



Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Proyecto Fin de Carrera

Modelización numérica y validación experimental de los flujos de aire y agua en una torre de refrigeración

Titulación: Ingeniería Industrial

Intensificación: Mecánica y Fabricación

Alumno/a: Javier López Núñez

Director/a/s: Antonio Sánchez Káiser

Cartagena, 1 de septiembre de 2014

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 Introducción	8
1.1. Origen del estudio	8
1.2. Estado del arte	17
1.3. Objetivos del proyecto	21
1.4. Planteamiento general del proyecto	23
Capítulo 2 Modelo físico y ecuaciones de conservación	24
2.1. Introducción	24
2.2. Modelo físico.....	25
2.2.1. Sección de ensayo	25
2.2.2. Relleno.....	27
2.2.3. Entrada y salida de aire	29
2.2.4. Circuito de agua	30
2.3. Modelo de turbulencia.....	32
2.3.1. Modelo de turbulencia $k-\epsilon$	32
2.4. Modelo matemático de la película fluida	34
Capítulo 3 Modelo numérico	36
3.1. Introducción	36
3.2. Descripción general del código Fluent.....	37
3.3. Resolución numérica de modelos	39
3.3.1. Generación de la malla	39
3.3.2. Discretización	40
3.3.3. Resolución del sistema de ecuaciones.....	44
3.3.4. Flujos no estacionarios.....	50
3.4. Estudio del mallado.....	51
Capítulo 4 Simulaciones	59
4.1. Introducción	59
4.2. Parámetros de Fluent.....	59
4.3. Planificación de las simulaciones	65

4.3.1. Valores para las condiciones de contorno	65
Capítulo 5 Validación del modelo numérico	68
5.1. Introducción	68
5.2. Velocidades de aire	69
5.3. Espesores de película	72
5.4. Tamaño de gotas.....	77
5.5. Conclusiones sobre la validación	80
Capítulo 6 Presentación de resultados y conclusiones	81
6.1. Introducción	81
6.2. Velocidades límite	82
6.3. Conclusiones generales.....	86
Bibliografía	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de torre de refrigeración de tiro forzado	14
Figura 2. Esquema de torre de refrigeración de tiro natural (efecto chimenea)	16
Figura 3. Esquema de torre de refrigeración de tiro inducido	16
Figura 4. Esquema de la instalación del trabajo de Lan, Friedrich y Armaly	17
Figura 5. Representación de la interfaz para varios criterios de fracción volumétrica	18
Figura 6. Esquema del eliminador de humedad de James y Azzopardi	19
Figura 7. Resultados de velocidad de aire en el eliminador de James y Azzopardi	19
Figura 8. Fotograma de la resolución del caso de estudio de Arrieti y Wang	20
Figura 9. Imagen de la torre de refrigeración experimental.....	22
Figura 10. Modelo de torre de refrigeración completa en 2D.....	26
Figura 11. Detalle de la sección de ensayo del modelo de la torre	26
Figura 12. Detalle del relleno poroso del modelo de la torre.....	28
Figura 13. Velocidades de aire tras pasar por la zona porosa	28
Figura 14. Vectores de velocidad a la entrada y salida del relleno poroso	29
Figura 15. Detalle de la entrada de aire junto a la base de la torre.....	30
Figura 16. Detalle de la entrada de agua en el canal	30
Figura 17. Esquema del circuito de agua empleado en la instalación	31
Figura 18. Esquema de la nomenclatura para un volumen de control en una malla cartesiana bidimensional	40
Figura 19. Esquema tipo de la malla alternada utilizada en este trabajo	45
Figura 20. Mallado de la zona inferior.....	52
Figura 21. Mallado de la zona porosa	52
Figura 22. Mallado de la sección de ensayo	53
Figura 23. Localización de los volúmenes 3D empleados.....	54
Figura 24. Volumen tridimensional inferior estudiado.....	54
Figura 25. Volumen tridimensional superior.....	55
Figura 26. Malla en la zona de la entrada de agua al inicio de las iteraciones	56
Figura 27. Malla en la zona de la entrada de agua con el flujo más desarrollado	56
Figura 28. Malla en el caso tridimensional al inicio de la solución	57
Figura 29. Malla del caso tridimensional al final de la solución	57
Figura 30. Película fluida para un valor de tensión superficial de 0.06 N/m	61
Figura 31. Película fluida para un valor de tensión superficial de 0.072 N/m	62
Figura 32. Película fluida para un valor de tensión superficial de 0.08 N/m	62
Figura 33. Cuadro de diálogo de Fluent para la activación y caracterización del Adaptive Mesh Refinement.....	64
Figura 34. Canal de paso donde se han marcado las diferentes alturas a las que se realizan medidas de velocidad de aire.....	69

Figura 35. Características de la cámara en lo referido a velocidad de captura frente a resolución	73
Figura 36. Imagen de la película fluida sobre la placa	74
Figura 37. Imagen de la película fluida sobre la placa	74
Figura 38. Imagen de la película fluida sobre la placa	74
Figura 39. Espesor de película medido numérico.....	75
Figura 40. Espesor de película medido numérico.....	76
Figura 41. Gotas desprendidas desde el borde inferior de la placa.....	77
Figura 42. Gotas desprendidas del borde superior de la placa	78
Figura 43. Gotas numéricas desprendidas del borde inferior en 2D	78
Figura 44. Gotas en el borde inferior de la placa en 3D	79
Figura 45. Localización de las zonas 1, 2 y 3 del canal	83
Figura 46. Zona 1: Parte inferior de los separadores de gotas	83
Figura 47. Zona 2: Parte media del canal	83
Figura 48. Zona 3: Parte superior de los separadores de gotas.....	84
Figura 49. Secuencia del arrastre de gotas en la zona 1 para el caudal Q4	85
Figura 50. Secuencia del arrastre de gotas en la zona 3 para el caudal Q4	85

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparación entre valores experimentales y numéricos de espesor de película fluida	63
Gráfica 2. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V1	70
Gráfica 3. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V2	70
Gráfica 4. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V3	71
Gráfica 5. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V4	71
Gráfica 6. Comparativa de espesores experimentales y numéricos.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades de aire en la condición de contorno de las simulaciones numéricas para el estudio de los espesores de película.....	65
Tabla 2. Caudales de agua y velocidades correspondientes para los casos en 2D (1 m de ancho) y en 3D (5 cm de ancho)	66
Tabla 3. Distintos casos numéricos realizados para la validación de los espesores de película	67
Tabla 4. Diámetro de gota medio en mm para gotas en el borde inferior de la placa. *Complicado medir una sola gota. **Gran coste computacional	79
Tabla 5. Diámetro de gota medio en mm para gotas en el borde superior de la placa. *Complicado medir una sola gota	79
Tabla 6. Comparación entre velocidad límite numérica y experimental.....	86

Capítulo 1 Introducción

1.1. Origen del estudio

Los equipos de climatización, a partir de un cierto nivel de potencia, suelen utilizar agua en su circuito de condensación para extraer el calor del ciclo térmico. La refrigeración del agua de este circuito se efectúa generalmente mediante torres de refrigeración, en las que se puede dar una emisión al ambiente de gotas de agua de pequeño tamaño. Energéticamente, las torres de refrigeración representan el sistema de enfriamiento de mayor rendimiento en comparación con otras alternativas. Sin embargo, algunas administraciones locales están restringiendo o dificultando la instalación de torres de refrigeración por sus implicaciones medioambientales, como por ejemplo, el riesgo de contaminación por Legionella, la cual puede ser emitida al ambiente a través de las gotas de pequeño tamaño que escapan de las torres de refrigeración.

La legionelosis es una enfermedad bacteriana de origen ambiental que suele presentar dos formas clínicas diferenciadas: la infección pulmonar o “Enfermedad del Legionario”, que se caracteriza por neumonía con fiebre alta, y la forma no neumónica, conocida como “Fiebre de Pontiac”, que se manifiesta como un síndrome febril agudo y de pronóstico leve. La Legionella es una bacteria ambiental capaz de sobrevivir en un amplio intervalo de condiciones físico-químicas, multiplicándose entre 20°C y 45°C,

destruyéndose a 70°C. Su temperatura óptima de crecimiento es 35-37°C. Su nicho ecológico natural son las aguas superficiales, como lagos, ríos, estanques, formando parte de su flora bacteriana. De estos reservorios naturales la bacteria puede colonizar los sistemas de abastecimiento de las ciudades y, a través de la red de distribución de agua, se incorpora a los sistemas de agua sanitaria u otros sistemas que requieren agua para su funcionamiento como es el caso de las torres de refrigeración. En algunos casos, en estas instalaciones, mal diseñadas, sin mantenimiento o con un mantenimiento inadecuado, se favorece el estancamiento del agua y la acumulación de productos nutrientes de la bacteria, como lodos, materia orgánica, materias de corrosión y amebas, formando una biocapa. La presencia de esta biocapa, junto a una temperatura propicia, explica la multiplicación de Legionella hasta concentraciones infectantes para el ser humano. Si existe en la instalación un mecanismo productor de aerosoles (caso típico en las torres de refrigeración), la bacteria puede dispersarse al aire. Las gotas de agua que contienen la bacteria pueden permanecer suspendidas en el aire y penetrar por inhalación en el aparato respiratorio.

Las medidas preventivas a aplicar en instalaciones con riesgo de aparición de Legionella se basan en dos principios fundamentales: primero, la eliminación o reducción de zonas sucias mediante un buen diseño y el mantenimiento de las instalaciones y segundo, evitando las condiciones que favorecen la supervivencia y multiplicación de Legionella, mediante el control de la temperatura del agua y la desinfección continua de la misma.

En el Real Decreto 865/2003, de 4 de Julio, se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Como medidas preventivas se establecen las siguientes:

a) Garantizar la total estanqueidad y la correcta circulación del agua, evitando su estancamiento, así como disponer de suficientes puntos de purga para vaciar completamente la instalación, que estarán dimensionados para permitir la eliminación completa de los sedimentos.

b) Disponer en el agua de aporte sistemas de filtración según la norma UNE-EN 13443-1, equipo de acondicionamiento del agua en el interior de los edificios -filtros mecánicos- parte 1: partículas de dimensiones comprendidas entre 80 mm y 150 mm- requisitos de funcionamiento, seguridad y ensayo.

c) Facilitar la accesibilidad a los equipos para su inspección, limpieza, desinfección y toma de muestras.

d) Utilizar materiales, en contacto con el agua de consumo humano, capaces de resistir una desinfección mediante elevadas concentraciones de cloro o de otros desinfectantes o por elevación de temperatura, evitando aquellos que favorezcan el crecimiento microbiano y la formación de biocapa en el interior de las tuberías.

e) Mantener la temperatura del agua en el circuito de agua fría lo más baja posible procurando, donde las condiciones climatológicas lo permitan, una temperatura inferior a 20°C, para lo cual las tuberías estarán suficientemente alejadas de las de agua caliente o en su defecto aisladas térmicamente.

f) Garantizar que, si la instalación interior de agua fría de consumo humano dispone de depósitos, éstos estén tapados con una cubierta impermeable que ajuste perfectamente y que permita el acceso al interior. Si se encuentran situados al aire libre estarán térmicamente aislados. Si se utiliza cloro como desinfectante, se añadirá, si es necesario, al depósito mediante dosificadores automáticos.

g) Asegurar, en todo el agua almacenada en los acumuladores de agua caliente finales, es decir, inmediatamente anteriores a consumo, una temperatura homogénea y evitar el enfriamiento de zonas interiores que propicien la formación y proliferación de la flora bacteriana.

h) Disponer de un sistema de válvulas de retención, según la norma UNE-EN 1717, que eviten retornos de agua por pérdida de presión o disminución del caudal suministrado y en especial, cuando sea necesario para evitar mezclas de agua de diferentes circuitos, calidades o usos.

i) Mantener la temperatura del agua, en el circuito de agua caliente, por encima de 50°C en el punto más alejado del circuito o en la tubería de retorno al acumulador. La instalación permitirá que el agua alcance una temperatura de 70°C. Cuando se utilice un sistema de aprovechamiento térmico en el que se disponga de un acumulador conteniendo agua que va a ser consumida y en el que no se asegure de forma continua una temperatura próxima a 60°C, se garantizará posteriormente, que se alcance una temperatura de 60°C en otro acumulador final antes de la distribución hacia el consumo.

Las torres de refrigeración y sistemas análogos:

a) Estarán ubicados de manera que se reduzca al mínimo el riesgo de exposición de las personas a los aerosoles. A este efecto se deberán ubicar en lugares alejados tanto de las personas como de las tomas de aire acondicionado o de ventilación.

b) Los materiales constitutivos del circuito hidráulico resistirán la acción agresiva del agua y del cloro u otros desinfectantes, con el fin de evitar los fenómenos de corrosión. Se evitarán los materiales que favorecen el desarrollo de bacterias y hongos como el cuero, madera, fibrocemento, hormigón o los derivados de celulosa.

c) El diseño del sistema deberá hacerse de manera que todos los equipos y aparatos sean fácilmente accesibles para su inspección, limpieza, desinfección y toma de muestras.

d) Existirán suficientes puntos de purga para vaciar completamente la instalación y estarán dimensionados para permitir la eliminación de los sedimentos acumulados.

e) Deberán disponer de sistemas separadores de gotas de alta eficiencia cuyo caudal de agua arrastrado será menor del 0,05 por ciento del caudal de agua circulante.

f) Deberán disponer de sistemas de dosificación en continuo del biocida.

Las torres de refrigeración

Las torres de refrigeración son sistemas mecánicos destinados a enfriar masas de agua en procesos que requieren una disipación de calor.

El principio de funcionamiento de estos equipos se basa en la evaporación: el equipo produce una nube de gotas de agua bien por pulverización, bien por caída libre que se ponen en contacto con una corriente de aire. La evaporación superficial de una pequeña parte del agua inducida por el contacto con el aire, da lugar al enfriamiento del resto del agua que cae en la balsa a una temperatura inferior a la de pulverización.

El uso más habitual de estos equipos está asociado a los sistemas de refrigeración, tanto en aire acondicionado como en producción de frío (hostelería, alimentación, laboratorios, etc.), sin embargo, en el ámbito industrial estos equipos se usan para el

enfriamiento de cualquier parte de un proceso que genere calor y deba ser disipado (por ejemplo, procesos de molienda que generan calor por fricción, enfriamiento de reacciones exotérmicas, disipación de calor residual en centrales de producción de energía eléctrica, etc.).

Una torre de refrigeración está formada generalmente por los siguientes componentes:

- Balsa.
- Relleno.
- Separador de gotas.
- Ventilador.
- Sistema de pulverización.

Dentro de la torre, en la parte más alta de ésta, generalmente se sitúa un *sistema de pulverización* del agua. Este sistema hace que el agua caiga por gravedad en forma de pequeñas gotas. También pueden formarse las gotas por la propia caída libre, sin necesidad de incluir un sistema de pulverizado. En su movimiento descendente, las gotas de agua intercambian energía con el aire que se mueve en sentido contrario, evaporándose una pequeña cantidad superficial de las mismas. De esta forma, se reduce la temperatura del agua.

El agua se recoge en la parte inferior de la torre en una *balsa*, a una temperatura inferior a la de pulverización.

En la parte media de la torre suele insertarse un material denominado "*relleno*", cuyo fin es el de servir de soporte al agua pulverizada para incrementar el tiempo y la superficie de contacto con el aire ascendente. Proporciona una superficie de intercambio lo más grande posible entre el agua que cae y el aire que asciende. Además, retarda el tiempo de caída del agua, asegurando una mayor duración del proceso de intercambio. Las características de este relleno deben ser:

- Se debe realizar con un material de bajo coste debido a la cantidad que se emplea y debe ser de fácil colocación.
- La superficie del mismo debe ser la mayor posible en relación con su volumen.

- Su diseño debe permitir fácilmente el paso del aire entre él, de forma que ofrezca la menor resistencia y pérdida de carga. Así mismo, debe distribuir uniformemente el aire y el agua.
- Debe ser resistente al deterioro ambiental, químico y térmico y debe ser fácil de limpiar.

Existen tres formas distintas de realizar el reparto de agua a través del relleno: por salpicadura o goteo, de película o laminares y de tipo mixto. Cada uno tiene sus inconvenientes y sus ventajas por lo que se tiende a utilizar cada tipo de relleno dependiendo de las características de uso y diseño de la torre. Los más habituales son los de película o laminados. Este relleno distribuye el agua en una fina película que fluye por su superficie y por consiguiente pone una gran superficie de agua en contacto con la corriente de aire. La película de agua debe de ser muy delgada y cubrir la mayor superficie posible del relleno, y debe procurarse que el agua descienda adherida a la superficie del relleno evitando que la corriente del aire separe el agua del relleno. Para conseguir estos objetivos se montan grupos de láminas onduladas de PVC o PP colocadas de forma paralela y a cierta distancia formando cubos para favorecer su apilado.

El *separador de gotas* tiene la finalidad de detener las gotas de agua que arrastra la corriente de aire al salir de la torre. Este objetivo se consigue mediante un cambio brusco de la dirección (60 grados suele ser el más efectivo) del aire al salir. Esta variación provoca que el agua arrastrada se deposite sobre la superficie del separador de gotas, cayendo posteriormente al relleno. La existencia del separador tiene tres ventajas:

- La reducción de pérdidas de agua.
- Evitar daños en el entorno de la torre y, sobre todo, si el agua de torre es agua salada o contiene algún contaminante.
- Limitar la formación de neblinas.

El flujo ascendente de aire se puede generar por flotación (tiro natural) o de forma mecánica mediante el empleo de un *ventilador* (ventilación mecánica).

Los ventiladores instalados en las torres de refrigeración trabajan en condiciones duras, debido a que están continuamente en funcionamiento, en un clima de elevada humedad y temperatura. Son los encargados de crear el flujo de aire. El equipo completo se compone de motor, transmisión y aspas.

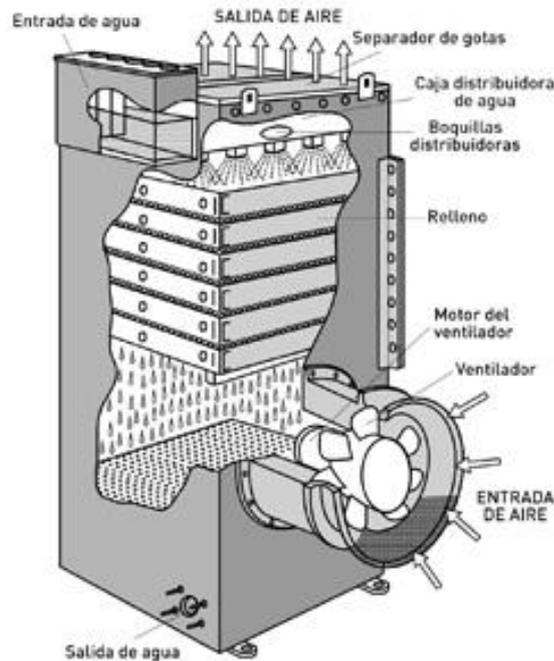


Figura 1. Esquema de torre de refrigeración de tiro forzado

Los motores de las torres de refrigeración deben de estar convenientemente protegidos de la humedad (protección IP55 o IP65 contra polvo y chorros de agua), y de la atmósfera contaminada por los aditivos del agua. Suelen llevar un aislamiento de tipo B (aislado para temperaturas de hasta 120 grados) o F (aislado para temperaturas de hasta 140 grados), y siempre que es posible el motor se coloca resguardado de las corrientes de aire caliente y saturado, mediante su correspondiente sistema de transmisión. Existen diferentes sistemas de transmisión dependiendo de las necesidades de construcción (cardan, acoplamiento flexibles y reductores).

Los álabes suelen ser de plástico o aluminio, por su ligereza y resistencia a la corrosión. El número de aspas influye directamente sobre la presión que se ejerce en ellas: a mayor número de aspas menor presión se ejerce en ellas. Igualmente, un número mayor de aspas supone facilidades para un óptimo equilibrado, para evitar posibles problemas de vibraciones (se recomienda cada tres o cuatro años un

equilibrado del ventilador debido a la posible erosión de las aspas, corrosión o a la deposición de suciedad).

Las torres de refrigeración se pueden clasificar según el sistema de impulsión del aire en:

- Equipos de tiro natural basados en el efecto chimenea.
- Equipos con ventilación mecánica:
 - Equipos de tiro forzado.
 - Equipos de tiro inducido.

En los equipos de *tiro natural* como el de la figura 2, el agua pulverizada genera un punto caliente en la parte baja de la torre e induce el movimiento ascendente del aire habitualmente en contracorriente. Estos equipos se emplean casi exclusivamente en grandes industrias y en centrales de producción de energía eléctrica (térmicas, nucleares, etc.), en general, sistemas que necesitan mover y refrigerar grandes cantidades de agua. Estas instalaciones habitualmente no disponen de separadores de gotas, debido a la elevada pérdida de carga que provocan estos elementos que disminuyen excesivamente el flujo de aire. No obstante, dada su elevada altura y geometría, la emisión de aerosoles es muy limitada.

Los equipos con ventilación mecánica denominados de *tiro forzado*, disponen de ventiladores (normalmente de tipo centrífugo salvo en las instalaciones industriales que ocasionalmente son axiales) ubicados en la parte baja de la torre que impulsan el aire al interior de la misma sobrepresurizando e impulsando por tanto su salida por la parte superior a través del relleno. Puede verse un esquema de una torre de refrigeración con ventilación mecánica de tiro forzado en la Figura 1. El agua de retorno procedente del punto de uso es pulverizada por la parte superior de la torre pasando a través del relleno, cuya misión es incrementar el tiempo de retención y, por tanto, el contacto con el aire ascendente, cuyo único punto de entrada es a través del ventilador. En el relleno se produce el enfriamiento, quedando el agua refrigerada en la balsa de la torre que se impulsa por medio de equipos de bombeo para reiniciar el ciclo de intercambio de calor en el punto de uso.

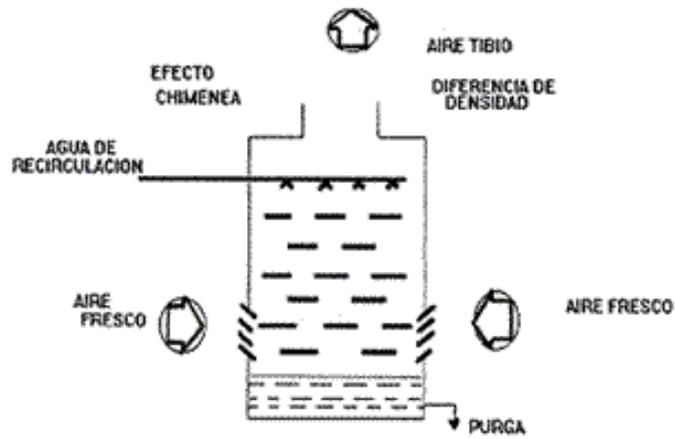


Figura 2. Esquema de torre de refrigeración de tiro natural (efecto chimenea)

Los equipos de tiro inducido, a diferencia de los anteriores, funcionan en depresión, es decir, el ventilador, localizado en la parte superior de la torre, extrae aire del interior de la unidad que se renueva a través de aperturas localizadas en la parte baja de la misma, según se puede apreciar en la Figura 3.

