invernales; degradación de cultivos del entorno por deposición de sales o efectos sobre la salud humana debido a la exposición a compuestos, bien químicos, bien biológicos del agua arrastrada. En este sentido, la contaminación por legionella tiene un especial protagonismo.

Con objeto de reducir la cantidad de agua arrastrada se instalan en la sección de salida del aire unos deflectores, llamados separadores de gotas. Éstos limitan la cantidad de agua arrastrada mediante impacto inercial. El comportamiento de los separadores de gotas puede cuantificarse por dos factores: la eficiencia de captura y la pérdida de presión generada. La eficiencia de captura se define como la relación entre la cantidad de masa de agua capturada frente al total que llega al separador. Para minimizar los efectos medioambientales del arrastre es interesante que la eficiencia de captura sea elevada. La pérdida de presión a lo largo del separador refleja la resistencia que ofrece este elemento al paso del aire. La presencia de un separador puede reducir el flujo de aire en el interior de la torre, reduciendo asimismo su capacidad térmica. Este efecto puede ser muy perjudicial en el caso de torres de tiro natural puesto que el tiro se provoca por la diferencia de densidad del aire entre la sección de entrada y salida del equipo. En el caso de torres de tiro mecánico, una mayor pérdida de presión motiva un aumento en el consumo de potencia en los motores que accionan los ventiladores si se quiere mantener el mismo gasto másico de aire.

Por lo tanto, para un funcionamiento económico de las torres es recomendable disponer de pérdidas de carga reducidas.

El diseño de separadores de gotas ha tenido una atención limitada en la literatura. Chilton [1952] construyó un dispositivo para la determinación de la pérdida de presión y la efectividad de los separadores en el que se podían ensayar diferentes tipos de separadores y rellenos. Las medidas de pérdida de presión se realizaron a tres velocidades para cada separador. Las medidas de arrastre las realizó con un scrubber drenando el agua capturada a un recipiente. Chilton concluye que los separadores de lamas pueden orientarse de forma que reduzcan las emisiones y produzcan poca resistencia al flujo de aire, siendo la elección más práctica y económica. Foster et al. [1974] realizan estudios analíticos y experimentales sobre dos tipos de separadores de gotas: de doble fila de lamas de madera y otro de forma sinusoidal de fibrocemento. Estos mismos dos tipos de separadores son utilizados por Gardner y Lowe [1974] en sus estudios de impacto ambiental en una torre de tiro natural. Chan y Goyal [1977] desarrollan un modelo numérico para calcular la eficiencia de captura y la pérdida de presión de diferentes separadores, entre los que se incluyen las tipologías utilizadas por Foster et al.. Comparan los resultados numéricos con datos experimentales obtenidos con la técnica laser light scattering. La diferencia de presión entre la entrada y salida de los separadores la determinan mediante con manómetros electrónicos. Los cálculos y los resultados experimental no terminan de coincidir en las geometrías más complejas debido a la no consideración de turbulencia y recirculaciones. Sin embargo, en las geometrías más simples sí que consiguen buenos resultados. El trabajo de Becker y Burdick [1992] investiga la pérdida de presión entre la entrada de aire y el plenum para dos tipos comerciales de separadores de gotas de geometría tridimensional denominados tipo Z y tipo T. Este estudio también analiza el efecto que tiene el ángulo de descarga del aire. Este trabajo muestra la importancia de diseñar los separadores de forma que se tenga en cuenta la distribución del flujo de aire con objeto de reducir la pérdida en el resto de elementos de la torre. Además determinan un ángulo de descarga óptimo para reducir las pérdidas de presión desde la entrada del aire hasta la sección de descarga del mismo en la salida del ventilador.

En general, cuanto mayores son los cambios en la dirección del flujo mayor es la eficiencia de captura pero, a la vez, mayor es la pérdida de presión. Para alcanzar una alta eficiencia de captura con bajas pérdidas de presión, se requiere optimizar el diseño de los separadores en términos de estos dos factores. Ni en la bibliografía ni a nivel industrial se dispone de un

procedimiento de diseño establecido, de forma que los diseños existentes han sido generados a través de procesos de prueba, experiencia e innovaciones.

