

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL
ARRASTRE EMITIDO POR UNA
TORRE DE REFRIGERACIÓN
EQUIPADA CON UN SEPARADOR DE
LAMAS SINUSOIDAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre -2023

AUTOR: Jorge Durá Mota

DIRECTOR: Javier Ruiz Ramírez

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS.....	I
LISTADO DE TABLAS.....	III
LISTADO DE FIGURAS.....	IV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.1.1 Torres de refrigeración.....	4
1.1.2 Legionelosis.....	7
1.2 Antecedentes.....	9
1.3 Objetivos.....	11
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	13
2.1 Introducción.....	13
2.2 Descripción de la instalación.....	14
2.2.1 Componentes.....	14
2.2.2 Instrumentos de medida.....	18
2.2.3 Estación meteorológica.....	22
2.2.4 Sistema de adquisición de datos.....	23
2.3 Métodos de medida de arrastre.....	25
2.3.1 Método seleccionado para realizar la medición de arrastre.....	33
2.4 Ensayos de arrastre con el método del papel hidrosensible.....	34
2.4.1 Papel hidrosensible.....	34
2.4.2 Realización de ensayos.....	36
2.4.3 Procesado digital de las imágenes.....	42
2.4.4 Cálculo del arrastre.....	45
2.4.4.1 Factor de aplastamiento.....	45
2.4.4.2 Eficiencia de captura.....	46
2.4.4.3 Cálculo del arrastre.....	49

2.5 Introducción de la información al software DRIFT®	51
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.....	55
3.1 Introducción	55
3.2 Resultados de los ensayos	56
3.2.1 Ensayo velocidad 25 Hz	56
3.2.2 Ensayo velocidad 37,5 Hz	68
3.2.2 Ensayo velocidad 50 Hz	80
3.2 Discusión	93
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	97
CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA.....	99



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del aire en los puntos del diagrama psicrométrico	3
Tabla 2. Condiciones nominales de la torre de refrigeración Intercal	15
Tabla 3. Características técnicas ventilador axial Siemens	16
Tabla 4. Características técnicas bomba hidráulica Grundfos	17
Tabla 5. Características técnicas caudalímetro Micronics	19
Tabla 6. Características técnicas anemómetro TESTO	21
Tabla 7. Características técnicas anemómetro Young	23
Tabla 8. Características técnicas veleta Young	23
Tabla 11. Técnicas de referencia según normativa de los países.	25
Tabla 12. Datos y resultados de la 1a prueba a 25 Hz	57
Tabla 13. Datos y resultados de la 2a prueba a 25 Hz	59
Tabla 14. Datos y resultados de la 3a prueba a 25 Hz	61
Tabla 15. Datos y resultados de la 4a prueba a 25 Hz	63
Tabla 16. Datos y resultados de la 5a prueba a 25 Hz	65
Tabla 17. Resultados finales del ensayo a 25 Hz	68
Tabla 18. Datos y resultados de la 1a prueba a 37,5 Hz	69
Tabla 19. Datos y resultados de la 2a prueba a 37,5 Hz	71
Tabla 20. Datos y resultados de la 3a prueba a 37,5 Hz	73
Tabla 21. Datos y resultados de la 4a prueba a 37,5 Hz	75
Tabla 22. Datos y resultados de la 5a prueba a 37,5 Hz	77
Tabla 23. Resultados finales del ensayo a 37,5 Hz	80
Tabla 24. Datos y resultados de la 1a prueba a 50 Hz	81
Tabla 25. Datos y resultados de la 2a prueba a 50 Hz	83
Tabla 26. Datos y resultados de la 3a prueba a 50 Hz	85
Tabla 27. Datos y resultados de la 4a prueba a 50 Hz	87
Tabla 28. Datos y resultados de la 5a prueba a 50 Hz	89
Tabla 27. Resultados finales del ensayo a 50 Hz	92
Tabla 28. Valores medios del arrastre en cada ensayo	93
Tabla 29. Resultados finales de arrastre	95

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama psicrométrico torre húmeda vs torre seca.....	2
Figura 2. Esquema de torre de refrigeración.....	5
Figura 3. Cadena epidemiológica.....	8
Figura 4. Torre de refrigeración de la instalación.....	14
Figura 5. Sistema de distribución por presión.....	15
Figura 6. Ventilador de la instalación Siemens.....	16
Figura 7. Variador de frecuencia Toshiba.....	16
Figura 8. Válvula de equilibrado Tur Andersen.....	17
Figura 9. Separador de gotas con lamas sinusoidal.....	18
Figura 10. Caudalímetro Micronics LTD.....	19
Figura 11. Termoresistencia PT - 100 (RTD).....	20
Figura 12. Anemómetro TESTO.....	21
Figura 13. Sensor de humedad relativa y temperatura Young.....	21
Figura 14. Estación meteorológica.....	22
Figura 15. Sistema de adquisición de datos Keysight.....	23
Figura 16. Multiplexor HP34901A.....	24
Figura 17. Clasificación de las técnicas de medición de arrastre (Solano Fernández, Martínez Beltrán, Viedma Robles, & Lucas Miralles, 2003).....	26
Figura 18. Técnica del papel hidrosensible o lámina recubierta.....	27
Figura 19. Esquema separador ciclónico (Bellon Hernandez & Benitez Ramirez, 2013).....	28
Figura 20. Aparato de condensación.....	30
Figura 21. Técnica fotografía del arrastre.....	33
Figura 22. Papel hidrosensible 76 x 52 mm.....	35
Figura 23. Sectorización sección de salida efectiva.....	36
Figura 24. Varilla para colocación de papeles hidrosensibles.....	37
Figura 25. Cabezal para colocación de las varillas.....	38
Figura 26. Detección de manchas por el software DRIFT®.....	43
Figura 27. Gota, gota múltiple y no gota.....	44
Figura 28. Clasificador (árbol de decisión J48).....	44
Figura 29. Matriz de confusión del clasificador.....	45
Figura 30. Curva de aplastamiento (modelo Teejet 52 x 72 mm).....	46