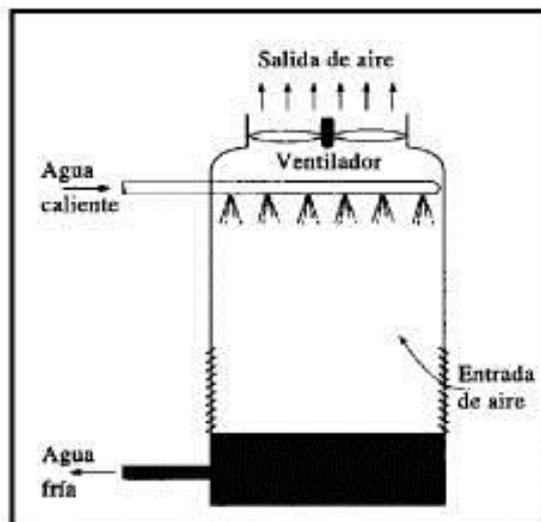


Figura 3. Esquema de torre de refrigeración de tiro inducido

1.2. Estado del arte

La modelización de la inyección de agua en una corriente de aire se realiza mediante el modelo VOF multifásico; este modelo nos va a permitir representar tanto la película fluida que se forma sobre el separador de gotas, como la separación de dicha película de la superficie del separador.

Los autores H. Lan, M. Friedrich, B. F. Armaly en su artículo *Simulation and measurement of 3D shear-driven thin liquid film flow in a duct*, tratan el comportamiento de un flujo tridimensional a lo largo de un conducto de sección rectangular como el que se muestra en la figura 4. El flujo de líquido se inyecta en el conducto a través de unos orificios situados en su lado inferior y es arrastrado por una corriente de aire formándose una película fina de líquido en la pared inferior del conducto. Esta simulación nos ofrece información de utilidad a la hora de realizar nuestra simulación debido a la similitud entre ambas situaciones de entrada del líquido y arrastre por corriente de aire.

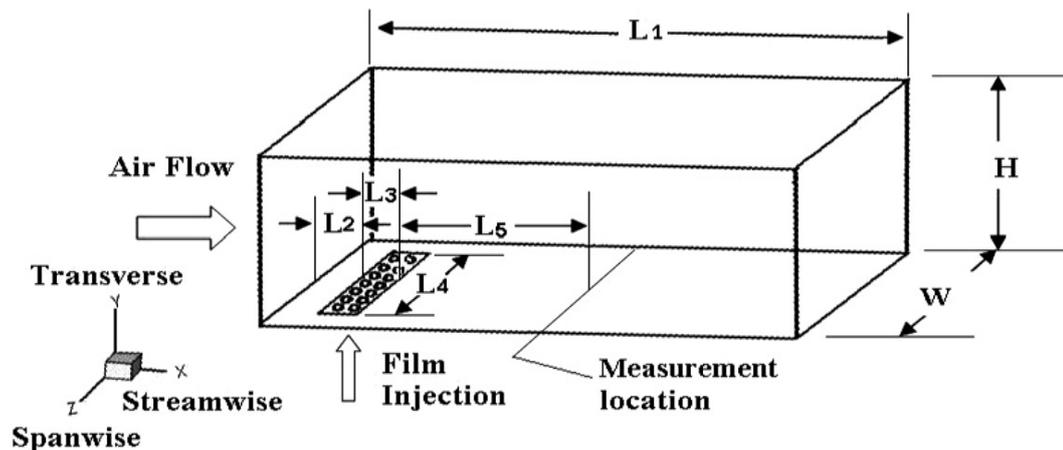


Figura 4. Esquema de la instalación del trabajo de Lan, Friedrich y Armaly

Se utiliza el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, y el modelo multifásico VOF para resolver el espesor de la película fluida y determinar la interfaz entre aire y agua. Se estima el espesor de la película fluida en 1 mm tras varias pruebas, por lo tanto es necesario un tamaño de malla mucho menor en la zona de la película fluida para tener la mayor cantidad de información en la zona de la interfaz. Otro aspecto importante que se trata en este artículo es la forma de definir la posición de la interfaz; el modelo VOF nos da,

para cada elemento del mallado, el volumen de cada fase con valores entre 0 y 1, siendo la suma de ambos siempre la unidad.

En este caso al igual que el nuestro, las propiedades de ambos fluidos son significativamente distintas (sobre 1000 veces en densidad y 100 en viscosidad). De esta forma se observa, atendiendo al caudal de líquido inyectado, que con un criterio de volumen de líquido de 0.5 se consigue capturar un 90% del caudal inyectado y que un cambio a 0.4 solo hace aumentar dicho volumen capturado en un 2%. Se ve así que el criterio para identificar la interfaz consiste en intentar capturar el mayor caudal de líquido posible y a su vez tomar el mayor valor posible de volumen parcial de líquido.

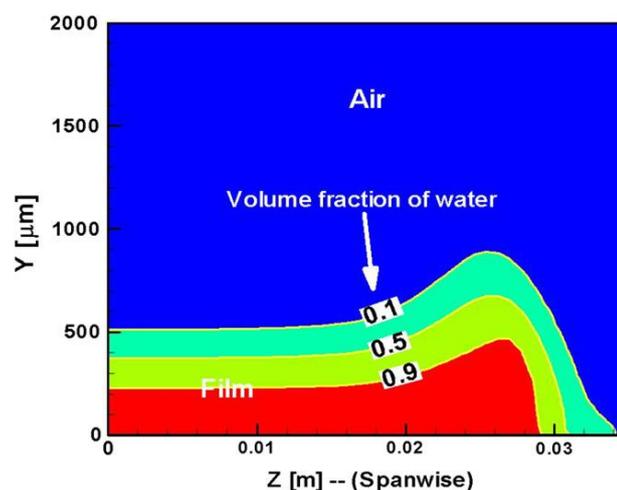


Figura 5. Representación de la interfaz para varios criterios de fracción volumétrica

Otro tipo de casos que guardan semejanza con el nuestro es el de los eliminadores de humedad (*mist eliminators*). Un buen ejemplo de cómo proceder en estos casos es el descrito por los autores P.W. James y B.J. Azzopardi en su artículo *A model for liquid film Flow and separation in a wave plate mist eliminators*.

Los eliminadores de humedad (*mist eliminators*) consisten en una corriente de aire que arrastra gotas de agua; se hace pasar a esta corriente por un conducto de forma irregular (como las que se presentan en la siguiente figura) de manera que las gotas de agua impactan contra la superficie y se depositan sobre ella, tras esto la corriente de aire arrastra al agua sobre la superficie del conducto hasta llegar a una esquina donde bien se separa de la pared atomizándose para reincorporarse al flujo de aire, o bien es recogida mediante canales de drenaje para sacarla del flujo definitivamente.

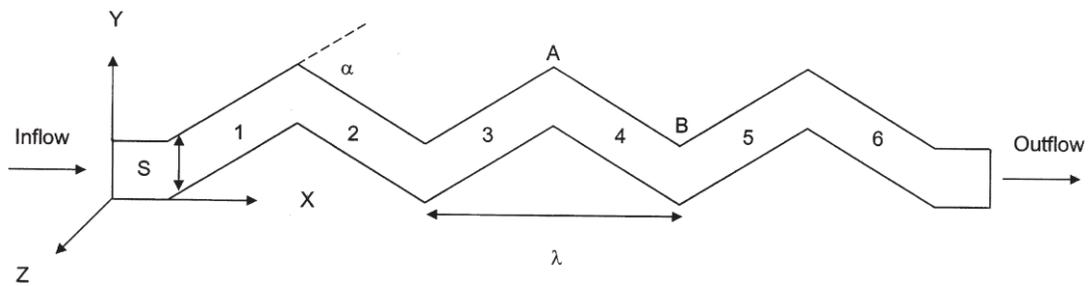


Figura 6. Esquema del eliminador de humedad de James y Azzopardi

Existen importantes semejanzas con nuestro caso en cuanto a la forma de separar el líquido del aire con el impacto contra paredes del flujo de aire y agua y su posterior atomización al separarse de la pared. Este artículo trata por un lado el transporte y la deposición de las gotas de agua; y por otro lado, y más interesante para nuestro caso, la modelización de la película fluida y su posterior separación de la pared.

A la hora de modelar la película fluida se considera aquí una situación estacionaria, flujo incompresible e isoterma. Al ser una pared inclinada tendrá componentes vertical y horizontal de la velocidad, supuestas desacopladas en el problema descrito: la componente vertical únicamente es función de la gravedad y la horizontal de la velocidad del aire (este aspecto difiere de nuestro estudio ya que se trata de un conducto horizontal en lugar de vertical).

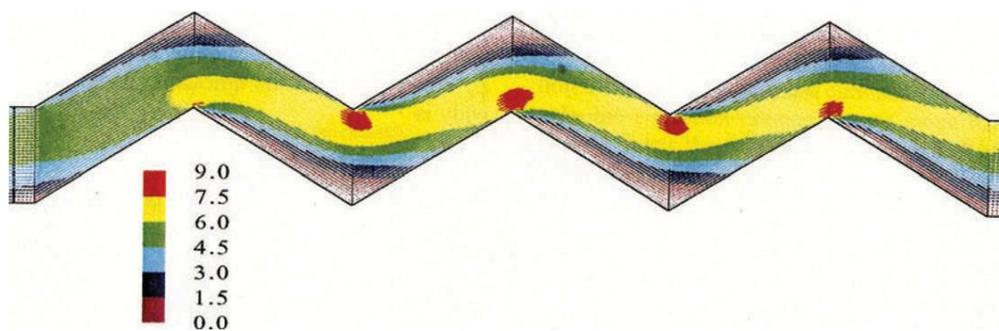


Figura 7. Resultados de velocidad de aire en el eliminador de James y Azzopardi

Por otro lado se estudia la separación de la película: se menciona el modelo desarrollado por Owen y Riley (1985) basado en que hay un balance entre fuerza centrífuga y tensión superficial; la película es conducida por una fuerza cortante

superficial y la gravedad puede favorecer o no la separación. Posteriormente Azzopardi y Sanaullah (2002) aseguraron que los efectos de la gravedad se pueden desacoplar de los del cortante superficial. La siguiente ecuación nos da el espesor crítico que hará que se produzca la separación:

$$\frac{\rho_L \tau_i^2 h_c^3}{3\mu_L^2 R} = \frac{\sigma}{R+h_c} \quad (1.1)$$

Donde:

- σ es la tensión superficial de la interfaz aire-agua.
- ρ_L es la densidad del líquido.
- R es el radio de curvatura del codo donde se separa la película.
- h_c es el espesor crítico.
- μ la viscosidad del líquido.
- τ la fuerza cortante que ejerce el aire a la película fluida.

Por otra parte, la formación de la película fluida a partir de la deposición de gotas en la superficie del separador ha sido estudiada por M. Arienti, L. Wang y otros en el artículo *Modelling wall film formation and breakup using an integrated interface-tracking/discrete-phase approach*, donde se describe la entrada de líquido en un conducto por el que circula una corriente de aire, como se puede ver en la figura 8; el agua entra por la parte superior formando una columna que se rompe en pequeñas gotas que se depositan en la parte inferior, lo que genera una película fluida que es arrastrada por el aire.

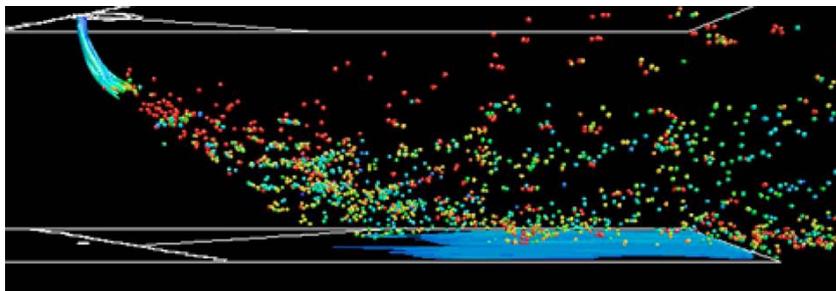


Figura 8. Fotograma de la resolución del caso de estudio de Arrieti y Wang

El mallado utilizado en la región de la película fluida es del orden de las $100\mu\text{m}$, resultando una malla con $0.74 \cdot 10^6$ elementos. En nuestro caso de estudio también tendremos la problemática necesidad de hacer un mallado muy fino y el consecuente aumento del número de elementos.

James, Wang, Azzopardi (2003) estudian el rol de los canales de drenaje en eliminadores de humedad, haciendo especial hincapié en el desplazamiento de la película fluida sobre la pared del eliminador y en la separación de dicha película y formación de gotas.

Galletti, Brunazzi, Tognotti (2008) también estudian eliminadores de humedad con canales de drenaje: movimiento de gotas, deposición y formación de película fluida. Describiendo las opciones elegidas para su resolución numérica.

Echando un vistazo al tratamiento que estos autores llevan a cabo para resolver sus casos y tras realizar diversas pruebas con el software ANSYS Fluent 14, se siguen algunas directrices a la hora de resolver el problema multifásico: en primer lugar se va a utilizar *pressure based solver* activando la opción *implicit body force* para tener en cuenta los efectos de la tensión superficial; se emplea el modelo VOF en su esquema explícito para conseguir una mayor precisión a la hora de representar la interfaz aire-agua. Pero este tema se desarrollará en profundidad más adelante.

Como antecedente a este proyecto se encuentra el trabajo realizado por B. Zamora y A.S. Kaiser (2011) dentro del Grupo de Investigación de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena. En este trabajo se simula numéricamente el flujo turbulento de aire con gotas dispersas a través de los separadores de gotas de una torre de refrigeración. Se realizó una comparación entre distintos tipos de separadores de gotas para determinar su eficiencia en la captura de las mencionadas gotas de agua. No se tuvo en cuenta la formación de la película fluida al salir el agua directamente a través del separador, si no que se simula la corriente de aire con las gotas ya dispersas. Sin embargo se parte, en este proyecto, de la experiencia del grupo de investigación de mecánica de fluidos para conseguir una simulación numérica con validación experimental, del flujo de aire a través de los separadores de la torre y su interacción con la película de agua.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es el desarrollo de un modelo numérico para el estudio del efecto que los separadores de gotas, instalados en la torre de refrigeración, tienen sobre el flujo de agua que se desea enfriar. Se quiere conseguir que los separadores impidan que las gotas de agua salgan fuera de la torre arrastradas por la

corriente de aire, y que, a su vez, la velocidad de aire sea lo mayor posible de manera que se maximice la transferencia de calor entre agua y aire.

También se pretende determinar si los separadores de gotas pueden comportarse como generadores de gotas bajo ciertas condiciones de funcionamiento; es por ello que se establece una configuración de entrada de agua que no es la propia de un sistema comercial. La configuración adoptada nos permite estudiar el impacto de gotas en las paredes de los separadores, la formación de películas de agua sobre dichas placas, o la rotura de estas películas y la formación de nuevas gotas.

Los resultados del modelo numérico tendrán su validación experimental gracias a los datos extraídos de la instalación experimental (figura 9) desarrollada por el área de mecánica de fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena.



Figura 9. Imagen de la torre de refrigeración experimental

Estos resultados experimentales se comparan con los datos obtenidos de las simulaciones en el código CFD Ansys-Fluent con un modelo VOF para el cálculo de la interfaz aire-agua y un modelo de turbulencia k- ϵ para la corriente de aire ascendente.

Se pretende que, tras la obtención de unos buenos resultados validados experimentalmente, se puedan estudiar otras configuraciones de separadores de gotas, variando el número de los mismos, la separación, etc. De manera que se pueda encontrar una configuración donde se maximice la velocidad de aire, minimizando el arrastre de gotas al exterior.

1.4. Planteamiento general del proyecto

Tras un primer capítulo introductorio sobre las torres de refrigeración, sus componentes, y la problemática de estos; se pasa al capítulo 2, donde se hará la descripción del modelo físico de la torre de refrigeración; aquí se describe la instalación experimental desarrollada en el departamento y su análoga numérica, así como las ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos a estudiar en estas condiciones.

El siguiente capítulo, el 3, habla sobre el modelo numérico, el software empleado para la resolución de los casos y se realiza un estudio sobre el mallado que se va a utilizar en el proyecto.

El capítulo 4, por su parte, trata directamente sobre las simulaciones que se llevaron a cabo para el estudio del problema, se enumeran los valores de las condiciones de contorno de cada caso y se explica cómo se procede con cada simulación numérica.

Para llegar al 5º capítulo, en el que nos centramos en la validación del modelo numérico y los resultados, tanto experimentales como numéricos, empleados para ello.

Finalmente se pasa a los resultados que el modelo nos arroja acerca de las velocidades de aire límite, una de las más importantes variables del problema a nivel comercial, ya que determina los límites de funcionamiento de la torre de refrigeración para un caudal de agua dado y una determinada configuración de separadores de gotas.

Capítulo 2 Modelo físico y ecuaciones de conservación

2.1. Introducción

En este capítulo se va a describir la configuración física utilizada, así como los modelos matemáticos aplicables para la resolución del problema.

El modelo físico se realiza basándonos en la instalación experimental, que se encuentra en el departamento de ingeniería térmica y de fluidos de la UPCT y consta de una torre de refrigeración similar a la que se encuentra en el campus de la universidad Miguel Hernández de Elche, sobre la que se ha centrado el estudio de los grupos de investigación de ambas universidades. La réplica de dicha torre ha sido construida por la compañera que se ha encargado de realizar las pruebas experimentales y obtener datos reales de velocidades, separación de gotas, etc.

Por otro lado, el modelo matemático será el que describa el flujo turbulento de aire por el interior de la torre, factor muy relevante para los resultados de las simulaciones; también se debe describir el flujo de agua que circula por el canal entre los separadores y la interfaz agua-aire.

2.2. Modelo físico

El modelo físico que se ha empleado en este trabajo se basa en la torre de refrigeración de la instalación experimental construida en el departamento de ingeniería térmica y de fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena. Se trata, en principio, de un prisma rectangular de base cuadrada de 380x380 mm y una altura de 880 mm. Sin embargo, el modelo de dicha torre se ha realizado en 2 dimensiones debido al gran coste computacional necesario para la resolución de los casos en 3D en un dominio tan amplio; por lo tanto el dominio computacional del problema que nos ocupa consiste en un rectángulo de altura 880 mm y base 380 mm.

En el interior de este rectángulo se sitúan los elementos que van a afectar al flujo de estudio: el relleno en la parte inferior de la torre; la sección de ensayo, siguiendo el modelo de la instalación experimental; las entradas de aire y agua y la salida de aire. A continuación se van a describir estos elementos y cómo se han definido en el código Fluent.

2.2.1. Sección de ensayo

La sección de ensayo se define como la zona de la torre donde se encuentran los separadores de gotas. Esta zona se halla a partir de la mitad de la altura de la torre (440 mm) hasta el límite superior de los separadores de gotas. Está compuesta por: los separadores de gotas, las placas horizontales y la entrada de agua.

Los separadores de gotas se definen lo más parecidos posible a los separadores de gotas empleados en la instalación experimental: compuestos de placas de 2 mm de espesor, con dos tramos verticales de 15 mm en los extremos, y dos tramos en ángulo, uno de 100 y otro de 30 mm de longitud.

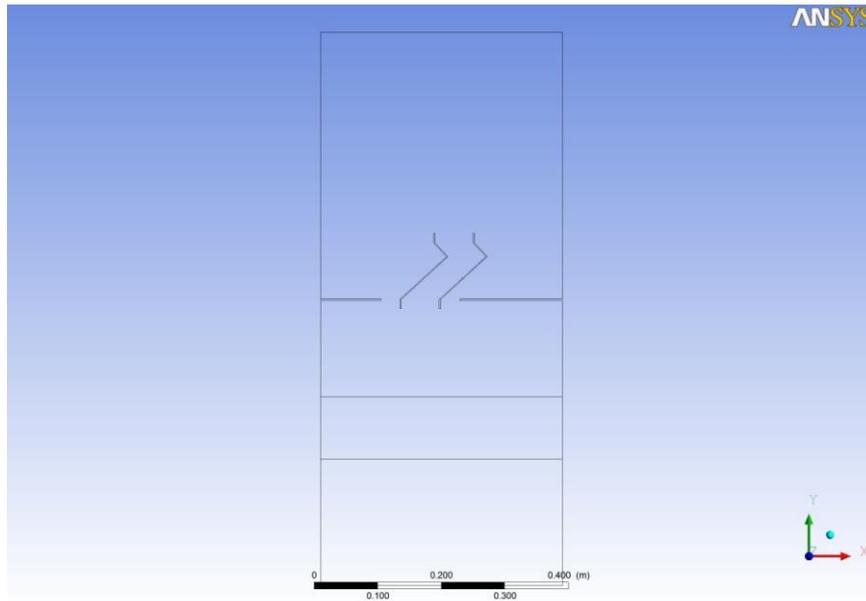


Figura 10. Modelo de torre de refrigeración completa en 2D

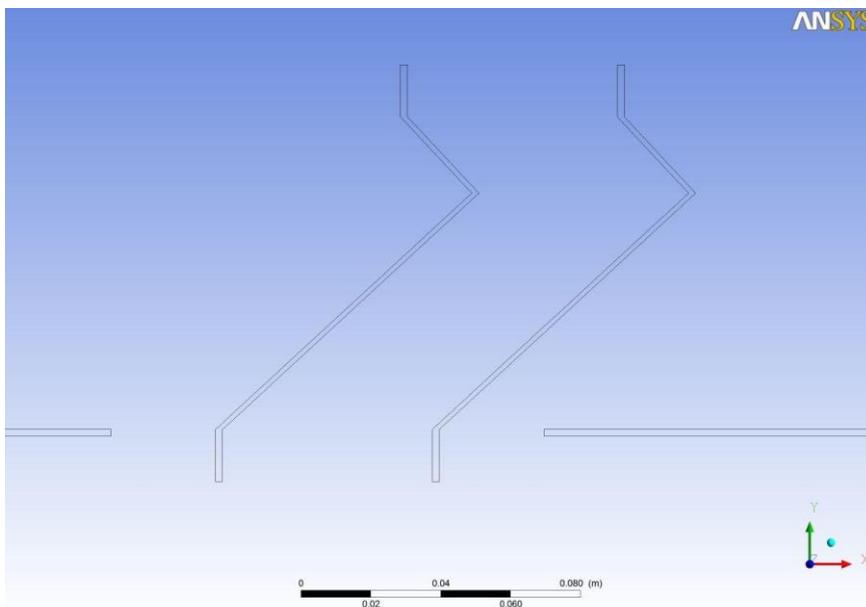


Figura 11. Detalle de la sección de ensayo del modelo de la torre

En un principio, a ambos lados del canal, la torre estaba abierta; sin embargo, no se conseguía el flujo de aire apropiado en cuanto a las características de uniformidad y velocidad. Por lo tanto se optó por la colocación, en primer lugar, de dos placas a ambos lados para tapar esos huecos por completo, esta solución tampoco era la óptima para nuestros propósitos. Por último se encontró una buena solución mediante la colocación

de dos placas pero dejando un hueco abierto de 30 mm junto a la placa del separador de gotas, como se ve en la figura previa.

De esta manera se consigue el flujo de aire deseado para la realización de los ensayos experimentales, y esa misma configuración se ha adoptado para las simulaciones numéricas.

Por su parte, la entrada de agua se ha situado de igual manera que en la instalación experimental, esto es, una abertura de 2 mm de alto situada en el centro de la placa más larga. Para poder utilizar el modelo multifásico VOF que se describe más adelante, se establece una condición de contorno tipo *velocity inlet*, de manera que los caudales de entrada (en litros por minuto) se deben convertir a velocidades (en metros por segundo) a partir del área de entrada de agua según la expresión:

$$v(m/s) = \frac{Q(l/min)}{A(m^2)} \cdot \frac{1}{1000(l/m^3) \cdot 60(s/min)} \quad (2.1)$$

La entrada de agua se considera uniforme, dado que es lo que se desea conseguir en los ensayos experimentales. Y se realizarán las simulaciones numéricas con los mismos caudales de entrada que se han utilizado en los ensayos experimentales, de tal forma que se puedan validar los resultados numéricos. Cabe destacar que, al tratarse de simulaciones en 2D, el caudal se define en Fluent por metro lineal, mientras que la abertura de la entrada de agua tiene 275 mm, siendo necesaria una expresión para determinar la velocidad necesaria en la condición de contorno dependiendo del caudal y del área de salida en cada caso.