En este trabajo se realiza el estudio numérico de la pérdida de presión de dos geometrías de separadores de gotas. Las mejoras recientes en los algoritmos de resolución numérica, la implementación de nuevos modelos de turbulencia así como el aumento en la capacidad computacional presentan a la CFD como la herramienta ideal para la optimización del diseño de separadores. Para la construcción del modelo numérico se emplea el código numérico de propósito general Fluent. La validación de los resultados numéricos obtenidos se realiza mediante datos experimentales disponibles en la bibliografía.

2. Modelización numérica

Los separadores de gotas estudiados en el presente trabajo son los descritos en el trabajo de Gardner et al. [1974]. El separador con dos filas de lamas inclinadas, denominado wooden lath por los autores, y el de forma sinusoidal, citado como asbestos-cement. Las dimensiones principales así como la disposición de los mismos se muestran en las figuras 1 y 2 respectivamente.

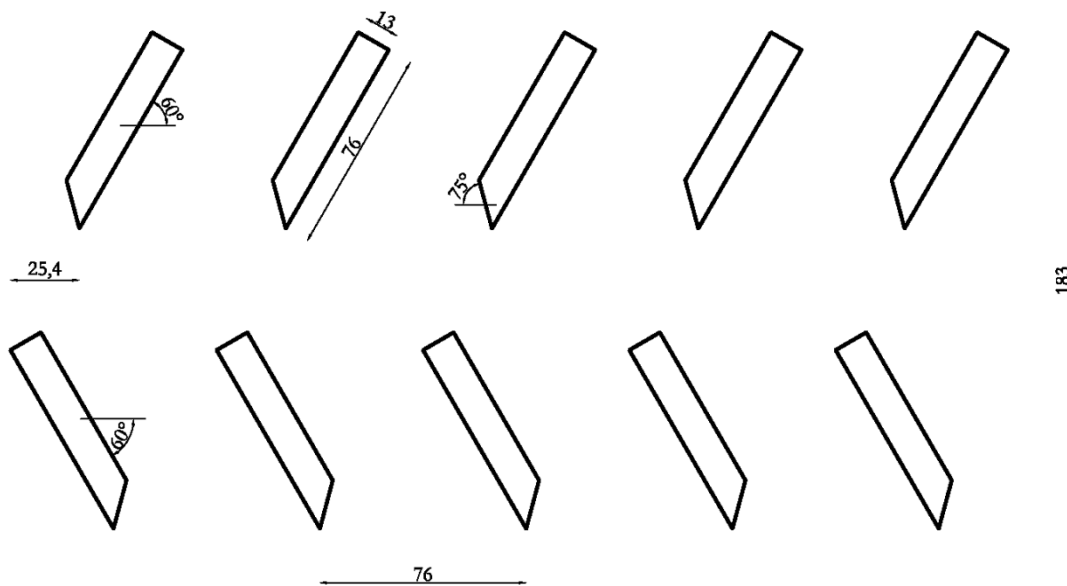


Figura 1: Dimensiones principales del separador de gotas de lamas.

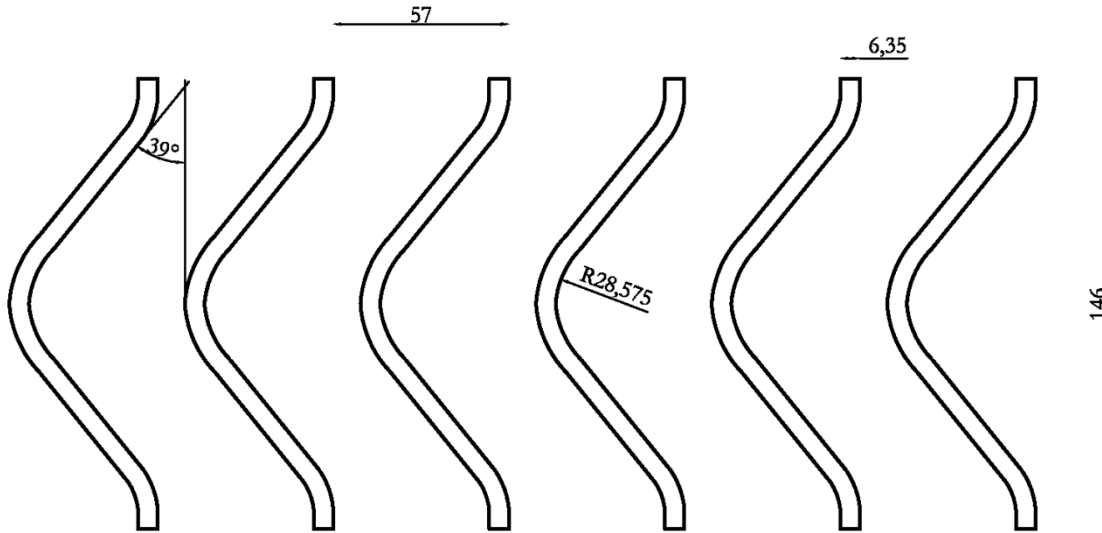


Figura 2: Dimensiones principales del separador de gotas tipo sinusoidal.

Las ecuaciones que gobiernan el problema físico son dos, la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento, debido a que se considera un modelo adiabático (no existe transferencia de calor al ambiente) ni se incluyen gotas de agua líquida (especies) para modelar el arrastre. No obstante, el número de Reynolds considerado para la resolución del problema hace que el problema sea turbulento, por lo que las ecuaciones de Navier-Stokes deben ser modificadas para poder resolver el flujo turbulento correctamente. Para ello se emplea el método de Reynolds Averaging Navier-Stokes (RANS), que consiste en introducir términos adicionales en las ecuaciones de Navier-Stokes para caracterizar la turbulencia. En este ámbito el código numérico de propósito general empleado para la simulación (FLUENT en concreto) implementa una serie de modelos de turbulencia para resolver gran variedad de tipos de flujos. Concretamente el modelo empleado en la simulación es el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ estándar, que incorpora dos nuevas ecuaciones a las ya presentes, una para k (energía turbulenta) y otra para ε (disipación turbulenta). A continuación se muestran las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento modificadas de manera que los correspondientes términos asociados a la turbulencia ya han sido añadidos (1) y (2) respectivamente, así como las ecuaciones para k (4) y para ε (5).

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u'_i u'_j})$$

(2)

donde

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

donde

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad C_\mu = \text{cte} \quad (6)$$

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

donde los escalares $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε son constantes con los siguientes valores:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad C_{2\varepsilon} = 1,92 \quad C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (8)$$

Estos valores son los que incorpora FLUENT por defecto y han sido determinados experimentalmente con aire y agua y funcionan bien en las simulaciones en un amplio rango de problemas.

El sistema de ecuaciones anterior ha sido resuelto, como se ha mencionado en párrafos anteriores, con el código de propósito general FLUENT, basado cálculo de volúmenes finitos. El modelo de turbulencia empleado ha sido el k-ε estándar y para el acoplamiento entre las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento con la presión se ha empleado el algoritmo “SIMPLE”. Además, todos los cálculos han sido realizados empleando discretizaciones de segundo orden. El criterio de convergencia establecido es el siguiente $|\phi^{(i+1)} - \phi^{(i)}| / \phi^{(i)} < 10^{-4}$, donde i denota el número de iteración y ϕ puede representar cualquiera de las variables dependientes.

Para la resolución del modelo, se considera un modelo bidimensional donde la anchura y la altura de la región de estudio se corresponden con la anchura y la altura de la torre de refrigeración donde se encontraban dispuestos los separadores en el ensayo original. Ésta posee unas medidas de 2210 x 1154 mm (alto x ancho) y se considera que el aire entra en la región de estudio por la parte inferior de la misma y escapa por la superior. Los puntos de medida de presión para evaluar la pérdida de presión introducida por el separador se encuentran situados de manera simétrica a 35 mm de las caras superior e inferior respectivamente del separador de lamas, y a 27 mm de las caras superior e inferior respectivamente del separador sinusoidal.