2.2.2. Relleno

Para simular el relleno que se coloca en la torre experimental se ha definido una región de la torre de refrigeración, a 200 mm del fondo de la misma, y de 100 mm de altura. Esta región sirve, en el caso que nos ocupa, para homogeneizar el flujo de aire y que llegue a la sección de ensayo en las mejores condiciones. Otra función de este relleno poroso es la de incrementar el tiempo de residencia del agua en la torre, aumentando así el intercambio de calor con el aire.

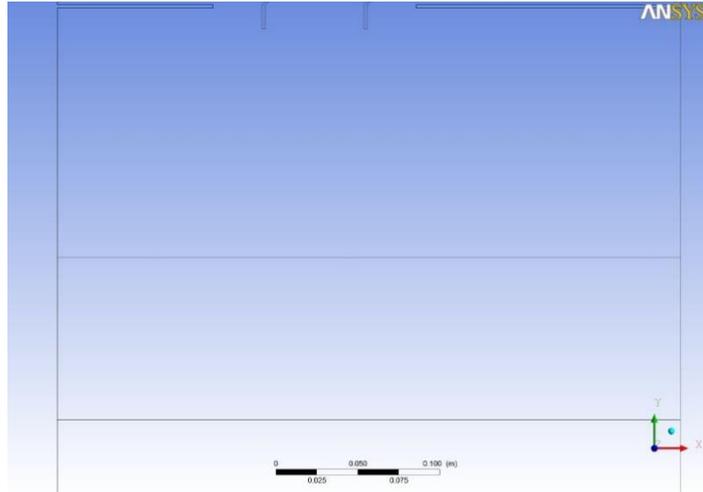


Figura 12. Detalle del relleno poroso del modelo de la torre

En el código Fluent se ha caracterizado esta región como porosa, con un coeficiente de resistencia de $1.6e8$ en todas las direcciones y una porosidad 0.8. Se observa el efecto de la zona porosa en la figura:

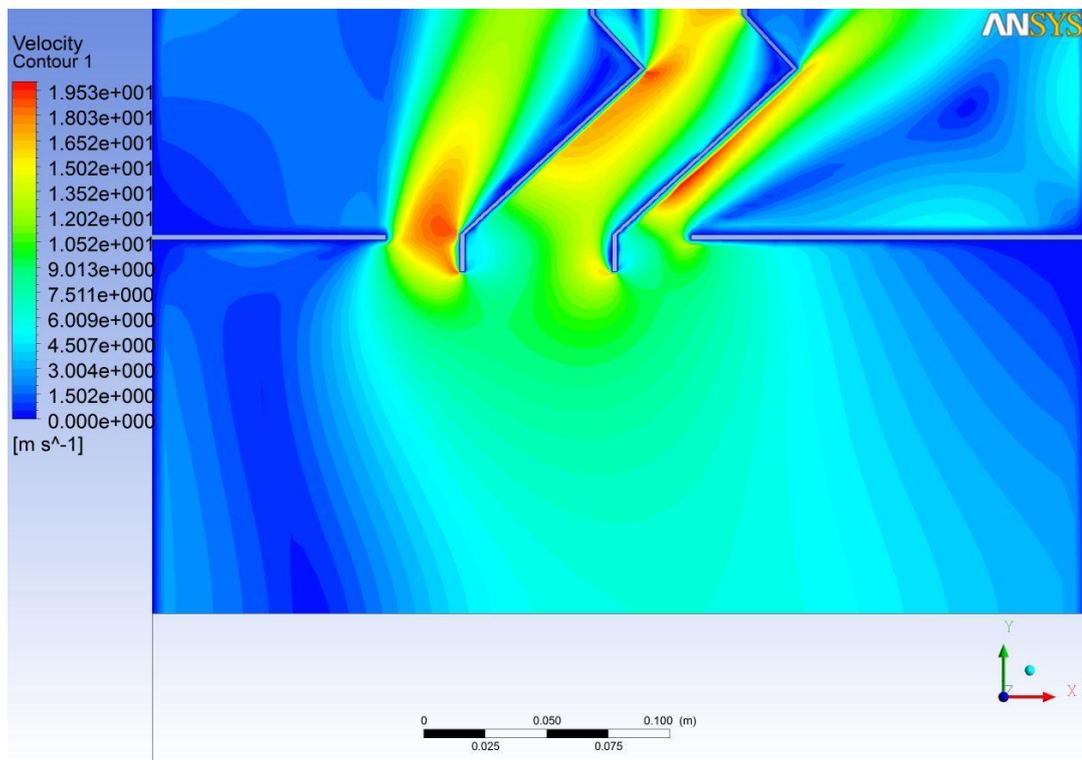


Figura 13. Velocidades de aire tras pasar por la zona porosa

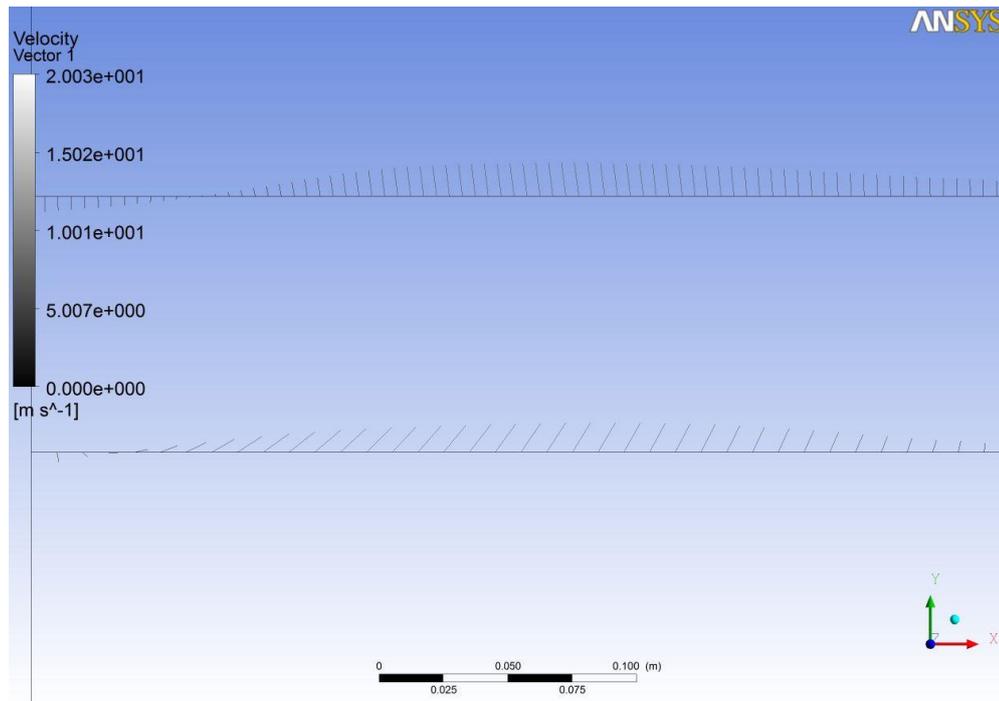


Figura 14. Vectores de velocidad a la entrada y salida del relleno poroso

2.2.3. Entrada y salida de aire

La entrada de aire se sitúa en la parte más inferior de la torre, y consiste en una abertura rectangular de 160 mm de alto por 290 mm de ancho en uno de los laterales de la torre. En la realidad, la velocidad de aire a la entrada sigue un perfil casi triangular, debido a que el ventilador proporciona mayores velocidades de aire en los extremos de las aspas que en el centro; sin embargo se ha optado por un perfil uniforme de velocidades para simplificar el problema, considerando que este perfil de entrada no va a afectar a la solución una vez puesto el relleno poroso.

Por su parte, la salida abarca toda la base superior del prisma que forma la torre de refrigeración. Se define en el código como *pressure outlet*, con un valor 0 de presión relativa (salida a la atmósfera). Se pensó en un principio en una condición de contorno tipo *outflow* pero, este tipo de condición de contorno no es la óptima para las simulaciones con el modelo multifásico VOF.

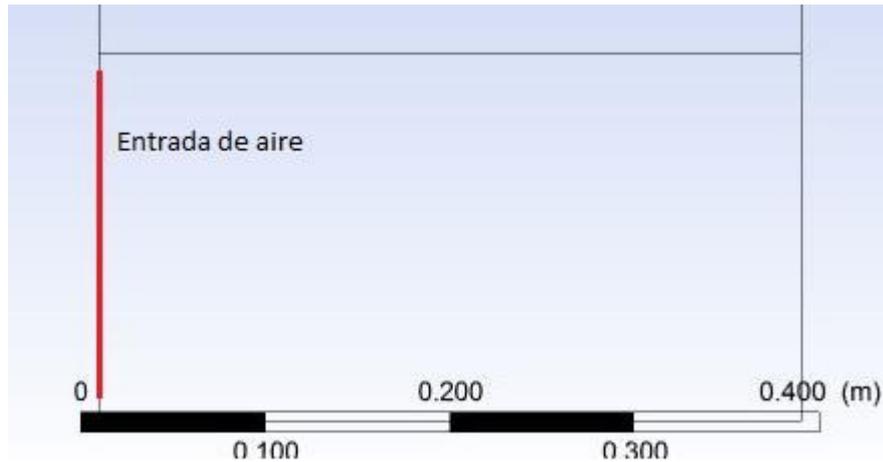


Figura 15. Detalle de la entrada de aire junto a la base de la torre

2.2.4. Circuito de agua

La entrada de agua está situada en uno de los separadores de gotas, como puede verse en la figura. Se trata de una ranura de 2 mm de alto por 275 mm de ancho, localizada en el centro del mayor segmento de la placa del separador. Por su parte, el agua que pasa por la torre puede, o bien salir por la abertura superior y escapar al ambiente; o bien caer al fondo de la torre, donde es recogida en el depósito de la instalación.



Figura 16. Detalle de la entrada de agua en el canal

A continuación se muestra el circuito de agua desarrollado en el departamento: el ya mencionado depósito almacena el agua que cae de la torre. Esta agua es impulsada por una bomba centrífuga de vuelta a la entrada de agua a la torre a través de un conducto que se divide en dos para suministrar el agua a la torre de una manera más uniforme. En ese conducto que sale de la bomba es donde se sitúa el caudalímetro electromagnético, cuya señal es recogida y mostrada en el ordenador.

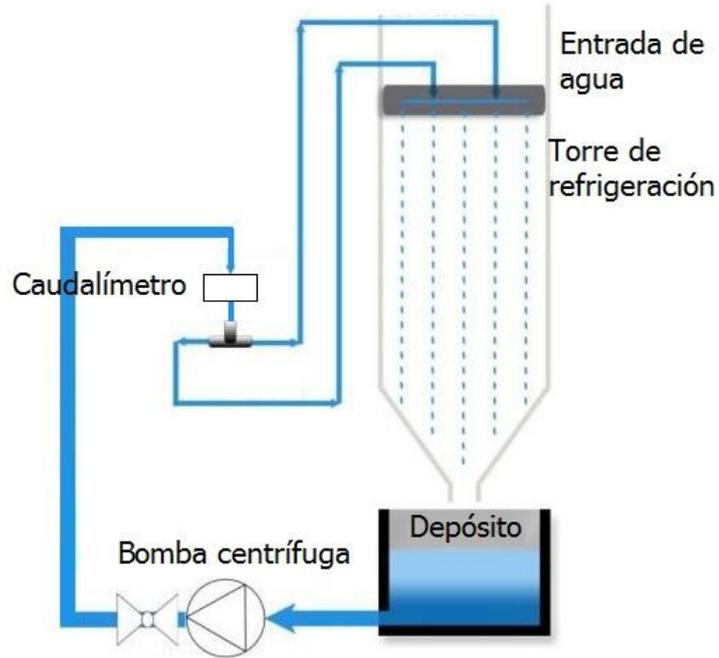


Figura 17. Esquema del circuito de agua empleado en la instalación

Computacionalmente, la entrada de agua se representa mediante una condición de contorno tipo *velocity inlet*, a priori sería mejor utilizar la del tipo *massflow inlet*, pero no es apropiada para el modelo VOF utilizado en las simulaciones. Como el dato que tenemos de los ensayos experimentales es el caudal en l/min, obtenemos a partir de este dato, la velocidad correspondiente según el ancho de la abertura por la que sale el agua, esto es, para el caso 2D se considera un ancho de 1 m para la abertura; para el caso 3D tenemos una abertura de 50 mm. La siguiente expresión nos da la velocidad en m/s para un caudal dado en l/min y un ancho dado en metros:

$$V \text{ [m/s]} = \frac{Q \text{ [l/min]}}{120 \cdot a \text{ [m]}} \quad (2.2)$$

2.3. Modelo de turbulencia

Como primer paso en la resolución de los problemas numéricamente se plantea dar solución para los campos de presiones y velocidades de aire en el interior de la torre. En este apartado se va a proceder a la descripción de la modelización de la turbulencia en general, para después centrar la explicación en el modelo de turbulencia en concreto empleado en el problema, el modelo k - ϵ .

Las variables del problema fluctúan instantáneamente en los flujos turbulentos de manera aleatoria, ocasionando igualmente el mezclado de cantidades de transporte como cantidad de movimiento y energía. Dado que estas fluctuaciones pueden ser de pequeña escala y de alta frecuencia, resulta en muchos casos computacionalmente muy costoso afrontar la simulación directa de la mayoría de los problemas planteados. A partir de esto, resulta común, en los problemas de ingeniería, resolver numéricamente las ecuaciones generales de conservación promediadas en el tiempo (llamadas ecuaciones promediadas de Reynolds). Al hacerlo así surgen nuevas variables como son los esfuerzos y flujos turbulentos de Reynolds que deben ser estimadas para la resolución del problema. Los distintos modelos de turbulencia surgen de la necesidad de esta estimación.

2.3.1. Modelo de turbulencia k - ϵ

El modelo k - ϵ estándar es un modelo semiempírico basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta, k , y su promedio de disipación, ϵ . La ecuación de transporte para k se deriva de forma similar a como se presentó en el apartado anterior, mientras que la ecuación para ϵ es más bien el producto del análisis dimensional unido a un razonamiento físico que el desarrollo de una ecuación exacta matemática.

En este modelo utilizamos k y ϵ para definir la escala de velocidad v y la escala de longitud l , representativas de las grandes escalas de la turbulencia:

$$v \sim k^{1/2} \quad (2.3) \quad l \sim \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad (2.4)$$

Cabe preguntarse acerca de la validez de utilizar la variable ϵ propia de los vórtices más pequeños para definir la escala l propia de los vórtices más grandes. Esto es posible

dado que para números de Reynolds altos la tasa de transferencia de energía del flujo medio a los grandes vórtices coincide con la tasa de transferencia de los vórtices grandes a los vórtices pequeños. Así, en este modelo los valores de k y ϵ están intrínsecamente unidos.

Si este no es el caso, la energía en las diferentes escalas puede crecer o disminuir sin límite. En la práctica, esto no suele ocurrir para flujos completamente turbulentos. Por ello hemos de decir que este modelo es solamente válido para este tipo de flujos.

Teniendo en cuenta la definición de escalas anterior, la viscosidad turbulenta según este modelo vendrá dada por:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.5)$$

Las ecuaciones que constituyen el modelo se detallan a continuación:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\Gamma_k}{\rho} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{G_k}{\rho} + \frac{G_b}{\rho} + \frac{S_k}{\rho} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\Gamma_\epsilon}{\rho} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\rho k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{S_\epsilon}{\rho} \quad (2.7)$$

donde G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media, G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotación, S_ϵ y S_k representan los términos fuente de las ecuaciones de transporte, Γ_ϵ la difusividad efectiva para la ecuación de ϵ dada por

$$\frac{\Gamma_\epsilon}{\rho} = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (2.8)$$

Y $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, C_μ , σ_k y σ_ϵ las constantes del modelo dadas por

$$C_{1\epsilon} = 1,44, C_{2\epsilon} = 1,92, C_{3\epsilon} = \tanh \left[\frac{v}{u} \right], C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1 \text{ y } \sigma_\epsilon = 1,3 \quad (2.9)$$

Siendo v y u las componentes de la velocidad del flujo paralela y perpendicular respectivamente.

Transición de régimen laminar a régimen turbulento

Tal y como se ha planteado anteriormente, el modelo $k-\epsilon$ no puede ser utilizado para predecir la transición. Según se indicaba en la descripción del modelo $k-\epsilon$, en el proceso de la transición es posible encontrar discrepancias entre la producción y la disipación, motivo por el que el modelo estándar $k-\epsilon$ no proporciona resultados acertados. Durante los últimos años, algunos investigadores han modificado este modelo para simular flujos con números de Reynolds bajos. Así, Ince y Launder (1989) introdujeron en el modelo la hipótesis de difusión de gradiente generalizado para modelizar el vector de flujo de calor. Hanjalic y Vasic (1993) propusieron un modelo algebraico para el flujo de calor que proporcionó resultados satisfactorios. Según Heindel et al. (1994) la inclusión de modificaciones en el modelo $k-\epsilon$ para ajustarse al comportamiento del flujo para Reynolds bajos proporciona en general una mejora en la predicción del flujo de calor en la pared. Sin embargo, tras el estudio de Henkes y Hoogendoorn (1995), se pusieron de manifiesto algunos problemas como que los resultados no eran independientes de la densidad de malla cerca de la pared. En muchas ocasiones, la transición a lo largo de una pared vertical no adiabática se retrasaba a medida que la malla se refinaba, obteniéndose en ocasiones resultados laminares irrealistas.

- Tratamiento cerca de la pared

Cuando el número de Reynolds es alto, el flujo cerca de la pared se asemeja al comportamiento universal cerca de la pared, o leyes de pared, descrito anteriormente. Estas leyes son utilizadas por el modelo $k-\epsilon$ cerca de la pared para evitar así el hecho de tener que simular el flujo en esta zona, donde la producción y la disipación no tienen por qué estar equiparadas y donde por tanto este modelo no es de aplicación. Si y es la coordenada normal a la pared, la velocidad media en un punto y_c con $30 < y_c^+ < 500$ satisface la ley logarítmica y las medidas de la energía cinética turbulenta indican que el promedio de producción de turbulencia es igual al promedio de disipación.

2.4. Modelo matemático de la película fluida

El aspecto, si cabe, más importante de nuestro problema es la película de agua que se forma sobre los separadores de gotas al inyectar el agua en la torre de refrigeración. Es en esta película donde recae la mayor y más importante parte del estudio en cuanto a la medida de su espesor o al comportamiento de la misma frente a

la corriente cruzada de aire. La ecuación de conservación de masa para una película de agua, considerada bidimensional, en un dominio tridimensional es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla_s \cdot [h\vec{V}_l] = \frac{\dot{m}_s}{\rho_l} \quad (2.10)$$

Donde ρ_l es la densidad del líquido, h es la altura de la película, ∇_s es el gradiente de la superficie, \vec{V}_l es la velocidad media de la película y \dot{m}_s la masa de agua por unidad de superficie.

La ecuación de conservación del momento para la película de agua es:

$$\frac{\partial h\vec{V}_t}{\partial t} + \nabla_s \cdot (h\vec{V}_t\vec{V}_f) = -\frac{h\nabla_s P_L}{\rho_l} + (\vec{g}_\tau)h + \frac{3}{2\rho_l}\vec{\tau}_{fs} - \frac{3v_l}{h}\vec{V}_l + \frac{\dot{q}}{\rho_l} \quad (2.11)$$

Donde

$$P_L = P_{gas} + P_h + P_\sigma \quad (2.12)$$

$$P_h = -\rho h(\vec{n} \cdot \vec{g}) \quad (2.13)$$

$$P_\sigma = -\sigma\nabla_s \cdot (\nabla_s h) \quad (2.14)$$

Los términos de la parte izquierda de la ecuación representan los efectos transitorios y de convección respectivamente. En la parte derecha, el primer término incluye los efectos de la presión del gas, la componente de la gravedad normal a la superficie de la pared y la tensión superficial; el segundo término representa el efecto de la gravedad en la dirección paralela a la película líquida; el tercer término es la fuerza cortante ocasionada por la viscosidad en la interfaz gas-líquido; el cuarto término representa la fuerza viscosa en la película fluida, y el último término está asociado con la entrada o separación de gotas de la película.

En cuanto a la ecuación de conservación de la energía en la película fluida, no se va a tener en cuenta puesto que en este proyecto se asume una situación isoterma para la simplificación de las simulaciones numéricas.

Capítulo 3 Modelo numérico

3.1. Introducción

Ante cualquier problema de Mecánica de Fluidos, existen diferentes metodologías para obtener información acerca del mismo: la metodología analítica, la experimental, la numérica y los métodos híbridos. La primera de ellas proporciona la solución exacta, aunque existen muy pocos problemas en esta área de conocimiento que puedan afrontarse mediante este método. La segunda sea quizás la que más se ha prodigado, aunque también presenta sus inconvenientes, sobre todo debido a las incertidumbres en los procesos de medida o a la necesidad de empleo de equipos de medida no intrusivos. Actualmente, la tercera, con el aumento de la capacidad de los ordenadores, se ha abierto camino con fuerza por la abundante información que es capaz de proporcionar. Los métodos híbridos, por otra parte, surgen de la unión de conceptos o resultados de las tres metodologías anteriores (sirva de ejemplo la mecánica de fluidos computacional-experimental).

Probablemente, la mejor forma de abordar un problema complejo sea a través de una combinación de las tres. En este trabajo se ha seguido esta línea utilizando las soluciones que la metodología analítica proporciona en problemas más básicos, como

punto de partida para el conocimiento general del problema tratado. Al mismo tiempo, se ha empleado la información de la metodología experimental directamente sobre los sistemas sometidos a estudio o a partir de fuentes bibliográficas. Además, se ha desarrollado un modelo numérico que, una vez validado con la información anterior, proporciona abundante información con la que establecer las conclusiones oportunas a los problemas inicialmente planteados. La descripción del modelo numérico empleado se desarrolla en este capítulo.

Los problemas a los que se ha hecho alusión, al igual que todos los flujos de fluidos, se encuentran descritos por ecuaciones diferenciales de conservación, que pueden representarse mediante una ecuación general en función de una variable dependiente φ . Para resolverlos mediante esta metodología, se ha de buscar una solución numérica a esta ecuación general. La mayoría de los métodos numéricos parten de los valores desconocidos de la variable dependiente en un número finito de localizaciones (nodos de malla), que cubren todo el dominio de cálculo. El método se basa en encontrar un conjunto de ecuaciones algebraicas para dichos valores y en la utilización de un algoritmo para resolver dichas ecuaciones. En este trabajo, las ecuaciones se resuelven numéricamente utilizando el código de propósito general Fluent.

3.2. Descripción general del código Fluent

Fluent es un código de ordenador de propósito general de volúmenes finitos desarrollado por la empresa Fluent.inc (actualmente propiedad de ANSYS inc) en lenguaje C, que es capaz de simular distintos flujos de fluidos. Simula en geometrías 2D y 3D flujos incompresibles o compresibles, estacionarios o transitorios, laminares o turbulentos, con fluidos newtonianos o no newtonianos, convección de calor natural y forzada, conducción y convección acopladas, transmisión de calor por radiación, especies químicas, flujos multifásicos, entre otros. Las simulaciones mediante Fluent se pueden utilizar para la predicción sobre el funcionamiento de equipos, generación de energía y aplicaciones medioambientales. También puede ser utilizado para aplicaciones aeroespaciales, automóviles, electrónica, procesamiento de materiales, diseño arquitectónico y resistencia al fuego.

Para este trabajo se han utilizado principalmente cuatro bloques del programa ANSYS: en primer lugar se ha utilizado Design Modeler para la representación gráfica de la torre de refrigeración; en segundo lugar Meshing para la creación del mallado necesario para la resolución del problema; por supuesto el código Fluent para el procesado y postprocesado de la solución y por último el bloque CFD-Post también para el postprocesado de la solución.