Para obtener los resultados, se ha empleado en la simulación una malla obtenida como resultado de la aplicación del método de generación de mallas descrito en Freitas [1999], el cual consiste en identificar aquella malla que con el menor costo computacional garantiza la independencia de los resultados con la misma. Junto con el análisis propuesto por Freitas, se ha realizado un estudio de independencia de resultados con el parámetro y^+ . En particular, ha sido necesaria la confección y simulación de 8 mallas diferentes para identificar la malla empleada finalmente en el separador de lamas y 7 en el caso del separador sinusoidal. Éstas poseen un mallado estructurado con un total de 471400 celdas para el separador de lamas y 394880 celdas para el separador sinusoidal. Además consta principalmente de tres zonas de mallado, una zona interior (donde se encuentran ubicados los separadores), una zona exterior y una zona intermedia que conecta las dos anteriores. En la zona interior el mallado es mucho más denso para calcular correctamente el flujo en las paredes de los separadores y en la zona exterior el mallado es más burdo debido a que en esta zona no se requiere una gran precisión en el cálculo. La zona intermedia está mallada de manera que permite enlazar las dos zonas anteriores. En la figuras 3 y 4 se puede observar el mallado empleado en la simulación para los separadores de gotas wooden lath y abestos-cement respectivamente, así como detalles de mallado de la zona interior y en los separadores de gotas.

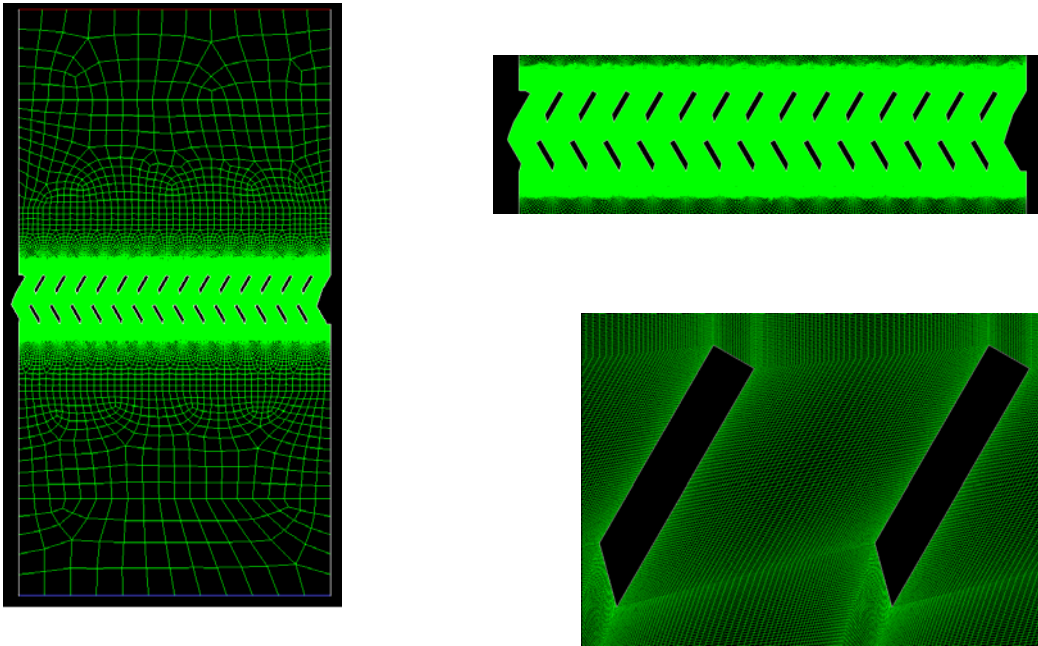


Figura 3: Mallado empleado en el separador de gotas de dos filas de lamas. Izquierda: región de estudio completa. Centro: detalle mallado en zona interior. Derecha: detalle mallado en separador.

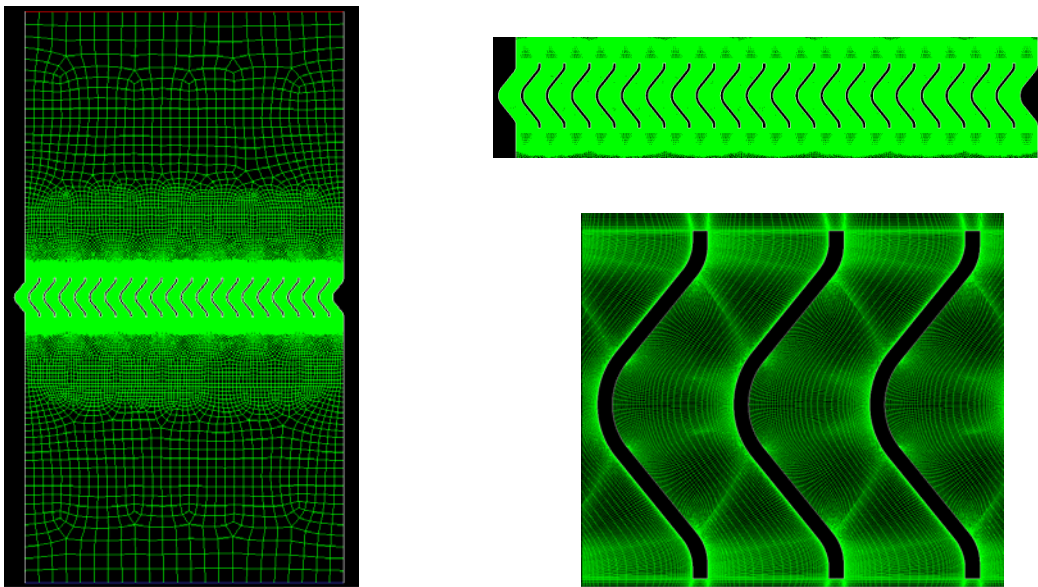


Figura 4: Mallado empleado en el separador de gotas tipo sinusoidal. Izquierda: región de estudio completa. Centro: detalle mallado en zona interior. Derecha: detalle mallado en separador.

Las condiciones de contorno empleadas se resumen a continuación. Para las paredes de la región de estudio así como los separadores de gotas se emplea la condición de contorno “wall”. El tratamiento de pared utilizado en la resolución es el “enhanced wall treatment” en el que debe cumplirse que el valor de y^+ en la pared debe ser como máximo 1 ($y^+ < 1$). Las condiciones de entrada se modelizan con condición de contorno “velocity inlet” y las de salida con “pressure outlet”. Las velocidades con las que se ensayan los separadores son

0,91, 1,52 y 2,13 m/s para el separador de lamas y 0,94, 1,58 y 2,23 m/s para el separador sinusoidal. Se emplea aire a 20°C con una densidad de 1,206 kg/m³ como fluido de trabajo. La figura 5 muestra esquemáticamente las condiciones de contorno en el problema.

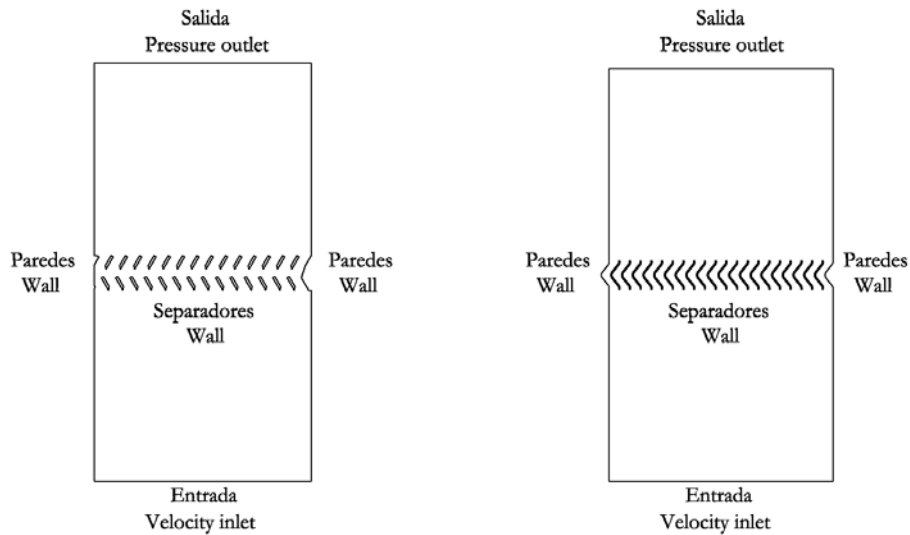


Figura 5: Condiciones de contorno empeladas en el modelo numérico.

3. Resultados

De entre los resultados más importantes obtenidos en la simulación numérica, cabe destacar los campos de velocidades y presiones, y la comparativa entre resultados numéricos y experimentales. La Figura 6 y Figura 7 muestran los resultados obtenidos con el código numérico para los dos tipos de separadores simulados.