Teniendo en cuenta este esquema, la forma de abordar un problema general mediante la aplicación Fluent se describe a continuación. Inicialmente hemos de partir de los datos correspondientes a la geometría así como las características de las fronteras del dominio considerado. Una vez llevado a cabo este proceso, se realiza el mallado correspondiente a esa geometría. Este es un punto importante de la simulación dado que se ha de construir un mallado que no afecte a la solución obtenida. Se ha de buscar en lo posible relaciones de aspecto de las celdas próximas a la unidad, aunque si los gradientes en una dirección son muy reducidos, se puede llegar hasta relaciones de 50. En aquellas zonas donde los gradientes sean elevados se ha de intensificar el mallado para conseguir captar dicho gradiente. Otro aspecto a considerar a la hora de confeccionar un mallado es buscar en lo posible que las caras de las celdas sean perpendiculares a la dirección del flujo, evitando así la posible difusión numérica. Una vez realizado este proceso y asignadas las condiciones de contorno, se exporta la malla obtenida.

El siguiente paso es importar la malla en Fluent. Fluent dispone de distintos modelos dependiendo del problema del que se trate. Podemos especificar que se resuelva o no la ecuación de la energía, que se resuelvan las ecuaciones laminares o turbulentas (presentando varias alternativas), que se considere la radiación (mediante diferentes modelos), que se simule flujo multifásico, que se consideren distintas especies químicas, que se trabaje con flujo compresible o incompresible, etc.

Cuando ya hemos especificado el modelo físico, el siguiente paso es precisar el método de resolución numérica de ese modelo físico. Para ello Fluent dispone de diferentes esquemas de discretización de primer, segundo y tercer orden atendiendo al error de truncamiento de la serie de Taylor (Upwind de primer orden, Upwind de segundo orden, ley potencial, Quick) así como de diferentes esquemas para el acoplamiento presión-velocidad (Simple, Simplec y Piso). La descripción de estos esquemas y la discusión acerca de la conveniencia de cada uno de ellos se pueden encontrar en Versteeg-Malalasekera (2007).

A partir de este momento estamos en disposición de poder llevar a cabo el cálculo. Una vez realizado, la aplicación Fluent permite realizar el postprocesado de los resultados, presentando las variables solución del problema como presión, velocidad, temperatura, densidad, energía cinética turbulenta, etc. Con esto podemos dar por concluido la simulación de un problema concreto. A continuación se describe más en detalle el método de resolución numérica empleado en esta investigación.

3.3. Resolución numérica de modelos

Como se ha mostrado en el capítulo anterior, las variables dependientes de interés obedecen a un principio de conservación que se puede definir con una ecuación diferencial. De la observación de las ecuaciones diferenciales que rigen los flujos de fluidos, se deduce que todas las variables dependientes de interés obedecen a un principio de conservación generalizado. Así, cualquier ecuación de conservación en Mecánica de Fluidos puede ponerse como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (3.1)$$

Donde el primer término representa el término transitorio, el segundo el término convectivo, el tercero el término difusivo y el cuarto el término fuente, siendo ρ la densidad del fluido, ϕ la variable dependiente y Γ el coeficiente de difusión. Sobre cada una de las ecuaciones a resolver, que tienen la estructura anterior, se aplica la técnica numérica de los volúmenes finitos. Esta técnica se basa en tres puntos fundamentales:

- División del dominio en volúmenes de control no solapados entre sí.
- Integración de las ecuaciones de conservación en cada uno de esos volúmenes de control individuales para construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes tales como velocidad, presión, temperatura y otros.
- Linealización de las ecuaciones discretizadas y resolución del sistema de ecuaciones resultante para obtener los valores de las variables dependientes.

A continuación se describe cada uno de estos puntos, que representan el modelo numérico propuesto para la solución de los problemas planteados.

3.3.1. Generación de la malla

El primer paso en el método de los volúmenes finitos es dividir el dominio en volúmenes de control discretos, cada uno de los cuales contiene un nodo donde se va a obtener el valor de la variable dependiente estudiada. Las caras de los volúmenes de control se encuentran a medio camino entre dos nodos adyacentes.

En los volúmenes de control que se encuentren en los extremos, las fronteras físicas del problema van a coincidir con las fronteras de esos volúmenes de control. La nomenclatura seguida en este capítulo se presenta en la figura siguiente. El punto P representa el nodo del volumen de control considerado. Los nodos al oeste, al este, al norte y al sur se identifican respectivamente por W , E , N y S , siendo las correspondientes caras frontera las identificadas por w , e , n y s .

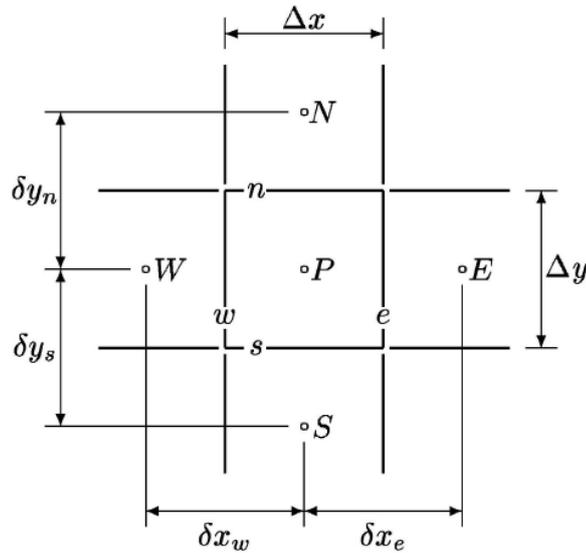


Figura 18. Esquema de la nomenclatura para un volumen de control en una malla cartesiana bidimensional

3.3.2. Discretización

El paso clave del método de los volúmenes finitos es la integración de las ecuaciones de conservación sobre el volumen de control para alcanzar una ecuación en cada punto P . Dicho de otro modo: Fluent utiliza la técnica basada en volúmenes de control para convertir las ecuaciones de conservación en ecuaciones algebraicas que se pueden resolver numéricamente. Esta técnica consiste en integrar estas ecuaciones en cada volumen de control dando lugar a ecuaciones discretas que conservan la cantidad física considerada sobre cada uno de estos volúmenes.

Para el volumen de control anteriormente definido, suponiendo régimen estacionario, esta técnica da lugar a

$$\int_A \vec{n} \cdot (\rho \vec{u} \phi) dA = \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{VC} S_\phi dV \quad (3.2)$$

Donde el primer término representa el flujo convectivo de ϕ a través de la superficie del volumen de control, el segundo término el flujo difusivo y el tercero la generación o destrucción de la propiedad ϕ en el volumen de control. Esto constituye una ecuación de balance para ϕ en el volumen de control. En nuestro dominio, para un problema unidimensional estacionario, la superficie S está rodeada de las caras e y w , por lo tanto:

$$\int_A \vec{n} \cdot (\rho \vec{u} \phi) dA = (\rho \vec{u} \phi A)_e - (\rho \vec{u} \phi A)_w \quad (3.3)$$

Así, para poder obtener los términos difusivos necesitamos conocer el coeficiente de difusión Γ y los gradientes de la propiedad ϕ en las caras. Según la práctica establecida, los valores de la propiedad ϕ y del coeficiente Γ se definen y deben ser evaluados en los nodos. Para calcular los gradientes en las caras se utiliza una distribución aproximada de las propiedades definidas en los nodos. Las aproximaciones lineales parecen ser la forma más obvia y simple de calcular los valores en las caras y los gradientes. Esta práctica es lo que se conoce como diferencias centrales. De este modo, en una malla uniforme interpolada linealmente, los valores para Γ_e y Γ_w vienen dados por:

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_W + \Gamma_P}{2} \quad (3.4)$$

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_E + \Gamma_P}{2} \quad (3.5)$$

y los términos del flujo difusivo se evalúan por

$$\left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} A \right)_e = \Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} \right) \quad (3.6)$$

$$\left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} A \right)_w = \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_w} \right) \quad (3.7)$$

En situaciones prácticas, el término fuente puede ponerse en general como una función de la variable dependiente ϕ :

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_P \phi_P \quad (3.8)$$

El principal problema en la discretización de los términos convectivos es el cálculo del valor de la propiedad transportada ϕ en las caras del volumen de control y el flujo convectivo de esta propiedad a través de estas fronteras (estamos suponiendo conocidos los valores de la velocidad en las caras, posteriormente se entrará más en detalle en este tema). Con el fin de llevar a cabo este cometido, se han definido dos variables intermedias como son el flujo másico convectivo por unidad de área ($F = \rho u$) y el coeficiente de difusión por unidad de longitud ($D = \Gamma/\delta x$) en las caras de la celda. Se ha considerado que $A_w = A_e = A$. Teniendo en cuenta estas definiciones, los términos convectivos se pueden expresar en la forma:

$$(\rho \vec{u} \phi A)_e - (\rho \vec{u} \phi A)_w = F_e \phi_e A - F_w \phi_w A \quad (3.9)$$

Parecería obvio discretizar estos términos empleando el mismo procedimiento que para los términos difusivos. Sin embargo, el proceso de difusión afecta a la distribución de las cantidades transportadas a lo largo de sus gradientes en todas las direcciones, mientras que la convección ejerce su influencia solamente en la dirección del flujo. De este modo, para flujos altamente convectivos parece poco adecuado utilizar un esquema de diferencias centrales para estos términos. Por ello, en esta investigación se ha utilizado un esquema alternativo conocido como Upwind de segundo orden. Con el fin de mostrar este esquema de discretización, comenzaremos introduciendo las ecuaciones correspondientes al primer orden para posteriormente incluir los elementos del esquema de segundo orden.

Esquema Upwind

Según ya se ha comentado, uno de los mayores inconvenientes de las diferencias centrales es su incapacidad para identificar la dirección del flujo. El valor de la propiedad ϕ en la cara oeste de la celda está siempre influenciado por ϕ_P y ϕ_W en las diferencias centrales. En flujos altamente convectivos de oeste a este, esa forma de actuación es inapropiada porque la cara oeste de la celda debería recibir una influencia más fuerte del nodo W que del nodo P . El esquema Upwind tiene en cuenta este hecho cuando determina el valor en la cara de la celda: el valor convectivo de ϕ en una cara se toma igual al valor del nodo aguas arriba.

Cuando el flujo actúa de oeste a este, $F_e > 0$, $F_w > 0$, y entonces $\phi_w = \phi_W$ y $\phi_e = \phi_P$ y la ecuación una vez discretizada toma la forma:

$$F_e \phi_P - F_w \phi_W = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) + (S_u + S_P \phi_P) \quad (3.10)$$

Cuando el flujo va en sentido contrario, $F_e < 0$, $F_w < 0$, y entonces $\phi_w = \phi_P$ y $\phi_e = \phi_E$ tomando ahora la ecuación la forma:

$$F_e \phi_E - F_w \phi_P = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) + (S_u + S_P \phi_P) \quad (3.11)$$

Estas ecuaciones pueden ser reordenadas y escritas en la forma:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + S_u \quad (3.12)$$

Donde

$$a_P = a_W + a_E + (F_e - F_w) - S_P \quad (3.13)$$

$$a_W = D_w + \max(F_w, 0) \quad (3.14)$$

$$a_E = D_e + \max(0, -F_e) \quad (3.15)$$

Cuando se selecciona un Upwind de segundo orden, el valor de la cara ϕ_f se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$\phi_f = \phi + \text{grad}\phi \cdot \Delta s \quad (3.16)$$

Donde ϕ y $\text{grad}\phi$ representan el valor en el centro de la celda y su gradiente aguas arriba en la celda, y Δs es el vector desplazamiento desde el centro de la celda aguas arriba y el centro de la cara. Esta formulación requiere el cálculo de $\text{grad}\phi$ en cada celda. Este gradiente se calcula mediante la expresión

$$\text{grad}\phi = \frac{1}{V} \sum_f^N \overline{\phi_f} nA \quad (3.17)$$

Donde los valores en las caras de $\overline{\phi_f}$ se computan promediando ϕ de las celdas adyacentes a la cara.

Como se ha afirmado en el apartado 3.2, Fluent dispone del esquema de discretización de tercer orden Quick, detallado en Versteeg-Malalasekera (2007). Se han resuelto algunos casos con este esquema y se ha comprobado que las diferencias obtenidas cuando se utiliza este esquema no son significativas respecto al esquema

Upwind, si bien presentan en algunos casos particulares problemas de estabilidad en la convergencia.

3.3.3. Resolución del sistema de ecuaciones

Una vez discretizadas las ecuaciones de conservación (ecuación de continuidad, cantidad de movimiento y energía, así como otras ecuaciones escalares), el siguiente paso es resolver este conjunto de ecuaciones en cada nodo. En el desarrollo anterior se ha supuesto que el campo de velocidades era conocido. En general, no se conoce y hay que obtenerlo como parte de la solución general con el resto de variables del flujo.

En el proceso de resolución de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento aparecen dos nuevos problemas. Por un lado aparecen términos no lineales de la forma ρu^2 . Por otro, las dos ecuaciones se encuentran acopladas a través de la presión, aunque no se conoce ninguna ecuación escalar para obtenerla. Si se considera flujo incompresible, la densidad y la presión no están asociadas. En este caso, el acoplamiento entre la presión y la velocidad impone que si se aplica el campo de presiones correcto en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, el campo de velocidades resultante ha de satisfacer la ecuación de continuidad.

Estos problemas de no linealidad y acoplamiento entre la velocidad y la presión se resuelven mediante el algoritmo Simple. Bajo este algoritmo, los flujos convectivos por unidad de masa a través de las caras de las celdas se evalúan mediante las componentes de la velocidad supuestas. De igual forma se supone el campo de presiones y se resuelven las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento. Calculado el campo de velocidades, se obtiene a partir de la ecuación de continuidad una ecuación para la corrección de la presión. Corregida la presión, se introduce de nuevo en la ecuación de cantidad de movimiento, se vuelve a calcular el campo de velocidades, se calcula de nuevo la corrección de la presión, repitiéndose el proceso hasta que se alcance la convergencia. Este algoritmo se describe con mayor detalle más adelante.

Malla alternada

Por el modo de discretización de la ecuación de cantidad de movimiento, pueden originarse campos de presión alternados, debido a que la diferencia de presión se toma entre dos puntos alternados, en vez de entre dos puntos adyacentes. Este campo de

presión alternado, no real, será tratado como un campo uniforme de presión por la ecuación de cantidad de movimiento. Por otro lado, del proceso de discretización de la ecuación de continuidad, se deduce que se exige la igualdad de velocidades entre dos puntos alternados y no entre dos adyacentes; como consecuencia de esto, puede obtenerse un campo de velocidad alternado, que no puede aceptarse como solución real.

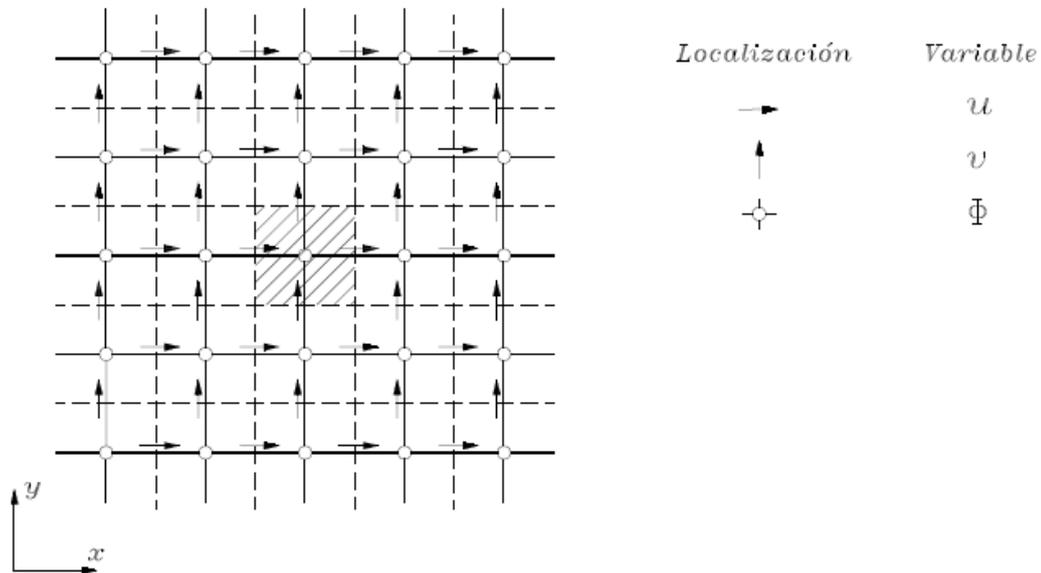


Figura 19. Esquema tipo de la malla alternada utilizada en este trabajo

Las dificultades anteriores desaparecen utilizando una malla alternada, donde las componentes de la velocidad se calculan para los puntos que se sitúan sobre las caras de los volúmenes de control. Esto es, la componente x de la velocidad se calcula en las caras que son normales a la dirección x (ver figura anterior).

Al emplear la malla alternada, se puede calcular el flujo de masa a través de las caras de los volúmenes de control, sin ninguna interpolación para la componente de la velocidad. Además, la forma discretizada de la ecuación de continuidad contendrá términos que expresan diferencias de velocidades adyacentes, lo que evitará la aparición de un campo de velocidad alternado. En la malla alternada, solo podrán introducirse, con resultados aceptables en la ecuación de continuidad, campos de velocidades aceptables. Otra ventaja del uso de esta malla, es que la diferencia de presión entre dos puntos adyacentes constituirá la fuerza natural que provocará la aparición de las componentes de la velocidad localizadas entre esos dos puntos. Por

tanto, eventuales campos de presión alternados no serán tratados ya como campos uniformes y no aparecerán como posibles soluciones.

De esta forma evaluamos las variables escalares, tales como presión, densidad, temperatura, etc., en los nodos ordinarios (malla original) pero calculamos las componentes de la velocidad en una nueva malla cuyas celdas están centradas en las caras de la malla original (malla alternada).

Algoritmo SIMPLE

El acrónimo Simple proviene del término inglés 'Semi-implicit Method for Pressure-Linked Equations'. Fue originalmente propuesto por Patankar y Spalding (1972) y es esencialmente un procedimiento de suposición-corrección para el cálculo de la presión en una malla alternada. El procedimiento se ilustra para un flujo bidimensional estacionario en coordenadas cartesianas.

La forma discretizada de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para la componente u de la velocidad puede ponerse:

$$a_e u_e = \sum a_{ady} u_{ady} + b + (p_P - p_E) A_e \quad (3.18)$$

donde el subíndice e indica el punto que define el volumen de control considerado, y el subíndice ady , los correspondientes puntos adyacentes; los coeficientes a_{ady} cuantifican el efecto combinado de la convección y de la difusión en las caras del volumen de control; el término b engloba los términos fuente, excepto el correspondiente al gradiente de presión; el término $(p_P - p_E) A_e$ representa la fuerza actuante debida al gradiente de presión, siendo A_e el área sobre la que actúa dicho gradiente. La ecuación de cantidad de movimiento para otras direcciones puede ponerse de forma similar. Por ejemplo, la forma discretizada para la componente v de la velocidad puede ponerse:

$$a_n v_n = \sum a_{ady} v_{ady} + b + (p_P - p_N) A_n \quad (3.19)$$

Las expresiones anteriores sólo pueden resolverse cuando la distribución de presión es conocida, o cuando se supone de alguna manera. Si no se emplea una distribución de presión adecuada, la distribución de velocidad resultante no satisfará la ecuación de continuidad. Si p^* denota la distribución de presión supuesta, entonces u^*

y v^* denotan las correspondientes componentes de la velocidad, que se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones discretizadas:

$$a_e u_e^* = \sum a_{ady} u_{ady}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (3.20)$$

$$a_e v_e^* = \sum a_{ady} v_{ady}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n \quad (3.21)$$

El objetivo es encontrar un método de obtención de la distribución supuesta de presión p^* , de forma que la distribución de las componentes de velocidad u^* y v^* satisfaga la ecuación de conservación de la masa. Puede suponerse que la distribución correcta de presión p se obtiene de la ecuación

$$p = p^* + p' \quad (3.22)$$

Donde p' se denomina corrección de la presión p . Es preciso conocer ahora la respuesta de las componentes de la velocidad frente a este cambio de la presión. Las correcciones correspondientes para esta distribución de velocidad u' y v' pueden introducirse de forma similar:

$$u = u^* + u', \quad (3.23) \quad v = v^* + v' \quad (3.24)$$

Restando la ecuación (3.23) de la ecuación (3.20), se obtiene

$$a_e u_e' = \sum a_{ady} u_{ady}' + (p_P' - p_E') A_e \quad (3.25)$$

Con el fin de simplificar la expresión anterior, el término sumatorio se desprecia, lo que constituye la principal aproximación del algoritmo simple. De este modo obtenemos

$$u_e' = d_e (p_P' - p_E') \quad (3.26)$$

Donde $d_e = A_e / a_e$. La ecuación (3.26) se denomina fórmula de corrección de la velocidad y puede ponerse alternativamente como sigue:

$$u_e = u_e^* + d_e (p_P' - p_E') \quad (3.27)$$

Para la dirección y , la fórmula de corrección de la velocidad se escribe en forma similar,

$$v_n = v_n^* + d_n(p'_P - p'_N) \quad (3.28)$$

El siguiente paso es convertir la ecuación de continuidad en una ecuación para la corrección de la presión. Con este propósito, se supone que la densidad no depende directamente de la presión. La ecuación de continuidad en régimen estacionario,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3.29)$$

Ha de integrarse sobre el volumen de control mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Si se sustituye en la ecuación integrada sobre el volumen de control las componentes de la velocidad obtenidas mediante las fórmulas de corrección () y (), se obtiene la siguiente ecuación discretizada para p' :

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b' \quad (3.30)$$

Donde

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (3.31)$$

$$a_W = \rho_w d_w A \quad (3.32)$$

$$a_E = \rho_e d_e A \quad (3.33)$$

$$a_N = \rho_n d_n A \quad (3.34)$$

$$a_S = \rho_s d_s A \quad (3.35)$$

$$b' = (\rho u^* A)_w - (\rho u^* A)_e + (\rho u^* A)_s - (\rho u^* A)_n \quad (3.36)$$

La ecuación (3.30) es la ecuación de continuidad discretizada y representa una expresión para la corrección de la presión. El término fuente b' es un término de ajuste que proviene del campo de velocidades incorrecto u^* y v^* . Resolviendo la ecuación (3.30), se puede obtener la corrección del campo de presiones p' en todos los puntos. Una vez que esta corrección es conocida, se puede obtener el campo de presiones correcto utilizando la expresión (3.22) y las componentes de la velocidad a través de (3.27) y (3.28). La omisión de los términos $\sum a_{ady} u'_{ady}$ no afecta a la solución final

porque las correcciones para la presión y la velocidad han de ser cero en la solución convergida. La ecuación de corrección de la presión es muy susceptible a divergir a menos que se empleen coeficientes de relajación en el proceso iterativo. Así,

$$p_{nueva} = p^* + \alpha_p p' \quad (3.37)$$

Donde α_p es el factor de relajación de la presión.

La aplicación Fluent dispone de otros algoritmos como el Simplec o el Piso para el acoplamiento presión velocidad. En general, estos algoritmos de acoplamiento suelen proporcionar una convergencia más rápida aunque el número de operaciones a realizar es superior. En los casos contrastados con los diferentes algoritmos no se han apreciado diferencias significativas ni en la solución obtenida ni en los tiempos de cálculo. Versteeg-Malalasekera (2007) afirman que no está todavía claro cuál de las variantes del algoritmo Simple es la más adecuada para la resolución de un problema concreto.