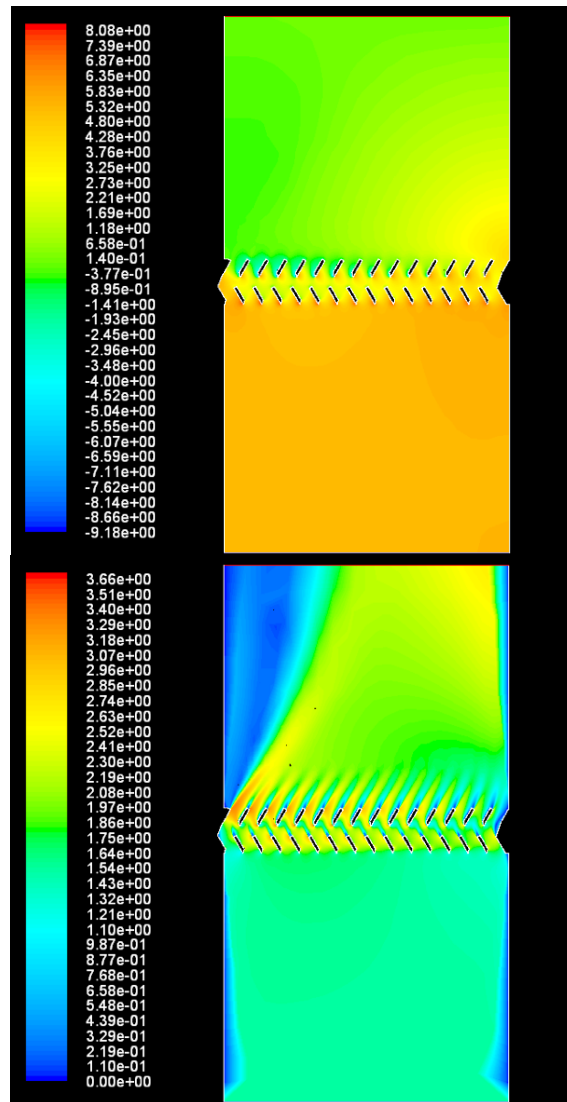


Figura 6: Resultados obtenidos en simulación numérica para el separador de lamas.
 Izquierda: Campo de presiones (Pa). Derecha: Campo de velocidades (m/s)

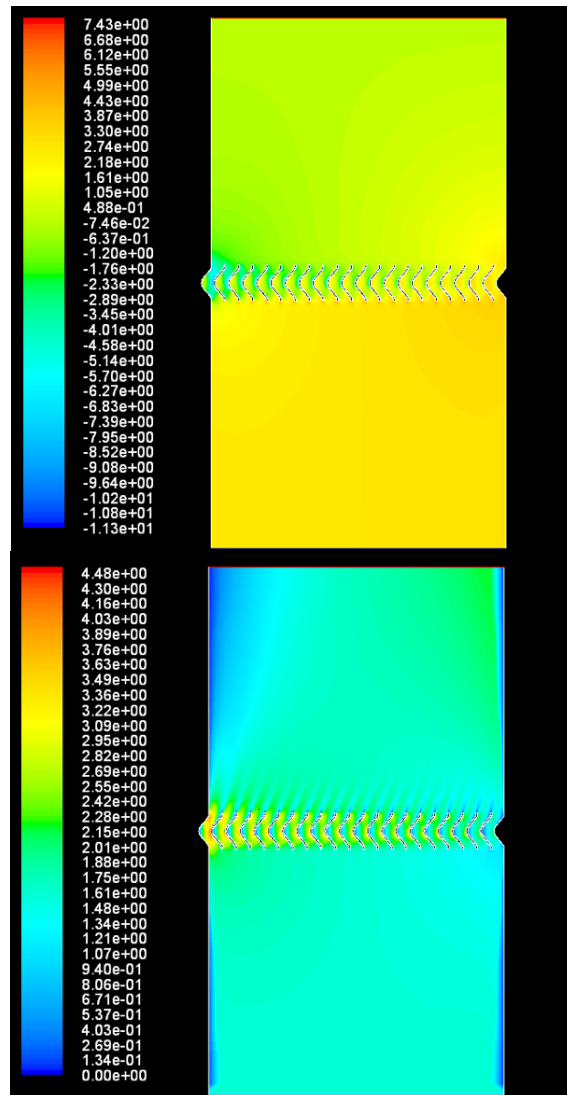


Figura 7: Resultados obtenidos en simulación numérica para el separador sinusoidal. Izquierda: Campo de presiones (Pa). Derecha: Campo de velocidades (m/s)

Se puede observar como en el lado izquierdo la presión es mucho más baja que a la derecha. Esto sucede como consecuencia de que aparece una mayor velocidad justificada por la disposición geométrica de los separadores.

Para la comparación con los datos encontrados en la bibliografía se toman los valores promedio de la presión de una superficie encima y otra debajo de los separadores. La diferencia entre los dos valores de las superficies se considera como la pérdida de presión introducida por los separadores.

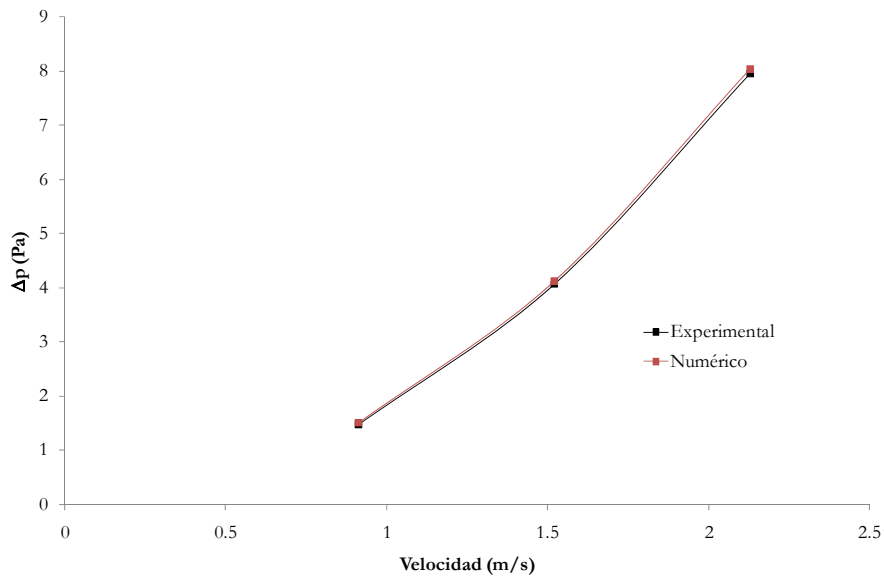


Figura 8: Comparativa entre los resultados de pérdida de presión obtenidos en simulación numérica (línea roja) y resultados experimentales (línea negra) para el separador de gotas tipo wooden lath.

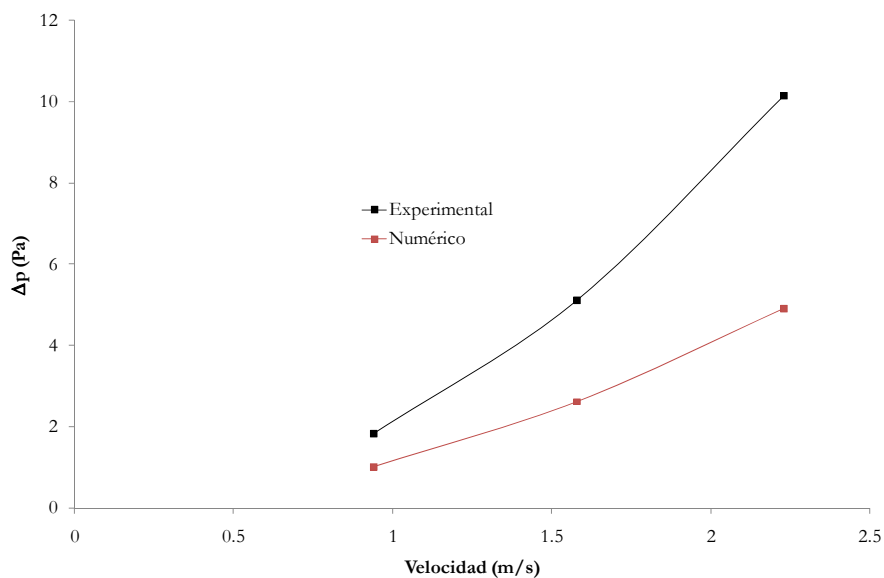


Figura 9: Comparativa entre los resultados de pérdida de presión obtenidos en simulación numérica (línea roja) y resultados experimentales (línea negra) para el se