Algoritmo PISO para régimen transitorio

Las siglas PISO vienen de Pressure-Implicit with Splitting of Operators. Es un esquema de acoplamiento de presión y velocidad, de la misma familia que los algoritmos SIMPLE. Se basa en el mayor grado de la relación aproximada entre las correcciones para presión y velocidad. Una de las limitaciones de los algoritmos SIMPLE o SIMPLEC es que tras resolver la ecuación de corrección de presión, las nuevas velocidades y el correspondiente flujo no satisface el balance de momentos. El algoritmo PISO, por su parte, realiza dos correcciones adicionales: por proximidad y por oblicuidad.

Tras cada ciclo del algoritmo PISO, las velocidades corregidas están más cerca de cumplir las ecuaciones de continuidad y momento.

Algoritmo de cálculo de las ecuaciones

El resultado del desarrollo anterior es un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales que se necesita resolver. Existen dos familias de técnicas de solución para ecuaciones algebraicas lineales: métodos directos y métodos indirectos (o métodos iterativos). Ejemplos simples de métodos directos son la regla de Cramer para la inversión de la matriz y la eliminación Gaussiana. En estos métodos es posible conocer a priori el número de operaciones necesarias para alcanzar la solución.

Los métodos iterativos se basan en la aplicación repetitiva de un algoritmo simple que conduzca a la convergencia después de un número de repeticiones. Algunos ejemplos de este método son los métodos de iteración punto a punto de Jacobi y Gauss-Seidel. En ellos no es posible predecir de antemano el número de operaciones necesarias para alcanzar la solución. La principal ventaja de estos métodos iterativos es que solamente los coeficientes distintos de cero de las ecuaciones necesitan ser almacenados en memoria. Estos métodos son fáciles de implementar aunque alcanzan la convergencia muy lentamente cuando el sistema de ecuaciones a resolver es muy grande. Por este motivo no se consideran muy útiles para CFD.

Thomas (1949) desarrolló una técnica para la resolución rápida de sistemas tri-diagonales, conocida actualmente como TDMA. Esta técnica es la utilizada en el código Fluent para la resolución de los problemas planteados. Se trata de un método que puede resolver problemas multidimensionales y que ha sido empleado por gran cantidad de códigos numéricos de aplicación en la Mecánica de Fluidos. Su principal ventaja consiste en el uso reducido de memoria de computación. El desarrollo del método puede encontrarse en Versteeg-Malalasekera (2007).

3.3.4. Flujos no estacionarios

Una vez desarrollado el método de los volúmenes finitos, en este apartado, se va a analizar el caso de problemas que dependen del tiempo. La ley de conservación para el transporte de un escalar en un flujo transitorio viene dada por la forma general:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (3.38)$$

El primer término de esta ecuación representa la variación con el tiempo de dicho escalar y es cero para flujos estacionarios. Para predecir problemas transitorios se debe mantener este término en el proceso de discretización. La integración en volúmenes finitos de la ecuación (3.38) sobre el volumen de control VC debe ser incrementada con una integración adicional sobre el paso de tiempo Δt . Reemplazando los integrales de volumen de los términos convectivos y difusivos por integrales de superficie y cambiando el orden de integración en el término de variación respecto al tiempo se obtiene:

$$\int_{VC} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dt \right) dV + \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A n \cdot (\rho u\phi) dA \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A n \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) dA \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} S_\phi dV dt \quad (3.39)$$

La integración en el volumen de control es esencialmente la misma que para flujos estacionarios, expuesta en el apartado 4.3.2., para los términos convectivos, difusivos y de generación de la propiedad.

3.4. Estudio del mallado

Una vez planteado el modelo numérico para la resolución de las ecuaciones generales de aplicación en el problema planteado, el siguiente paso será determinar el mallado necesario del dominio. El objetivo será obtener el mallado que proporciona una solución suficientemente aproximada que no dependa del número de celdas de que consta este mallado.

Un mallado estructurado, formado por elementos prismáticos, tiene muchas ventajas sobre el mallado desestructurado. Una de las más importantes ventajas es el menor número de elementos necesarios para la generación de una misma malla con elementos prismáticos, frente al empleo de elementos tetraédricos.

En el presente proyecto se han realizado dos mallados distintos, uno para los casos estudiados en dos dimensiones, y otro mallado para las tres dimensiones. El hecho de estudiar tanto uno como otro tipo de dominio se debe a los grandes costes computacionales requeridos para llevar a cabo las simulaciones en 3D, es por eso que se estudian la mayoría de casos en 2D ya que se consiguen soluciones en un tiempo mucho menor: en 2D se consigue simular alrededor de 1 segundo al día; cifras impensables si nos ocupáramos de un caso en 3D con el dominio completo.

Para los casos en 2D se representa una sección de la torre. La malla utilizada es estructurada, compuesta por unos 14000 elementos, más finos en la sección de ensayo debido a que se trata de la zona por la que va a transcurrir el agua. Aun así, los elementos en esta zona tienen unos tamaños del orden de los 2 mm, muy por encima de los tamaños necesarios para una correcta simulación del flujo de agua. Esto es así para reducir tiempos de cálculo con la ayuda de la herramienta del mallado adaptativo (AMR por sus siglas en inglés 'Adaptative Mesh Refinement') que se explicará más adelante.

El dominio bidimensional se separa en varias zonas para facilitar el mallado del mismo. Un primer tipo de zona son: la zona superior (por encima de los separadores), la zona inferior (por debajo de la zona porosa) y la propia zona porosa; estas tres zonas

tienen un tamaño de elementos en sus mallas de 8 mm la primera y 10 mm las dos siguientes; son tamaños grandes debido a que son zonas por las que en principio no va a pasar el agua y solo se requieren elementos suficientes para una correcta simulación del flujo de aire. El siguiente tipo de región es la zona situada entre la zona porosa y los separadores de gotas: en esta zona se produce un gradiente en el tamaño, desde los 10 mm de la zona porosa hasta los tamaños menores de la sección de ensayo. Las zonas laterales situadas a ambos lados de los separadores tienen elementos de 4 mm de longitud. Y por último, la zona del canal tiene elementos de 2 mm. En las siguientes figuras se muestra en detalle todas estas regiones.

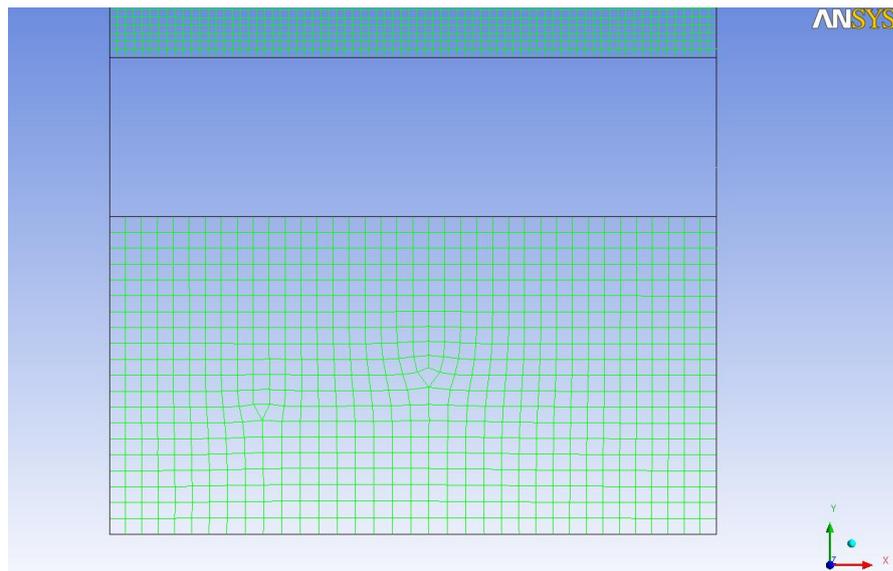


Figura 20. Mallado de la zona inferior

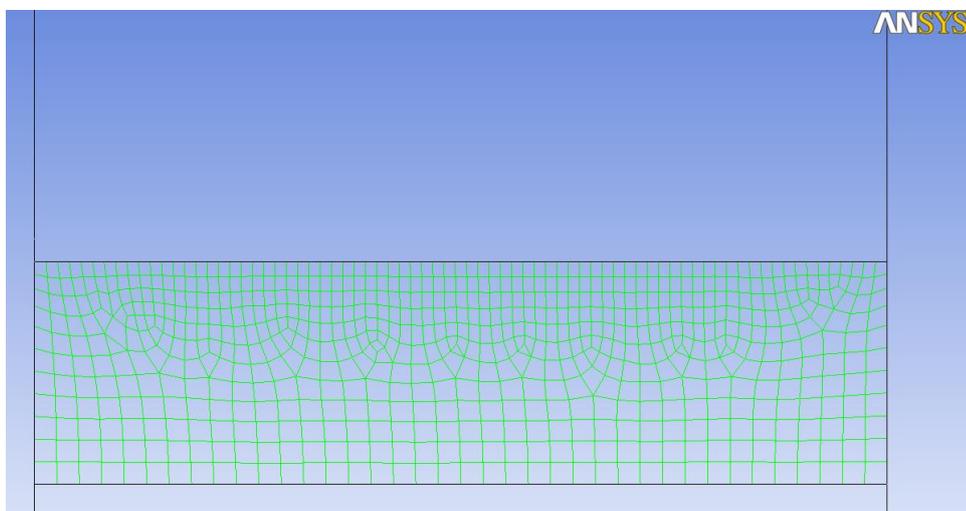


Figura 21. Mallado de la zona porosa

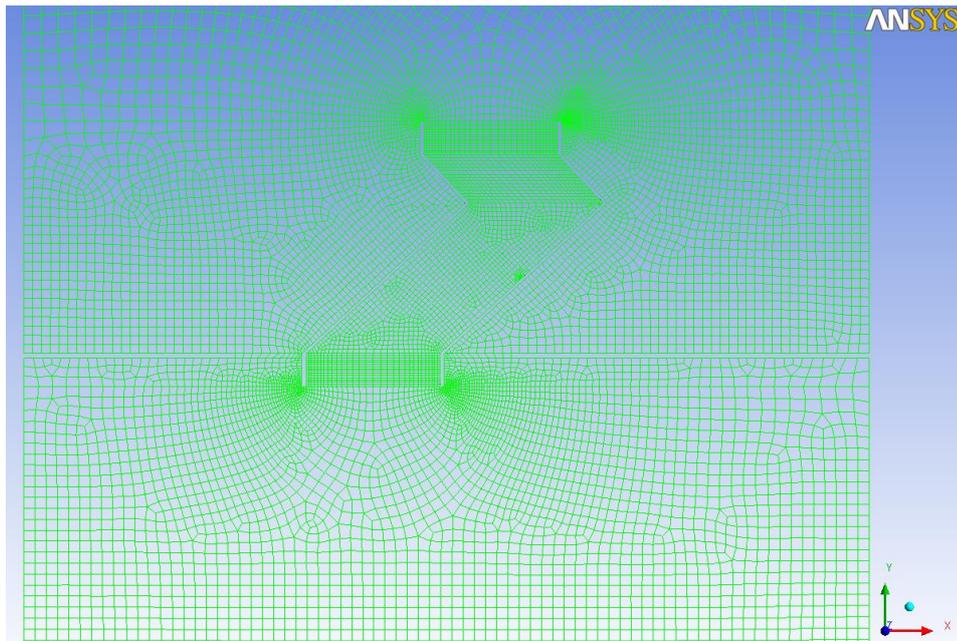


Figura 22. Mallado de la sección de ensayo

De igual manera se procede con el mallado en 3D. En este caso, la región a estudiar se centra justo en la zona donde se van a producir los fenómenos que queremos estudiar, estas zonas son: la zona inferior de los separadores (donde el flujo de agua cambia de descendente a ascendente por la acción de la corriente de aire) y la zona superior de los separadores (donde se desprenden las gotas de agua para incorporarse a la corriente de aire y salir al ambiente). En las siguientes figuras se pueden ver los distintos mallados empleados para las simulaciones.

Por su parte, el mallado 3D consiste en una región de 50x50x35 mm con algo más de 50000 elementos en el momento de empezar a iterar en régimen transitorio. En este caso también se procede con el AMR de manera que se utilicen el menor número de elementos posible y acelerar el proceso de cálculo. Se consiguen alrededor de 0.2 segundos al día para estos casos tridimensionales. Este dominio 3D se ha discretizado mediante elementos prismáticos, la simplicidad del modelo permite además que estos elementos sean iguales en tamaño.

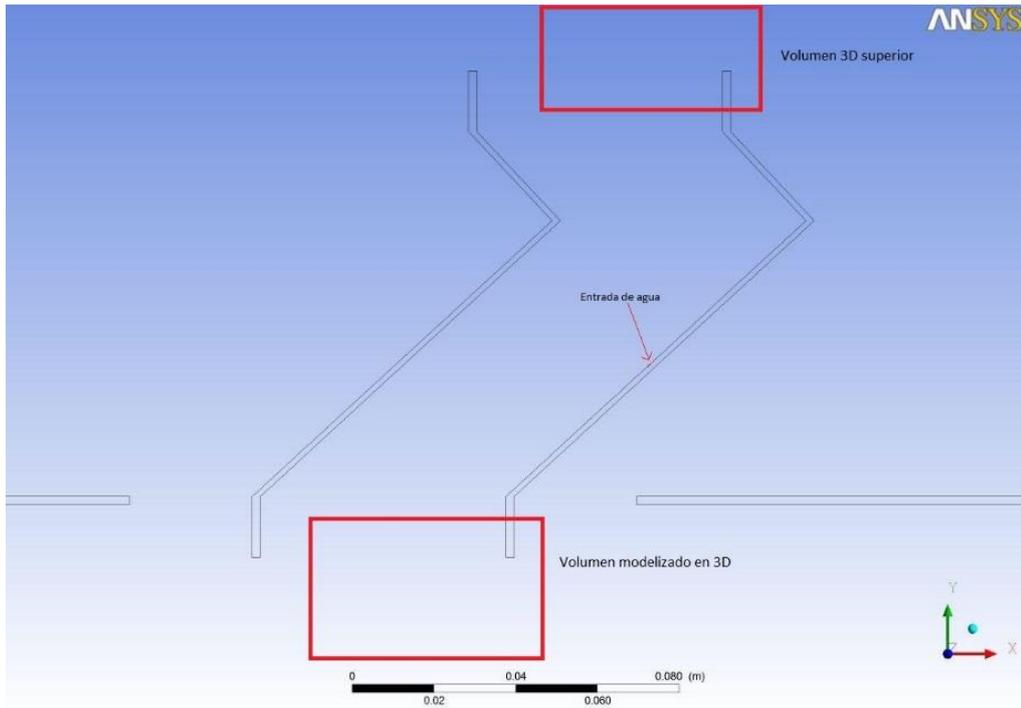


Figura 23. Localización de los volúmenes 3D empleados

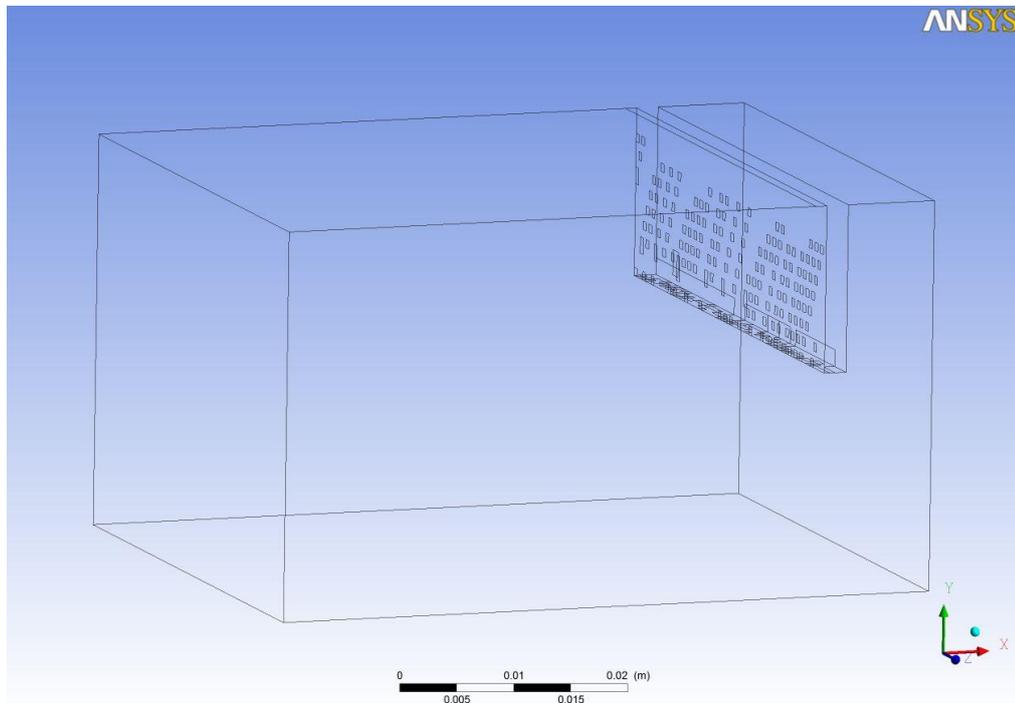


Figura 24. Volumen tridimensional inferior estudiado

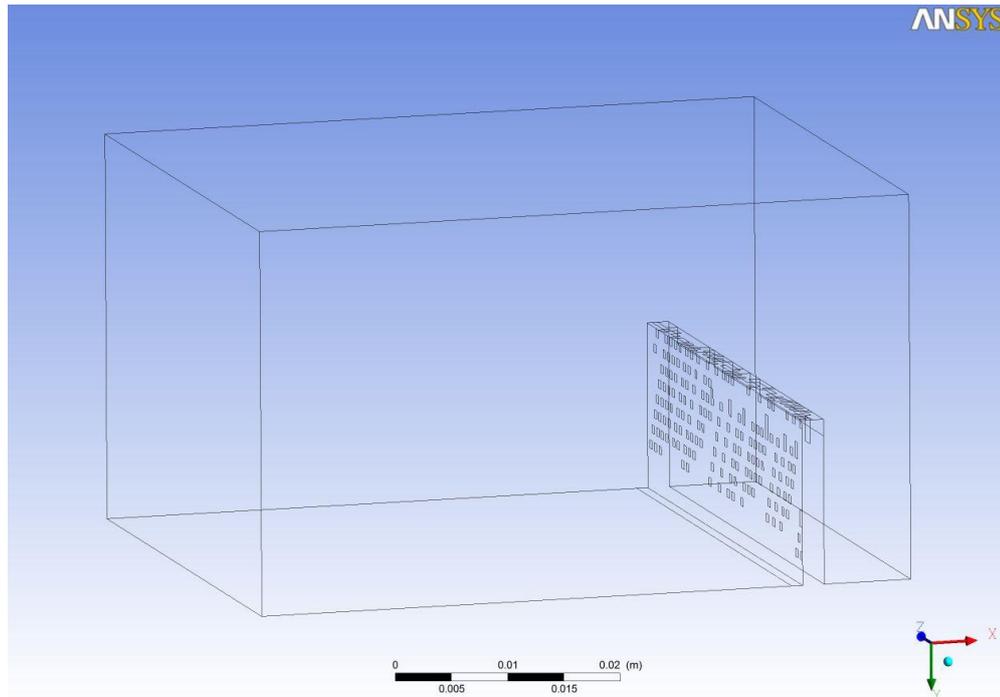


Figura 25. Volumen tridimensional superior

AMR

El refinamiento adaptativo del mallado se emplea en este proyecto con el fin de reducir considerablemente los tiempos de cálculo. Esta opción del software de Fluent se basa en la selección de ciertos criterios de manera que el elemento que los cumple pasa a dividirse en otros menores según el nivel de refinamiento escogido; y una vez que deja de cumplir los criterios fijados, vuelve a su tamaño original. El criterio seleccionado en las simulaciones es el de fracción volumétrica: cuando la fracción volumétrica de agua dentro del elemento sobrepasa un valor de 0.3 la celda se divide en 9 celdas menores (por fijar un nivel de refinamiento de 3); así, si el elemento era originariamente un cuadrado de 2x2 mm, pasa a dividirse en 9 cuadrados de 0.6x0.6 mm; un tamaño este último más apropiado para la correcta simulación de una película de agua. Análogamente sucede en las simulaciones en tres dimensiones, en este caso un prisma de 2x2x1 mm pasa a estar formado por 27 prismas de 0.6x0.6x0.3 mm.

Con este proceso se ve incrementado el número de elementos, pero siempre será menor que sin utilizar el AMR. Por ejemplo, en el mallado 2D, como se aprecia en las

figuras 25 y 26, se observa cómo se pasa de los 14000 elementos iniciales, a los 17500 cuando el flujo está desarrollado. Y en el caso 3D, pasamos de los 50000 elementos iniciales a los 63000 cuando el flujo aún está en desarrollo (figuras 27 y 28).