Se puede ver que para el separador de lamas los resultados de las simulaciones coinciden con los valores del experimento. Hay una diferencia mínima de 1,05% entre los dos valores para una velocidad de 2,13 m/s. Para una velocidad de 0,91 m/s la diferencia es del 2,68% y para una velocidad de 1,52 m s/ la diferencia es de 1,44%. Se puede comprobar como la desviación decae con el aumento de la velocidad. Sin embargo, para el separador sinusoidal los resultados numéricos no coinciden con los valores experimentales. La diferencia

mínima entre dos valores es de 44,71% para una velocidad de 0,94 m/s. Las otras desviaciones son 48,85% (1,58 m/s) y 51,63% (2,23 m/s).

Las razones de la gran diferencia en los resultados de la simulación del separador sinusoidal no están claras. Cabe plantearse diferentes posibilidades, por ejemplo: que el modelo de turbulencia no sea el adecuado, que el caso calculado sea estacionario o que las medidas se hicieron con presencia de agua en fase líquida y eso afectara a la estructura del flujo.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha examinado el flujo de aire dentro de una torre de refrigeración y la pérdida de presión resultante. Para eso se ha revisado la bibliografía para encontrar datos experimentales sobre los separadores que están situados dentro de una torre para evitar que salgan gotas de agua de ella. Se han utilizado dos geometrías diferentes de separadores. Para cada geometría se ha construido un dominio computacional. Con los dos dominios se han realizado varias simulaciones numéricas para determinar la pérdida de presión.

En comparación con los datos de la bibliografía se puede decir que para una geometría (separador de lamas) los valores numéricos coinciden casi perfectamente con ellos. Sin embargo, para la otra geometría (sinusoidal) no es así. La diferencia entre los datos experimentales y numéricos es muy grande. Las razones de la gran diferencia no están claras.

Como este trabajo quiere ser la base para el proceso de optimización de la forma de los separadores surge como necesario seguir estudiando nuevas geometrías de las que se dispongan resultados experimentales de pérdida de presión. Como complemento a este trabajo, será preciso incluir además de la fase continua (aire) la presencia de gotas de agua en fase líquida para comprobar la eficiencia de captura de los distintos separadores.

5. Bibliografía

- [1] Pasquill, F., 1962. 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.
- [2] Van der Hoven, I., 1968. Deposition of Particles and Gases, Meteorology and Atomic Energy 1968 (editor D. Slade), US. Atomic Energy Commission, pp. 202-207.
- [3] Aynsley, E. y Carson, J.E. (1973). Atmospheric effects of water cooling facilities. Cooling Tower Institute. (Technical Paper TP-107B)
- [4] Pedersen, G.C., Lamkin, V.K. y Seich, M., 1987. An economical solution to cooling tower drift. Cooling Tower Institute. (Technical Paper- T-87-08).
- [5] Chilton, H., 1952. Elimination of carryover from packed towers with special reference to natural draught water cooling. Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol. 30, pp 235-250.
- [6] Foster P. M., Williams M. I. y Winter R. J., 1974 Droplet behavior and collection by counterflow cooling-tower eliminators. Atmospheric environment, Vol. 8 (4), pp 349-360.
- [7] Gardner B.R y Lowe H.J. The research and development background to the environmental problems of natural draught cooling towers. Atmospheric environment, Vol. 8-4, pp 313-320.
- [8] Chan J and Golay MW.; 1977, Comparative evaluation of cooling tower drift eliminator performance. Energy Laboratory Report MIT-EI 77-004.
- [9] Becker, B. R. and Burdick L., 1992. Effect of drift eliminator design on cooling tower performance. Transactions of the ASME. Vol. 114, pp632-642.
- [11] Freitas C.J., 1999, The issue of numerical uncertainty, Applied Mathematical Modelling. Volume 26, Issue 2, pp 237- 248