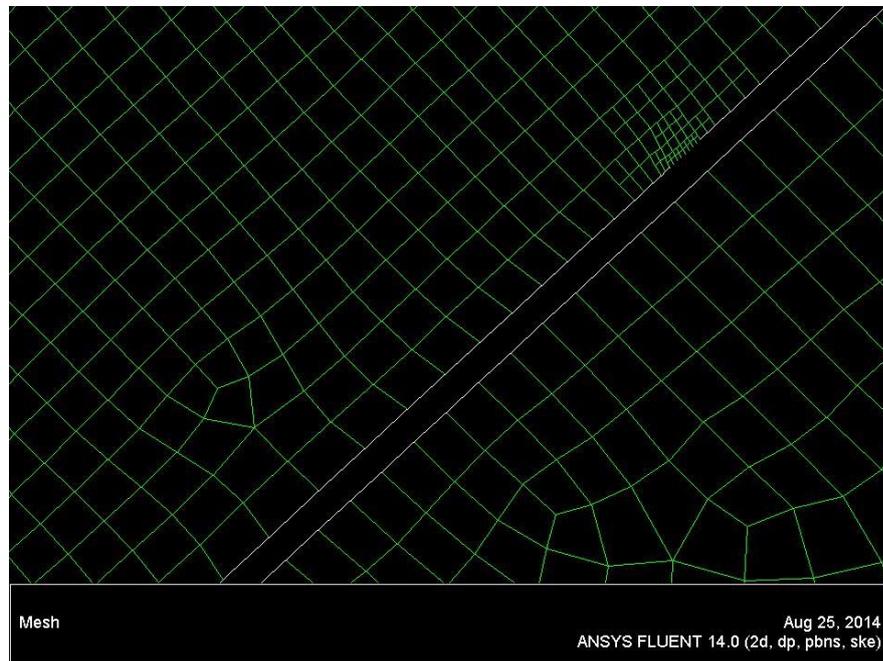


Figura 26. Malla en la zona de la entrada de agua al inicio de las iteraciones

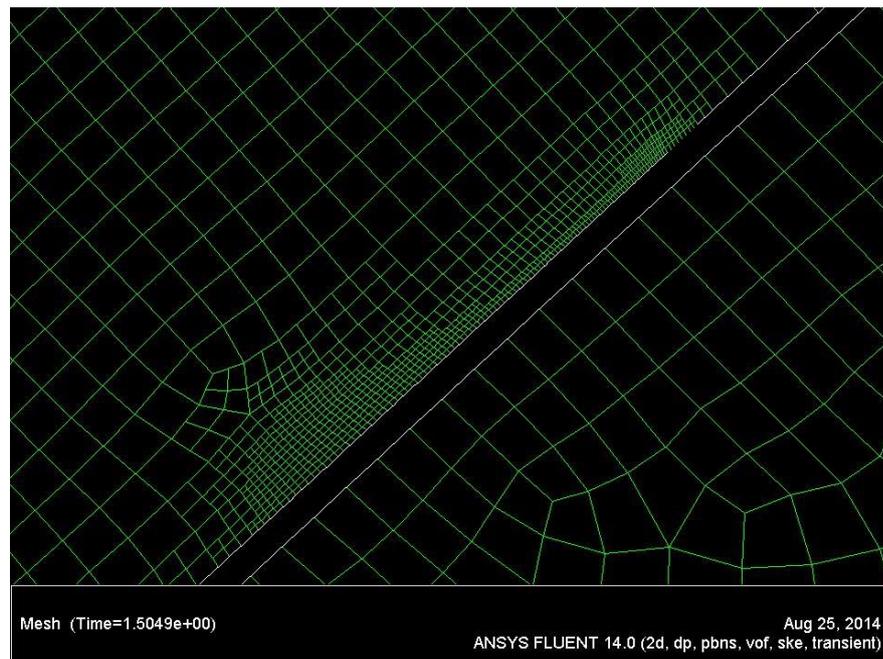


Figura 27. Malla en la zona de la entrada de agua con el flujo más desarrollado

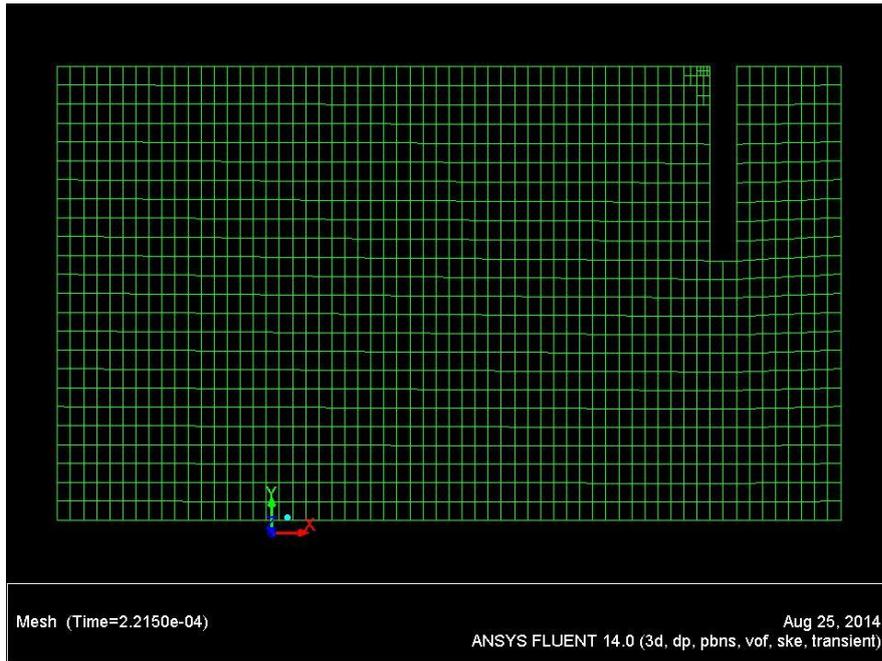


Figura 28. Malla en el caso tridimensional al inicio de la solución

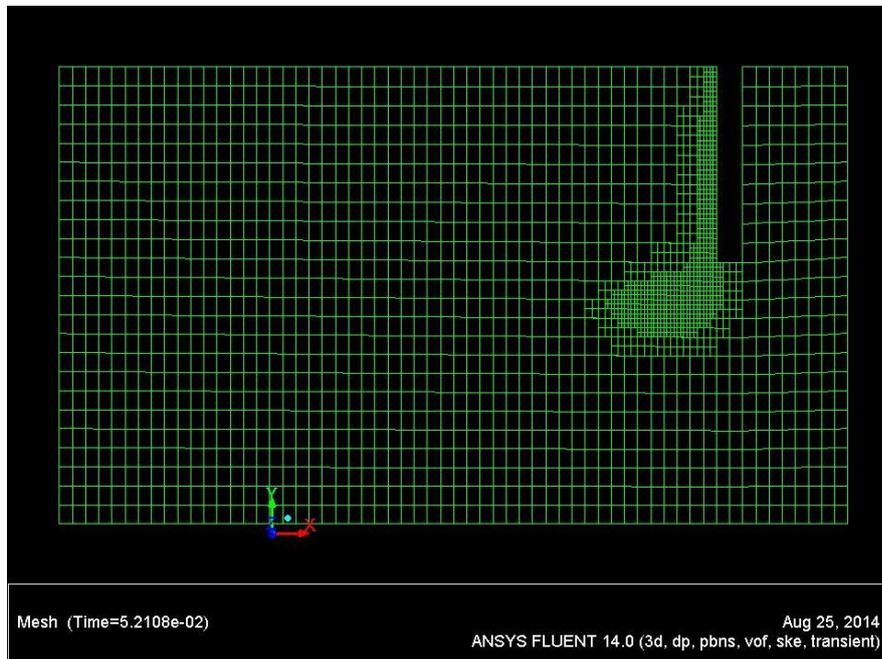


Figura 29. Malla del caso tridimensional al final de la solución

Debido a la capacidad computacional requerida para la resolución del modelo numérico, éstas han tenido que llevarse a cabo en el supercomputador instalado en la Universidad Politécnica de Cartagena, más concretamente en el SAIT (Servicio de Apoyo

a la Investigación Tecnológica). Las características del equipamiento disponible son las siguientes:

Clúster para cálculo de alto rendimiento con 40 procesadores Intel Xeon (152 cores en total), 300 Gbytes de RAM y 8,7 Terabytes de almacenamiento:

- Sistema Operativo Linux RedHat.
- Gestor de Trabajos de usuario Torque/Maui
- 14 nodos con 2 Intel Xeon Quad-Core a 2,80 GHz y FSB de 1600 MHz
- 2 nodos con 4 Intel Xeon Quad-Core a 2,93 GHz y FSB a 1066 MHz
- 2 nodos con 2 Intel Xeon 5160 Dual-Core a 3.00 GHz y FSB a 1333 MHz
- Interconexión Infinibad 4X DDR2 de todos los nodos de cálculo
- Almacenamiento compartido Fiber Channel a 4 Gbp
- Acceso remoto a través de Internet.

Cluster para cálculo de alto rendimiento HPC160 de memoria distribuida:

- Sistema Operativo Tru64 Unix
- Gestor de Trabajos de usuario Torque/Maui
- 4 nodos con un total de 16 procesadores Alpha EV68CB a 1GHz
- 8 Mbytes de caché de nivel 2
- Interconexión Memory Channel de todos los nodos de cálculo
- 16 Gbytes de memsoria.
- 300 Gbytes de almacenamiento en disco accesible vía Fiber Channel.
- Acceso remoto a través de Internet.

Capítulo 4 Simulaciones

4.1. Introducción

Este apartado se va a enfocar en la descripción de los casos definidos computacionalmente, las condiciones de contorno seleccionadas y todo lo relacionado a las opciones de Fluent y parámetros fijados para la resolución numérica de los casos.

Se parte del archivo obtenido a partir del programa de ANSYS, Workbench 14; donde se crea tanto la geometría de la torre de refrigeración, como el mallado de la misma. Los archivos de la geometría mallada son creados como archivos '.msh' y son exportados a Fluent, donde se fijan los diferentes parámetros y variables para la mejor resolución del problema.

4.2. Parámetros de Fluent

Aquí debemos distinguir entre los dos tipos de simulaciones que se realizan en el proyecto: por un lado tenemos las simulaciones sin agua en régimen estacionario; y por otro lado tenemos las simulaciones con agua y en régimen transitorio.

Para el primer tipo debemos seleccionar la opción de régimen estacionario en la pestaña general, así como activar la gravedad y definirla con un valor de -9.81 m/s^2 en el eje Y. A continuación cambiamos el modelo viscoso de laminar al modelo de turbulencia '*Standard k-ε*', dejando las opciones por defecto. Para seguir, en la pestaña *Cell zone conditions* se define la zona porosa con un valor de porosidad de 0.8.

El siguiente punto son las condiciones de contorno, ya definidas en apartados anteriores. Cabe destacar que, en este primer tipo de simulación, la sección destinada a la entrada de agua a la torre se define con la condición de contorno tipo *wall* para evitar interferencias con el cálculo de la corriente de aire.

En el apartado de la solución se seleccionan los siguientes métodos de resolución: para el acoplamiento presión-velocidad se define el método SIMPLE; para el gradiente el método *Least Squares Cell Based*; para el de presión se fija el PRESTO!; el método *First order upwind* para el momento, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta.

Por su parte, los coeficientes de relajación se modifican con el fin de conseguir la convergencia de la solución. Los términos para densidad y *Body Forces* se establecen en 0.6 siguiendo el ejemplo de *Fang Gu* y otros en su artículo *CFD Simulation of Liquid Film Flow on Inclined Plates*. El coeficiente de relajación para el momento se fija en 0.4; se trata en este caso de un factor importante, ya que con valores más altos no se consigue la convergencia de la simulación.

Finalmente se procede a fijar el criterio de convergencia en $1 \cdot 10^{-5}$ para la continuidad. Este criterio se fija teniendo en cuenta los tiempos de cálculo necesarios y las variaciones en los valores de las variables objeto de estudio.

Una vez inicializado el caso se inicia el cálculo. Para los casos estacionarios no es necesario recurrir al superordenador del SAIT descrito anteriormente y se procede con las simulaciones en un ordenador personal común.

El otro tipo de simulación: el transitorio incorporando agua a la torre. Se diferencia del anterior en diversos aspectos: en primer lugar es necesario cambiar la selección de régimen estacionario a transitorio. A continuación se activa el modelo multifásico VOF, activando las opciones *Coupled Level Set*, *Body Force Formulation* y el esquema explícito. Todo esto se elige teniendo en cuenta la información procedente tanto de la guía teórica como la guía de usuario de Fluent. A través de diversas pruebas de simulación se fija el

número de Courant en 0.01, un valor óptimo para el proceso que nos permite una buena convergencia de las soluciones en todos los casos abordados posteriormente.

Además se deben definir las diferentes fases que intervienen en el problema: la fase primaria se reserva al fluido mayoritario en el problema, que en este caso es el aire; mientras que la fase secundaria es el agua. En la interacción entre ambas fases se debe fijar el valor para la tensión superficial, que para el problema que nos ocupa se puede definir en 0.072 N/m, dadas las condiciones de temperatura. Si bien la importancia de esta variable en el resultado final nos hace realizar un estudio sobre la influencia de la variable.

Estudio de la tensión superficial

Un mismo caso se resuelve con tres valores distintos de tensión superficial, como se puede ver en las siguientes figuras. Los valores experimentales de espesor de película se comparan con los tres casos con el fin de determinar el valor más apropiado para la tensión superficial.

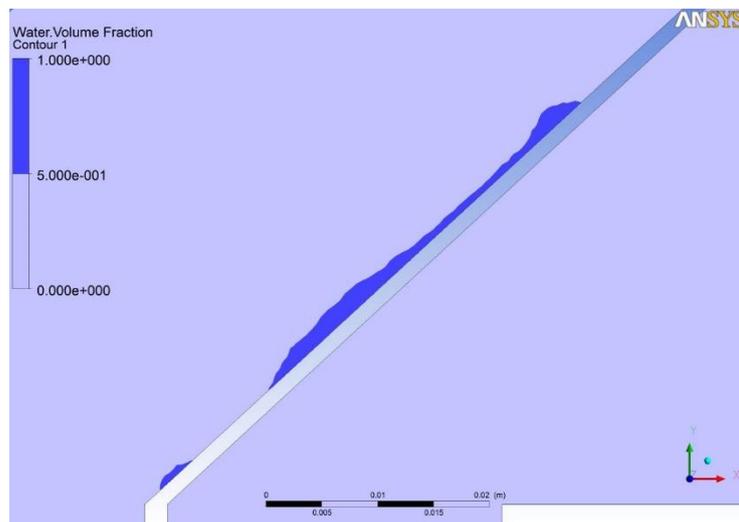


Figura 30. Película fluida para un valor de tensión superficial de 0.06 N/m

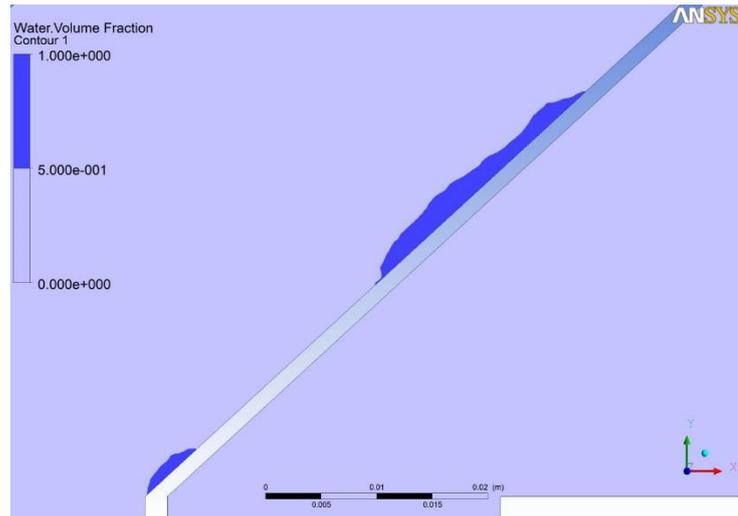


Figura 31. Película fluida para un valor de tensión superficial de 0.072 N/m

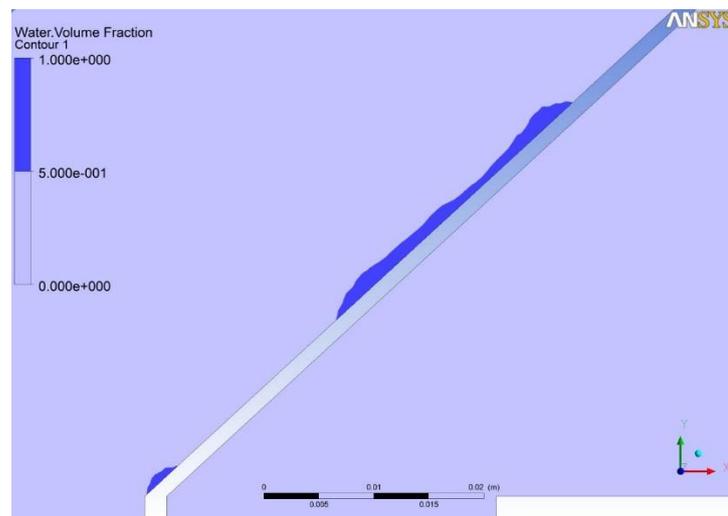
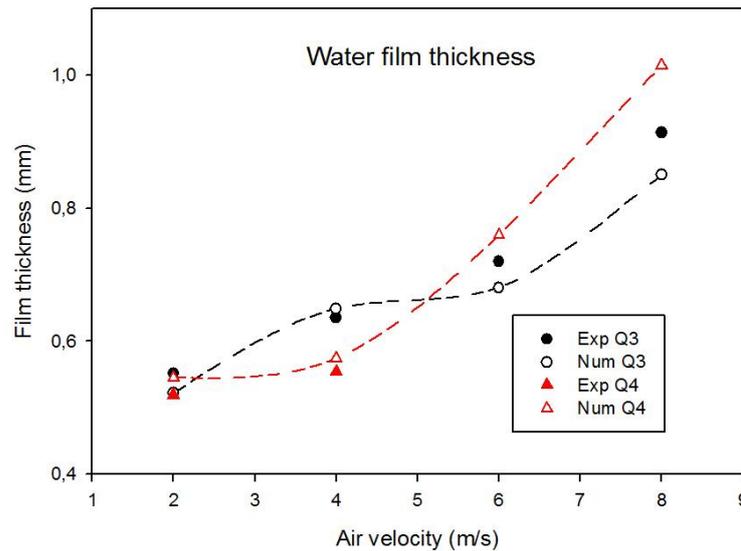


Figura 32. Película fluida para un valor de tensión superficial de 0.08 N/m

Finalmente se determina que el valor de tensión superficial de 0.06 N/m nos permite obtener mejores aproximaciones a los espesores de película experimentales como se puede ver en la gráfica:



Gráfica 1. Comparación entre valores experimentales y numéricos de espesor de película fluida

El siguiente cambio se produce en las condiciones de contorno, donde ahora se retira la condición tipo *wall* fijada anteriormente para la entrada de agua y se sitúa la de *velocity inlet* como se ha definido en apartados anteriores.

En los métodos de resolución se conserva todo lo anterior excepto el modelo para el acoplamiento presión-velocidad, que se sustituye por el PISO, más apropiado en el caso de flujo multifásico. Además aparece una nueva opción para la fracción volumétrica al activar el modelo multifásico; para esta variable se selecciona un modelo *Geo-reconstruct* que nos proporciona una buena precisión en la representación de la interfaz aire-agua en comparación con otros modelos, como nos indica la guía de usuario de Fluent.

Para los casos transitorios se procede el cálculo con un *time-step* variable, esto nos permite hacer unos pasos de tiempo mayores al menos en las primeras etapas del cálculo iterativo (cuando hay menos agua en la torre). Se comienza el cálculo con un valor de $8 \cdot 10^{-6}$ segundos y llega a un mínimo de $2 \cdot 10^{-6}$ segundos (el máximo posible que permite la convergencia de la solución). Se fija un máximo de 20 iteraciones por *time step* pero cada paso de tiempo consigue converger totalmente en menos de 10.

El refinamiento de malla adaptativo se establece en esta etapa. Se define con un método denominado *iso-value* para que todas las celdas que contengan un 0.3 de fracción volumétrica o más de agua se vean refinadas. Esta adaptación se realiza cada

20 *time step* para lo cual se activa la opción para la adaptación dinámica. El cuadro de diálogo para la caracterización del AMR puede verse en la siguiente figura.

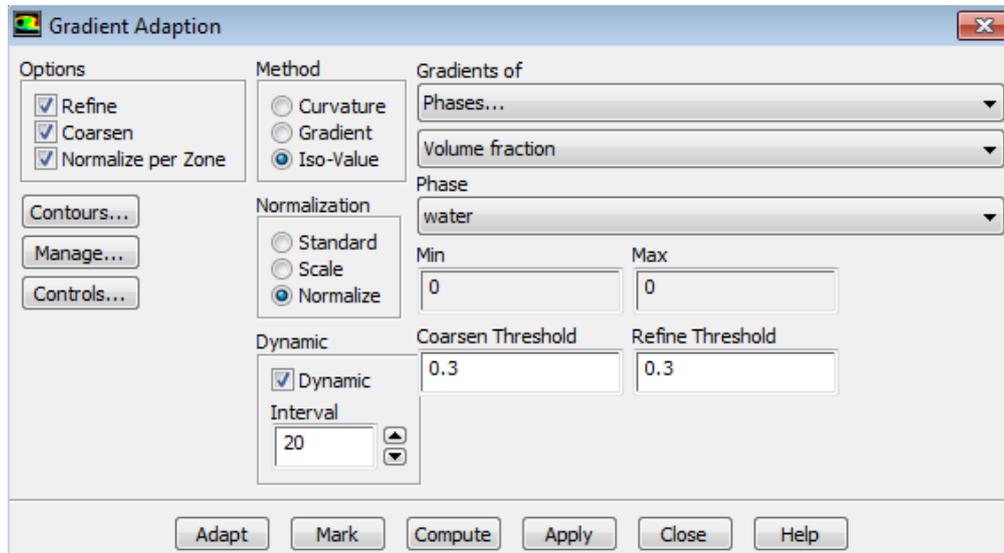


Figura 33. Cuadro de diálogo de Fluent para la activación y caracterización del Adaptive Mesh Refinement

Los requerimientos computacionales de este segundo tipo de simulación (transitoria multifásica) obligan a la utilización del superordenador definido en apartados anteriores. Los casos se envían a un servidor de este ordenador junto al archivo *journal* necesario para el proceso. Un archivo *journal* general es:

```

; Leer archivo con el .cas
rc 3D.cas.gz
; Leer archivo con los DATOS
rd 3D.dat.gz
solve dual-time-iterate
30000
20
; Salir de FLUENT
exit
yes

```

Donde los valores bajo el comando *solve dual-time-iterate* se refieren al número total de pasos de tiempo y al número máximo de iteraciones por paso de tiempo.

Para el post procesado de la solución se establece en Fluent que se guarde un archivo .cas con su correspondiente archivo .dat cada 3000 pasos de tiempo. Esto nos permite realizar los videos y también comparar distintas etapas de la simulación.

4.3. Planificación de las simulaciones

Las simulaciones a realizar en el proyecto se llevan a cabo de manera que posteriormente sea posible la comparación con distintos ensayos experimentales. Los ensayos experimentales de que se disponen datos son los correspondientes a un proyecto fin de carrera previo realizado por María Dolores Blanco en el mismo departamento de ingeniería térmica y de fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena que tiene por título 'Estudio experimental del desprendimiento de gotas de agua en el separador de una torre de refrigeración de tiro mecánico'.

Estos datos experimentales se corresponden a medidas de espesor de película de agua, de tamaño de gotas desprendidas, de velocidades de aire en el interior de la torre y de velocidades de aire límite para el desprendimiento de las películas de agua; y también se tienen los valores de velocidad de aire y caudal de agua necesarios para determinar las condiciones de contorno de las simulaciones numéricas.

4.3.1. Valores para las condiciones de contorno

Se realizaron ensayos experimentales para diferentes valores de velocidad de aire y caudal para estudiar los espesores que alcanza la película fluida que discurre por la placa del separador de gotas y además se midieron los tamaños de las gotas que se desprendían de dicha película por acción de la corriente cruzada de aire. Estos valores se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Velocidades de aire en la condición de contorno de las simulaciones numéricas para el estudio de los espesores de película

Valor de velocidad de aire en la condición de contorno
V1 = 2 m/s
V2 = 4 m/s
V3 = 6 m/s
V4 = 8 m/s

Tabla 2. Caudales de agua y velocidades correspondientes para los casos en 2D (1 m de ancho) y en 3D (5 cm de ancho)

Valores de caudal de agua en la condición de contorno	Valores de velocidad del agua en la salida por la placa para los casos 2D	Valores de velocidad del agua en la salida por la placa para los casos 3D
Q1 = 0.14 l/min	0.001166 m/s	0.023333 m/s
Q2 = 0.28 l/min	0.002333 m/s	0.046666 m/s
Q3 = 0.69 l/min	0.005750 m/s	0.115000 m/s
Q4 = 2.91 l/min	0.024250 m/s	0.485000 m/s

Estos valores de velocidad de aire en la entrada se eligen de manera que se consigan valores similares a los experimentales en la zona del canal. Y, por su parte, los valores de caudal de agua son los mismos que se emplearon en la instalación experimental; la conversión a velocidad lineal se debe a que, para la condición de contorno en el método VOF se debe emplear *velocity inlet* y para cada caso se convierte a velocidad teniendo en cuenta las dimensiones de la abertura por la que entra el agua a la torre.

Posteriormente se realizaron ensayos para los mismo caudales de los ensayos anteriores, pero el objetivo en esta ocasión es el de determinar las velocidades límite superior e inferior. Estas velocidades límite se definen como la mínima velocidad de aire que hace que parte del agua ascienda desde el borde inferior de los separadores de gotas (en el caso de la velocidad límite inferior) o que parte del agua siga ascendiendo desde el borde superior de la placa para salir de la torre por la base superior (en el caso de la velocidad límite superior).

Estos últimos ensayos se realizaron fijando un caudal de agua y variando la velocidad de aire proporcionada por el ventilador hasta conseguir el punto en el que el flujo de agua cambia. Computacionalmente se debe proceder a la inversa, esto es, primero se consigue la solución para una velocidad de aire y después se introduce el agua. Este punto hace que sea más compleja la obtención de esta velocidad límite con las simulaciones numéricas. Por ello se realizan estas simulaciones con velocidades de aire hasta conseguir una velocidad aproximada a la que nos dan los ensayos experimentales y, a partir de dicha velocidad se procede a iterar con agua para comprobar que se producen los mismos efectos de desprendimiento. En caso de que no se produzca desprendimiento se varía la velocidad de aire hasta que se produzca.

Simulaciones

Las primeras simulaciones realizadas consistían en el flujo de aire en el interior de la torre; con ellas se pretendía reproducir el campo de presiones y velocidades en el interior de la torre. Estas se hicieron para los cuatro diferentes valores de velocidad de aire.

Las simulaciones llevadas a cabo para la validación de los espesores de película fueron, para cada una de las cuatro velocidades de aire y los caudales Q3 y Q4, todo esto en 2D. Un total de 8 casos distintos para la posterior comparación con los resultados experimentales recogidos en la tabla 3. Estos resultados se mostrarán en el siguiente capítulo.

Tabla 3. Distintos casos numéricos realizados para la validación de los espesores de película

Simulaciones para espesores de película			
V1-Q3	V2-Q3	V3-Q3	V4-Q3
V1-Q4	V2-Q4	V3-Q4	V4-Q4

Finalmente se realizaron las simulaciones para determinar velocidades límite sobre los caudales Q3 y Q4. Estas simulaciones se realizaron también en 3D para una más completa validación. El hecho de no utilizar en las simulaciones los caudales Q1 y Q2 es debido a la gran cantidad de tiempo de cálculo necesario para llegar a ver esos resultados; la escasa velocidad que lleva el agua en estos casos incrementa el tiempo necesario para que el agua llegue a las zonas críticas.

Capítulo 5 Validación del modelo numérico

5.1. Introducción

El proceso de validación de los resultados numéricos consiste en la comparación de dichos resultados con los datos obtenidos mediante los ensayos sobre el modelo experimental cuyo comportamiento se desea reproducir. Para llevar esto a cabo se procede en ambos modelos, experimental y numérico, con idénticas condiciones de contorno y se estudian posteriormente las variables determinantes en el comportamiento que se desea evaluar.

En este capítulo se procede a la validación del comportamiento de los flujos de aire y agua en el interior de la torre de refrigeración para el modelo numérico mediante la comparación de los resultados obtenidos para las variables características de este problema: las velocidades de aire en la sección de ensayo de la torre, alrededor de los separadores de gotas y los espesores de la película fluida sobre las placas del separador. Además de comparar los valores de dichas variables también se realiza una comparación de las curvas de tendencia de estas variables para una mejor validación del modelo numérico.

5.2. Velocidades de aire

Se tiene datos experimentales medidos en la zona del canal formado entre los separadores de gotas; estas medidas se realizan a tres alturas diferentes dentro del mencionado canal: una primera altura situada en el borde inferior de los separadores; una segunda altura en el ángulo recto formado por las placas y la última altura la que marcan los bordes superiores de los separadores.

Al no tener valores experimentales en la sección de entrada de aire debido a que haría falta un instrumental intrusivo que perjudicaría bastante el posterior desarrollo del flujo, se realiza la validación de estas velocidades mediante la prueba en diversos ensayos variando la condición de contorno en dicha entrada de aire hasta que se consiguen unos valores óptimos.

En las siguientes figuras se muestran las gráficas de velocidad en su componente vertical, que es la que se mide experimentalmente con el anemómetro de hilo caliente. En estas gráficas se va a superponer el perfil de velocidades que se obtiene de la simulación con el que se tiene de los ensayos previos. También se muestra en la primera figura los puntos de la zona del canal donde se ha medido la velocidad en ambos casos.

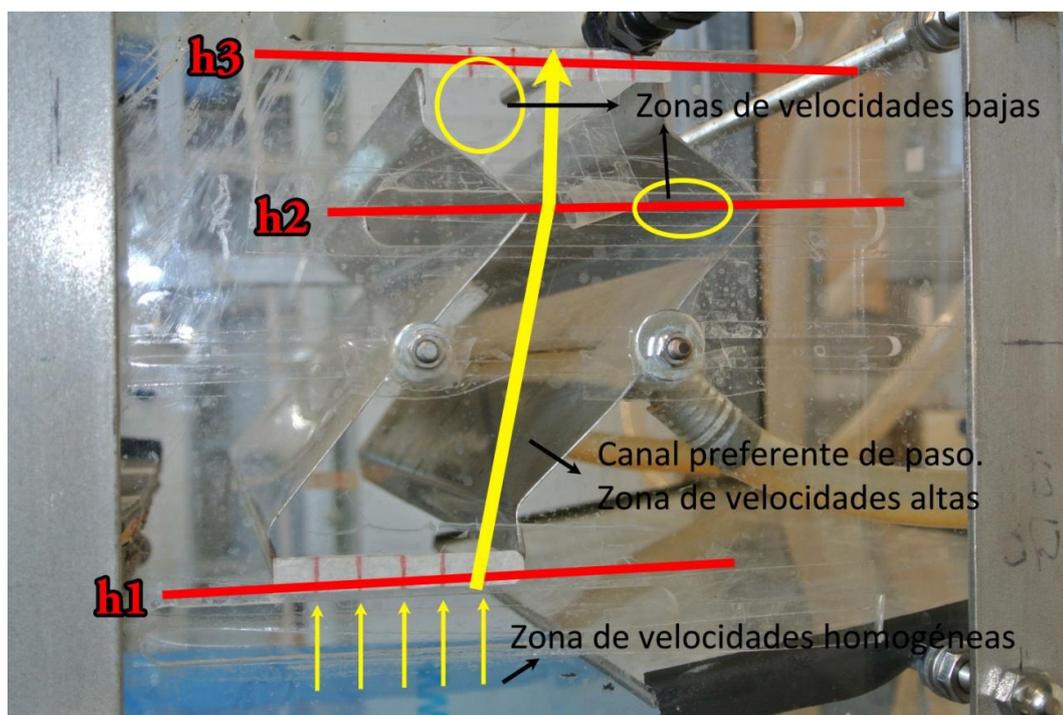
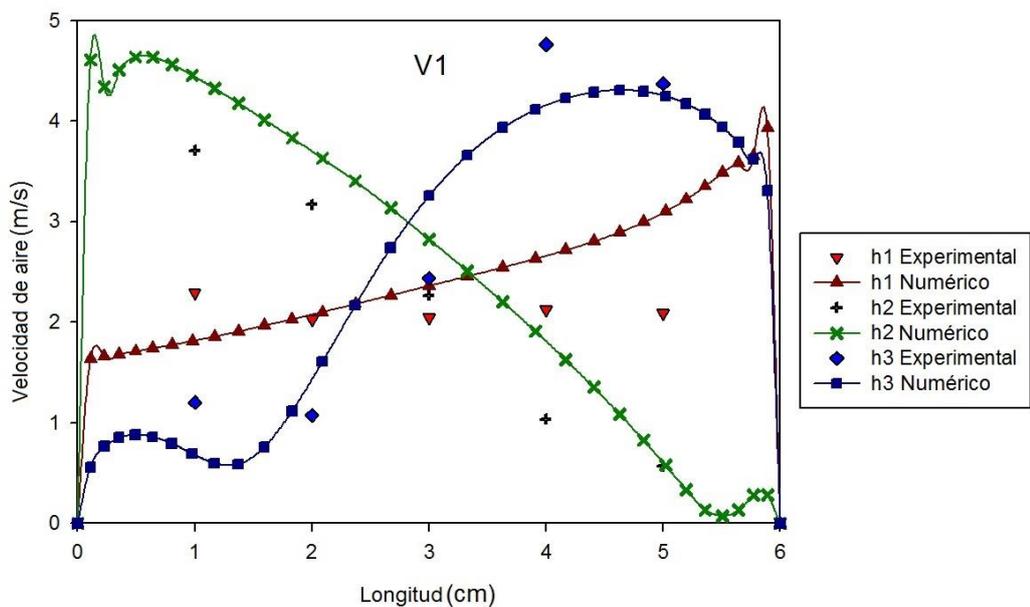
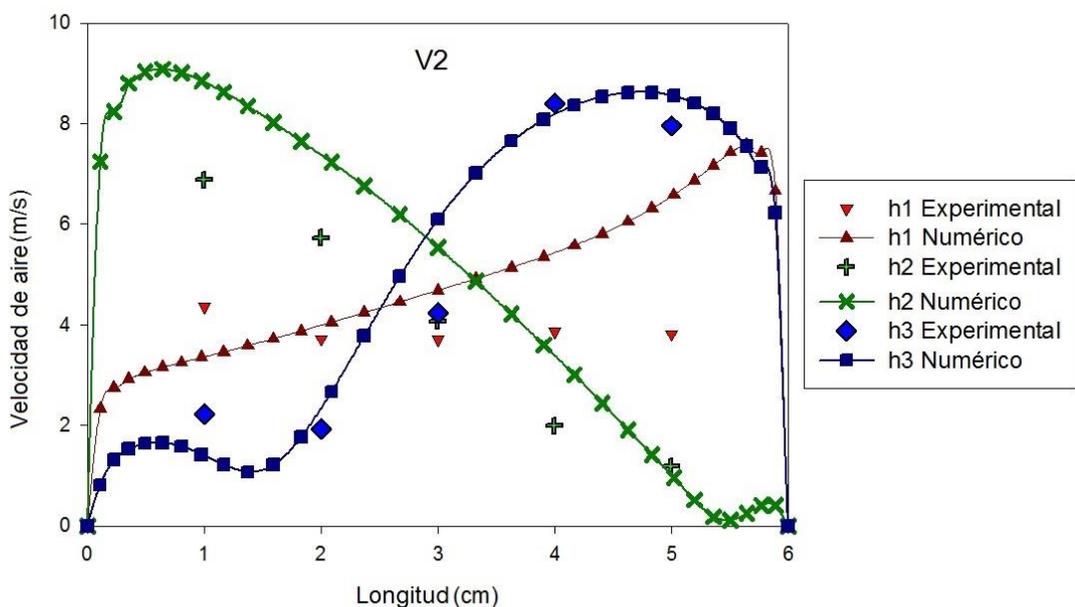


Figura 34. Canal de paso donde se han marcado las diferentes alturas a las que se realizan medidas de velocidad de aire

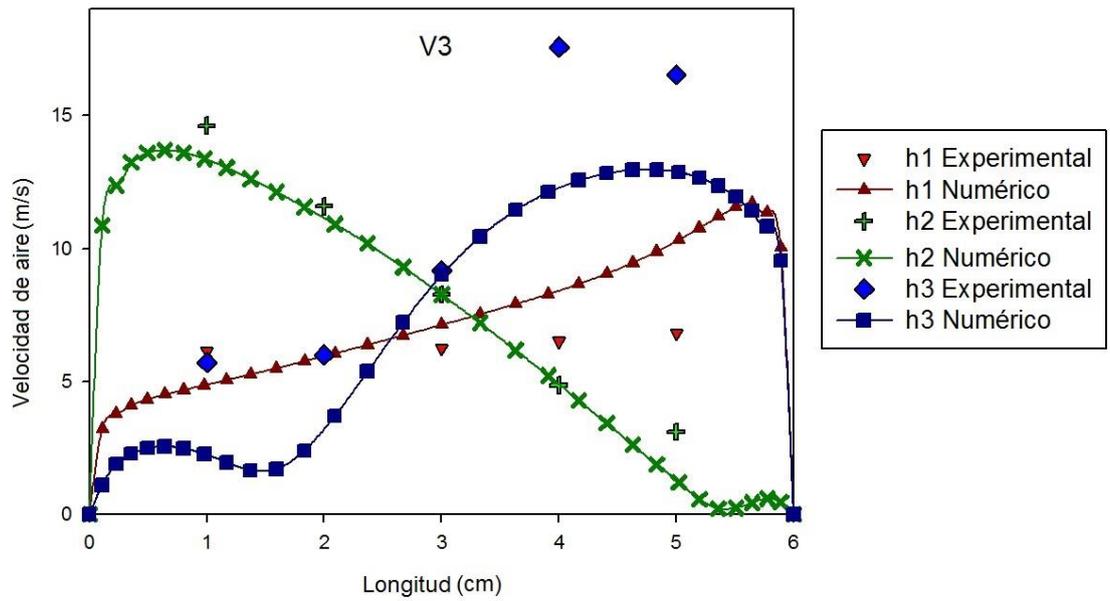
Las velocidades de aire se miden en cada una de las alturas h1, h2 y h3 (marcadas en rojo en la figura). Como la separación entre las placas es de 6 cm, se toman 5 medidas cada centímetro para abarcar toda la zona de paso.



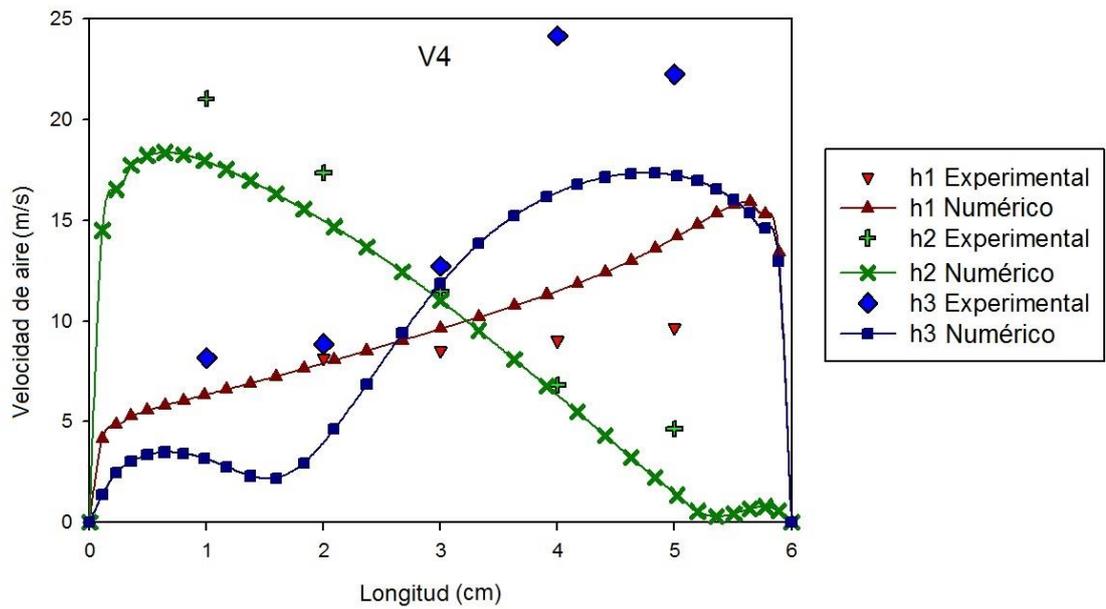
Gráfica 2. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V1



Gráfica 3. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V2



Gráfica 4. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V3



Gráfica 5. Perfil de velocidades en las 3 alturas dentro del canal tanto en numérico como experimental para la velocidad de aire V4

Estas gráficas nos dan la validación del modelo en cuanto a velocidades de aire. Nos encontramos con un error máximo en el valor del 20 %, que a priori parece elevado, pero hay que tener en cuenta, además de las imprecisiones del modelo, la componente aleatoria de los flujos turbulentos y los errores en la medida de los instrumentos empleados. A parte de eso, la tendencia se conserva en casi todos los casos (en la altura h1 nos encontramos una ligera variación en la tendencia debido al relleno poroso de la torre) y, lo que es más importante, se consigue reproducir fielmente el canal de paso preferente, las zonas de velocidad alta son muy similares experimental y numéricamente.

5.3. Espesores de película

A partir de los datos de espesores obtenidos de los ensayos experimentales se pasa a la validación del modelo multifásico. Los resultados experimentales se tomaron mediante la captura de imágenes y su posterior procesado. La cámara empleada para tales medidas se define en la siguiente tabla de características. Y el software empleado para la medición es el *Image Pro-plus*, mediante el cual se procesan las imágenes para conseguir estas mediciones. Estas imágenes fueron siempre tomadas en el mismo punto, situado en una de las placas como se ve en las imágenes.

Cámara de alta velocidad

La cámara empleada para la captura de imágenes tanto de la película fluida (para la medición de su espesor), como del desprendimiento de gotas en el borde de la placa es el modelo *MotionBlitz EoSens* mini de la marca *MIKROTRON*. Se trata de una cámara de alta velocidad controlada mediante ordenador que nos permite la toma de fotos y vídeos.

El ajuste de la resolución a emplear en cada problema es de especial importancia debido a que se debe encontrar un equilibrio entre el tamaño de la zona donde se desea tomar la imagen y los fotogramas por segundo con que permite grabar la cámara para cada resolución. En la figura siguiente se explica esta cuestión:

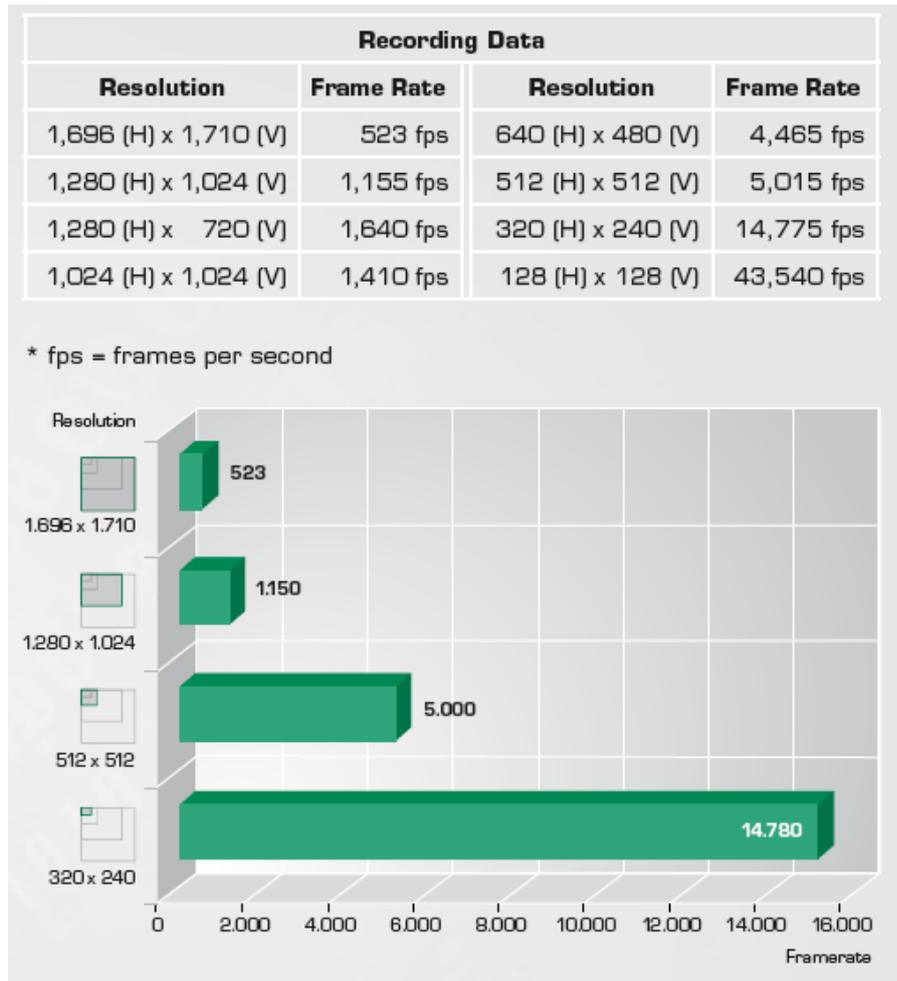


Figura 35. Características de la cámara en lo referido a velocidad de captura frente a resolución

Se observa que la velocidad de captura se ve reducida drásticamente al aumentar el tamaño de la imagen. A la hora de la medición de los espesores de película no es tan preocupante este problema ya que no es necesaria la grabación de vídeo. No ocurre lo mismo en los casos donde se desea observar el desprendimiento de gotas, que se explicará en el punto correspondiente.

A continuación se presentan algunos ejemplos de imágenes tomadas para la medición de la película fluida en los ensayos experimentales.



Figura 36. Imagen de la película fluida sobre la placa



Figura 37. Imagen de la película fluida sobre la placa



Figura 38. Imagen de la película fluida sobre la placa

Por la parte de las simulaciones numéricas cabe destacar la complejidad del modelo multifásico para conseguir unos resultados apropiados para la validación del modelo. A continuación se presentan algunas imágenes procedentes del postprocesado de las simulaciones, estas imágenes son tratadas mediante el mismo software y los datos extraídos son posteriormente comparados con los datos de que se disponía.

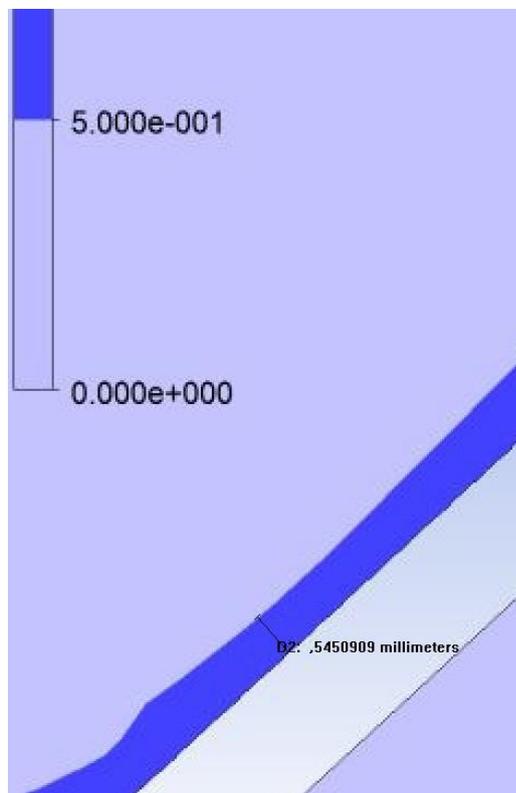


Figura 39. Espesor de película medido numérico

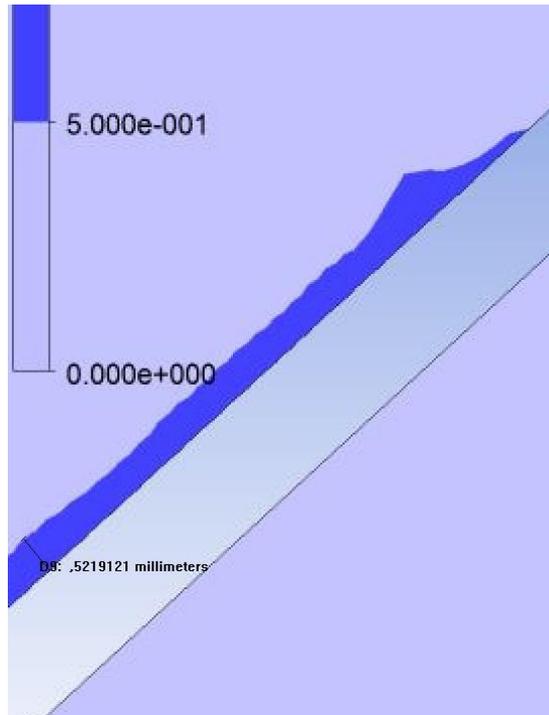
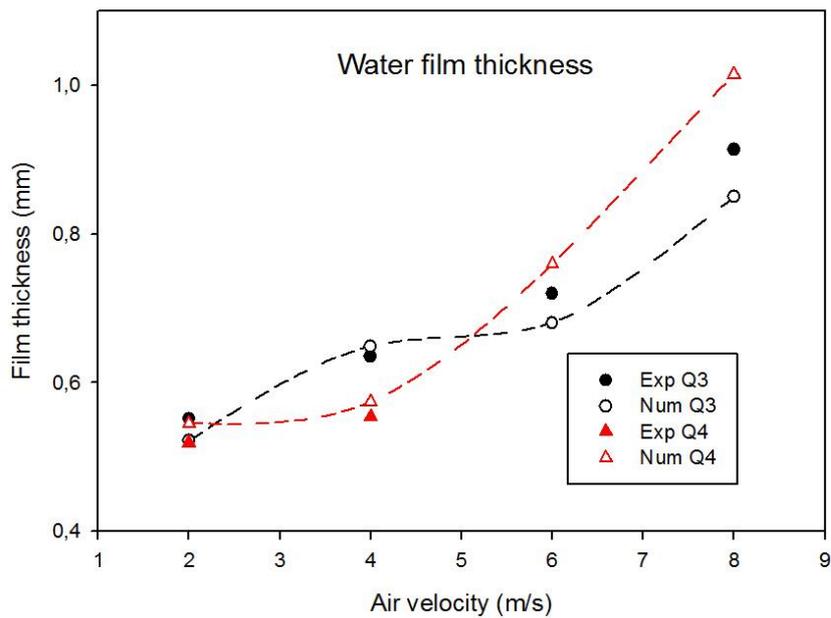


Figura 40. Espesor de película medido numérico

La comparación de ambos casos se presenta como una gráfica de velocidad de aire frente a espesor de película para un caudal de agua determinado.



Gráfica 6. Comparativa de espesores experimentales y numéricos

Se observa una buena tendencia de las soluciones, así como un error de menos del 10 % en el valor. En algunos casos experimentales como el de Q4 para las velocidades altas V3 y V4, no se ha podido obtener un valor de espesor de película debido a la gran cantidad de gotas de agua presentes en la torre que dificultan la visión y la toma de imágenes.

5.4. Tamaño de gotas

El último de los puntos determinantes en la validación del modelo numérico trata sobre el tamaño de las gotas que se desprenden de la película fluida por el arrastre de la corriente de aire. Para este caso especial no basta con las simulaciones bidimensionales para su resolución, ya que en estas simulaciones no se forman gotas (que son siempre tridimensionales) sino cilindros que, al verlos en dos dimensiones podrían confundirse con gotas de agua.

Para abordar este problema contamos con mediciones de gotas realizadas previamente en la instalación experimental ya descrita. El cómo se procedió a medir estas gotas se contesta de igual manera que en el caso de la película de agua, con la ayuda de la cámara situada en este caso de tal manera que se pueden captar las gotas que salen del canal tanto por el borde superior como por el inferior. Ejemplos de estas imágenes se muestran a continuación.



Figura 41. Gotas desprendidas desde el borde inferior de la placa



Figura 42. Gotas desprendidas del borde superior de la placa

Para este caso no contamos más que con dos casos tridimensionales debido a los grandes requerimientos de tiempos de cálculo ya mencionados. En las siguientes figuras se muestran imágenes de estos casos en tres dimensiones y de gotas procesadas para medir su diámetro.

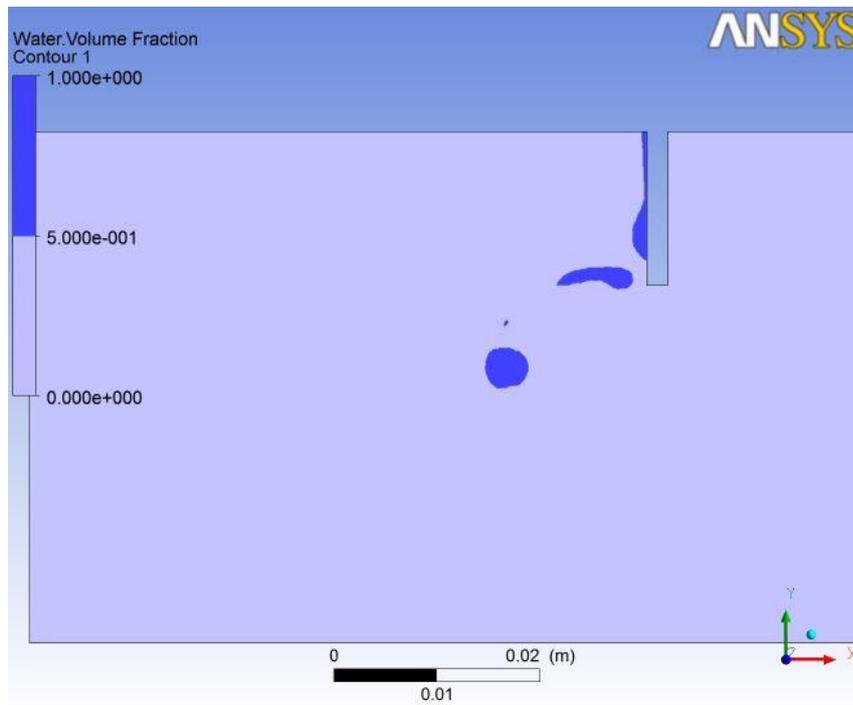


Figura 43. Gotas numéricas desprendidas del borde inferior en 2D

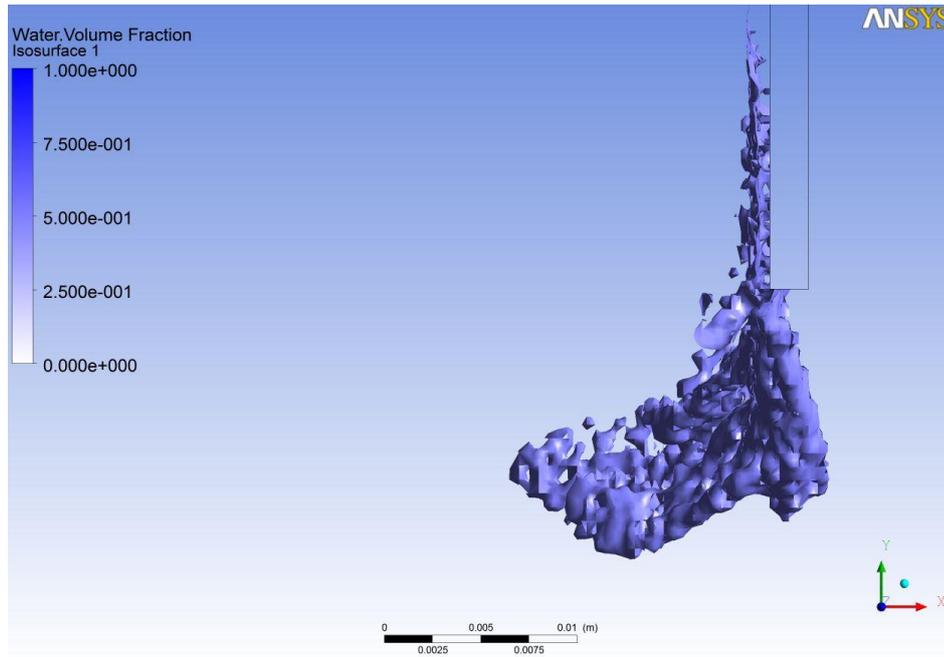


Figura 44. Gotas en el borde inferior de la placa en 3D

En la siguiente tabla se muestran comparaciones de tamaños de gota para los caudales simulados.

Tabla 4. Diámetro de gota medio en mm para gotas en el borde inferior de la placa.

***Complicado medir una sola gota. **Gran coste computacional**

		Q1	Q2	Q3	Q4
V1	Experimental	6,39	6,75	7,16	*
	Numérico	5	6	11	16
V2	Experimental	8,24	8,93	9,36	9,56
	Numérico	**	**	10	16

Tabla 5. Diámetro de gota medio en mm para gotas en el borde superior de la placa.

***Complicado medir una sola gota**

		Q1	Q2	Q3	Q4
V3	Experimental	1,96	4,1	4,29	4,29
V4	Experimental	*	3,31	3,01	2,94

Los resultados de tamaño de gota se muestran para diferentes velocidades de aire en función de si se trata del borde inferior o el superior de la placa. Para el borde inferior

se muestran las velocidades de aire V1 y V2; estas velocidades son las más bajas ensayadas y permiten que el agua descienda al borde inferior más rápidamente. De igual manera ocurre en el borde superior de las placas, donde las velocidades de aire más altas, V3 y V4, son las que propician que el agua llegue a esa zona en menos tiempo.

5.5. Conclusiones sobre la validación

Se ha realizado la validación del modelo atendiendo a tres variables: la velocidad de aire en el canal formado por los separadores, el espesor de la película fluida sobre la placa del separador y los tamaños de las gotas que se desprenden de los separadores.

En primer lugar, analizando los resultados de velocidad de aire observábamos que se consiguen reproducir con cierta precisión los perfiles de velocidad en el canal, exceptuando el caso de la altura h_1 . También se consigue gran precisión en los valores en muchos casos, en otros casos hay algún error siempre inferior al 20 %. El otro aspecto importante que se consigue reproducir es el canal de paso preferente, que se ve bien reflejado en los resultados numéricos.

Sobre los espesores de película también se logran buenos resultados numéricos con errores por debajo del 10 % en los casos estudiados, además de las buenas tendencias que se consiguen.

De igual manera se han conseguido reproducir las gotas que se desprenden de los separadores de gotas a pesar de las grandes dificultades que surgen debido a la arbitrariedad de la formación de gotas. Observamos en las tablas comparativas que el orden de magnitud se mantiene en todas las comparaciones de tamaños de gota medios.

Capítulo 6 Presentación de resultados y conclusiones

6.1. Introducción

Una vez superado el paso de la validación del modelo numérico es necesaria una presentación de los resultados más relevantes en el presente proyecto desde el punto de vista comercial. Se trata de resultados acerca de la caracterización del comportamiento de los separadores de gotas instalados en la torre de refrigeración; y no son otros que las velocidades límite inferior y superior para cada caudal, que nos van a determinar los fenómenos de arrastre que se producen en el interior de la torre.

Estos resultados van a definir el principal objetivo del proyecto: el de determinar un punto de funcionamiento para el caudal de agua requerido por el proceso en el que se sitúe la torre de refrigeración. Este punto de funcionamiento debe guardar un equilibrio entre la máxima eficiencia posible y el evitar la fuga de gotas al exterior de dicha torre.

La presentación de resultados se va a realizar comparando los ensayos experimentales y las simulaciones numéricas. En cierto modo este apartado también cuenta como validación del modelo numérico además de aportar la principal solución del problema. Los resultados de simulaciones numéricas que se presentan en este apartado serán tanto de dos como de tres dimensiones, siendo estas últimas las más relevantes debido a la importante influencia de los fenómenos tridimensionales que rigen el problema como son los efectos de la turbulencia o la formación de gotas (que no se forman en dos dimensiones).

6.2. Velocidades límite

Se presentan ahora los resultados sobre las velocidades límite. Para conseguir estos resultados se han realizado simulaciones para dos caudales distintos ($Q_3 = 0.67$ l/min y $Q_4 = 2.91$ l/min) y se ha determinado la velocidad de aire necesaria para que el flujo de agua comienza a ascender en el interior de la torre. La geometría definida para estas simulaciones consiste en una pequeña región del dominio como se puede ver en las figuras.

En cada zona definida (1, 2 y 3) se introducen las condiciones de contorno teniendo en cuenta la simulación con la torre completa, y se sitúa una entrada de agua en el lugar por donde llega la película fluida. Esto es necesario para agilizar las simulaciones y obtener valores más precisos para todas las variables relevantes.

Al reducir de esta manera el dominio a estudiar, y por tanto el número de elementos del mallado, conseguimos poder añadir un grado más de refinamiento al emplear el AMR (Adaptive Mesh Refinement), pasando de 2 a 3, sin ver perjudicado el tiempo de simulación.

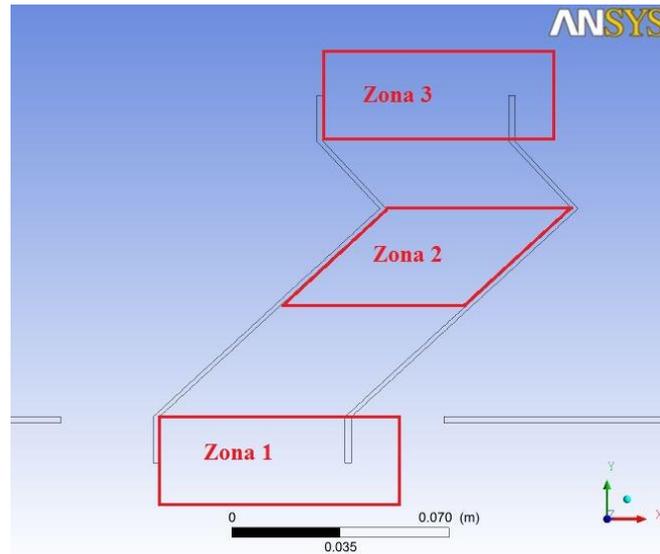


Figura 45. Localización de las zonas 1, 2 y 3 del canal

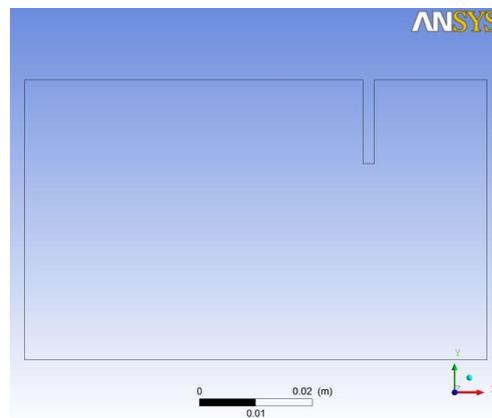


Figura 46. Zona 1: Parte inferior de los separadores de gotas

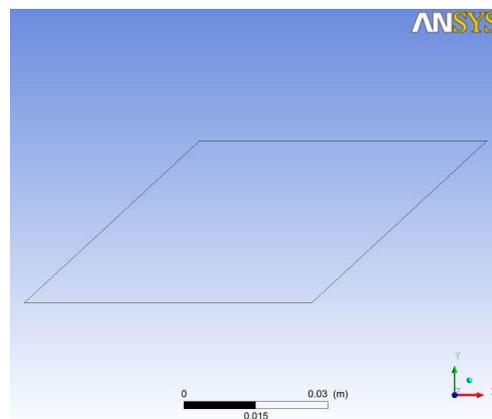


Figura 47. Zona 2: Parte media del canal

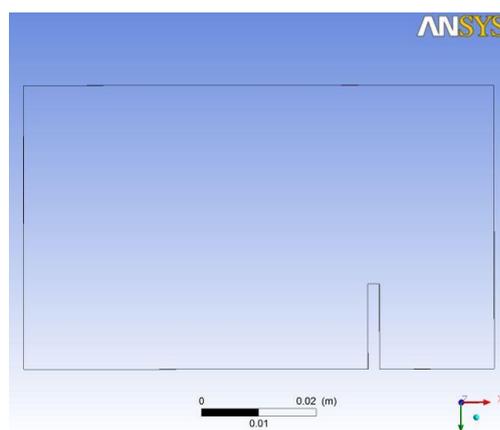


Figura 48. Zona 3: Parte superior de los separadores de gotas

Se procedió, para determinar la velocidad límite, estableciendo una condición de contorno de velocidad de aire en la entrada tal que se consiguieran las mismas condiciones que en el caso con la torre completa en cuanto a dirección y sentido de la corriente de aire. Posteriormente se comienzan una serie de simulaciones hasta conseguir acotar el valor para el cual el agua asciende.

En las siguientes figuras podemos observar una serie de fotogramas de los vídeos obtenidos en el postprocesado de los datos en los que se observa el fenómeno de arrastre descrito.

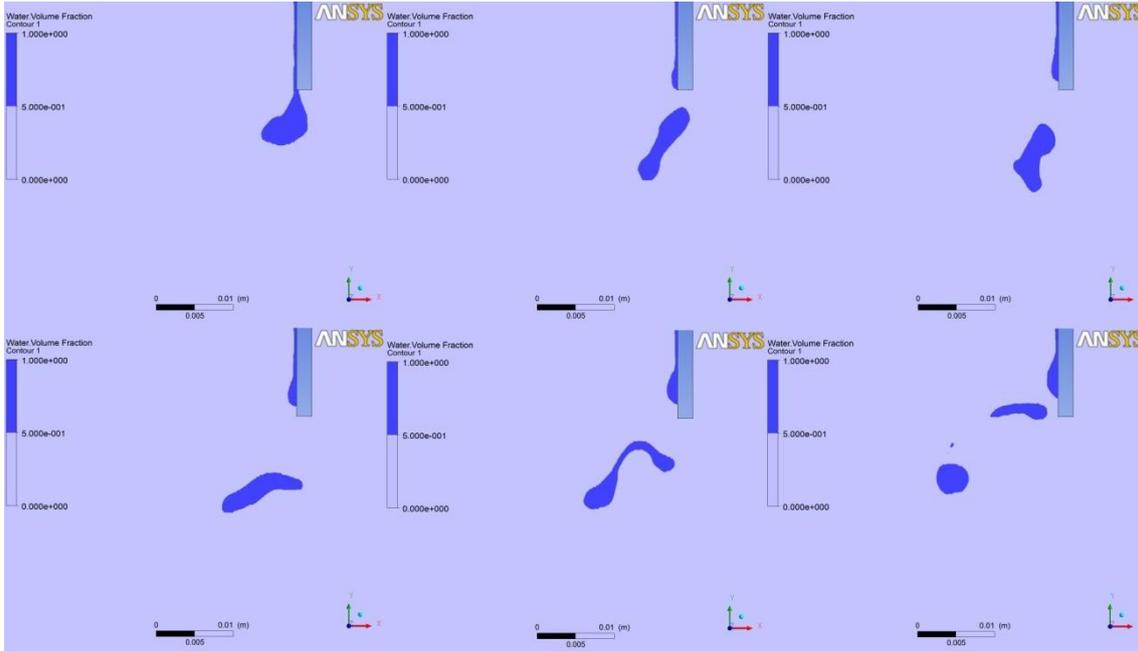


Figura 49. Secuencia del arrastre de gotas en la zona 1 para el caudal Q4

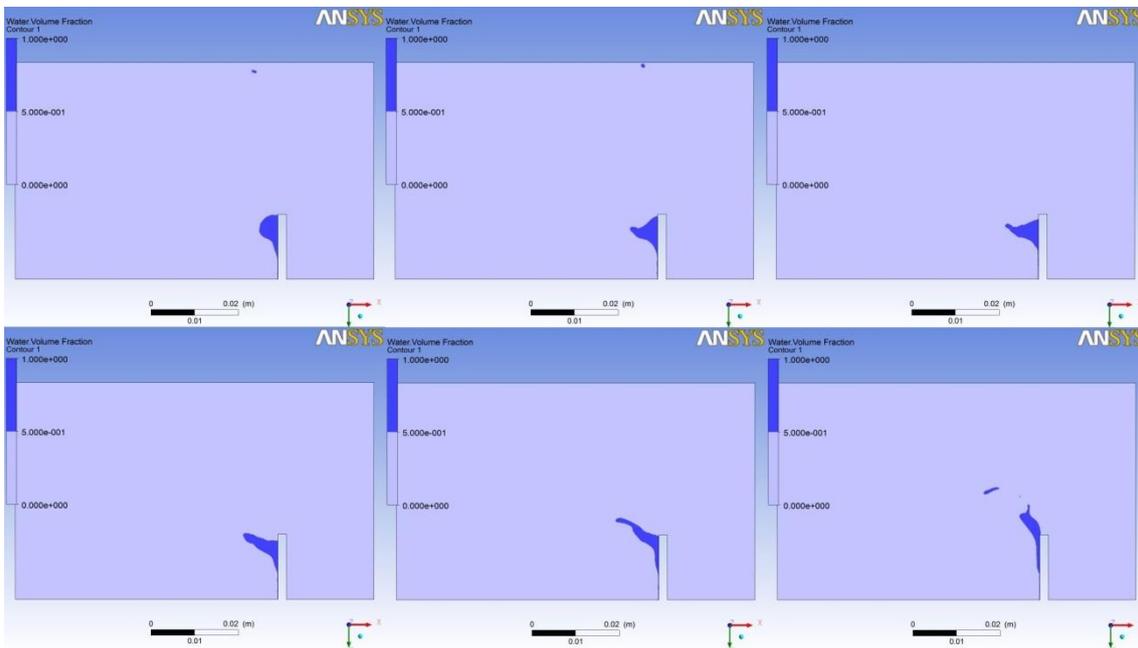


Figura 50. Secuencia del arrastre de gotas en la zona 3 para el caudal Q4

Y en la siguiente tabla se recogen las velocidades de aire límite que se obtienen para los caudales Q3 y Q4 comparadas con los datos experimentales. Se puede observar un pequeño error menor del 10 % en las medidas, lo que nos conduce a una confirmación de la validez del modelo para el propósito que nos ocupa.

Tabla 6. Comparación entre velocidad límite numérica y experimental

	Velocidad límite en zona 1		Velocidad límite en zona 3	
	Experimental	Numérica	Experimental	Numérica
Q4	4.34	4.75	11.30	10.73
Q3	4.34	4.88	12.50	12.63

Se observa una tendencia, por la cual, valores más altos de caudal de agua requieren menores velocidades de aire para que se produzca el desprendimiento. Esto parece ser debido a que un caudal de agua mayor ocasiona un espesor de película mayor, la superficie de esta película, al estar más alejada de la placa tiene una mayor facilidad para ser arrastrada por la corriente de aire.

6.3. Conclusiones generales

El modelo numérico ha sido validado con los ensayos experimentales y se han presentados resultados sobre las velocidades de aire límite que marcan las zonas de operación de los separadores de gotas estudiados.

Con estos resultados se determina que el separador de gotas puede ser fuente de gotas bajo ciertas condiciones y atendiendo a las películas de agua que se pueden formar sobre las placas de los separadores. Con estos últimos resultados se pueden observar límites de funcionamiento para la torre de refrigeración con el fin de evitar la formación de gotas con origen en los propios separadores de gotas y no las generadas al inyectar el agua en dicha torre.

Bibliografía

- [1] Arienti, M., Wang, L., Corn, M., Li, X., Soteriu, M.C., Shedd, T.A., Herrmann, M. (2010, junio). *Modelling wall film formation and breakup using an integrated interface-tracking/discrete-phase approach*. Ponencia presentada en el ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, Glasgow, UK
- [2] Azzopardi, B.J., Sanallah, K.S. (2002). Re-entrainment in wave-plate mist eliminators. *Chemical Engineering Science*, 57, 3557-3563
- [3] Blanco, M.D. (2013). *Estudio experimental del desprendimiento de gotas de agua en el separador de una torre de refrigeración de tiro mecánico*. Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniería Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.
- [4] Consuegro, A.J. (2010). *Modelización numérica y validación experimental de la deposición de gotas de agua de una torre de refrigeración de tiro mecánico en un entorno urbano*. Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniería Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.
- [5] FLUENT INC. "Fluent 14 Users Guide".
- [6] FLUENT INC. "Fluent 14 Theory Guide".
- [7] Galletti, C., Brunazzi, E., Tognotti, L. (2008). A numerical model for gas flow and droplet motion in wave drainage channels. *Chemical Engineering Science*, 63, 5639-5652.
- [8] James, P.W., Wang, Y., Azzopardi, B.J., Hughes J.P. (2003). The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators. *Chemical Engineering Research and Design*, 81, 639-648.
- [9] James, P.W., Azzopardi, B.J., Wang, Y., Hughes, J.P. (2005). A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*, 83, 469-477.
- [10] Lan, H., Friedrich, M., Armaly, B.F. (2008). Simulation and measurement of 3D shear-driven thin liquid film in a duct. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29, 449-459.
- [11] Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (1995) *An introduction to Computational Fluid Dynamics*. Essex: Pearson.
- [12] VIEDMA, A., "Mecánica de Fluidos Aplicada", Dpto. Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Politécnica de Cartagena.

[13] Zamora, B., Kaiser, A.S. (2012). Simulación numérica del flujo turbulento de aire con gotas dispersas de agua a través de separadores de torres de refrigeración. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28, 148-160.