Figura 31. Eficiencia de captura del papel hidrosensible (Ruiz Ramírez J. , 2014)	47
Figura 32. Curva de eficiencia de captura experimental para bandas (May & Clifford, 1967).....	49
Figura 33. Interfaz del software DRIFT®	51
Figura 34. Parámetros avanzados	51
Figura 35. Información del ensayo	52
Figura 36. Información de cada papel	52
Figura 37. Insertar imagen de los papeles en DRIFT®	53
Figura 38. Papeles hidrosensibles de la 1a prueba a 25 Hz	58
Figura 39. Papeles hidrosensibles de la 2a prueba a 25 Hz	60
Figura 40. Papeles hidrosensibles de la 3a prueba a 25 Hz	62
Figura 41. Papeles hidrosensibles de la 4a prueba a 25 Hz	64
Figura 42. Papeles hidrosensibles de la 5a prueba a 25 Hz	66
Figura 43. Variación del arrastre medido en cada papel a 25 Hz.....	67
Figura 44. Variación de la velocidad medido en cada papel a 25 Hz	67
Figura 45. Gráfica de arrastre del ensayo a 25 Hz.....	68
Figura 46. Papeles hidrosensibles de la 1a prueba a 37,5 Hz	70
Figura 47. Papeles hidrosensibles de la 2a prueba a 37,5 Hz	72
Figura 48. Papeles hidrosensibles de la 3a prueba a 37,5 Hz	74
Figura 49. Papeles hidrosensibles de la 4a prueba a 37,5Hz	76
Figura 50. Papeles hidrosensibles de la 5a prueba a 37,5 Hz	78
Figura 51. Variación del arrastre medido en cada papel a 37,5 Hz	79
Figura 52. Variación de la velocidad medido en cada papel a 37,5 Hz	79
Figura 53. Gráfica de arrastre del ensayo a 37,5 Hz.....	80
Figura 54. Papeles hidrosensibles de la 1a prueba a 50 Hz	82
Figura 55. Papeles hidrosensibles de la 2a prueba a 50 Hz	84
Figura 56. Papeles hidrosensibles de la 3a prueba a 50 Hz	86
Figura 57. Papeles hidrosensibles de la 4a prueba a 50 Hz	88
Figura 58. Papeles hidrosensibles de la 5a prueba a 50 Hz	90
Figura 59. Variación del arrastre medido en cada papel a 50 Hz.....	91
Figura 60. Variación de la velocidad medido en cada papel a 50 Hz	91
Figura 61. Gráfica de arrastre del ensayo a 50 Hz.....	92

Figura 62. Gráfico de arrastre porcentual frente a velocidad de aire (Ruiz
Ramírez J. , 2014)..... 94
Figura 63. Gráfica de arrastre frente a velocidad del ventilador 95



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Hoy en día, los sistemas de refrigeración son prácticamente indispensables en una amplia variedad de usos y aplicaciones, desde dispositivos electrónicos como, móviles y ordenadores, hasta para la generación de energía eléctrica en ciclos de potencia. La función principal de estos sistemas es disipar el calor generado hacia el entorno. No obstante, según las condiciones de trabajo (el clima, el entorno, el medio ambiente, etc.) habrá unos sistemas más adecuados que otros.

Cuando hablamos de sistemas que requieren una alta capacidad de disipar el calor, la elección dependerá en gran medida de su eficiencia. Para determinar cuál es la opción más adecuada, es necesario comprender el funcionamiento de los dos principales medios de disipación del calor: por aire y por agua, descritos por Ruiz Ramírez y otros (2012).

En el proceso de enfriamiento por aire, requiere de una diferencia de temperaturas entre el aire y el objeto o fluido a enfriar, siendo más eficiente a mayor diferencia de temperaturas. Esto se debe a que solo ocurre transferencia de calor sensible, lo que implica que el aire al salir tendrá una temperatura más elevada, pero no experimentará cambios en la humedad específica.

En el proceso de enfriamiento por agua, utilizando el enfriamiento evaporativo, es necesario que haya un contacto directo entre un flujo de agua y una corriente de aire. La transferencia de calor se produce, en una pequeña parte, debido al calor sensible y, en su mayor parte, debido al calor latente. Este último se produce cuando una pequeña parte del agua se evapora, absorbiendo la energía

de la masa de agua restante e incorporándose a la corriente de aire. Por lo tanto, se produce un intercambio tanto de masa como de energía entre el flujo de agua y de aire.

Una vez se ha comprendido el funcionamiento de los diferentes sistemas de disipación de calor, se puede utilizar un diagrama psicrométrico para demostrar físicamente qué proceso es más eficiente.

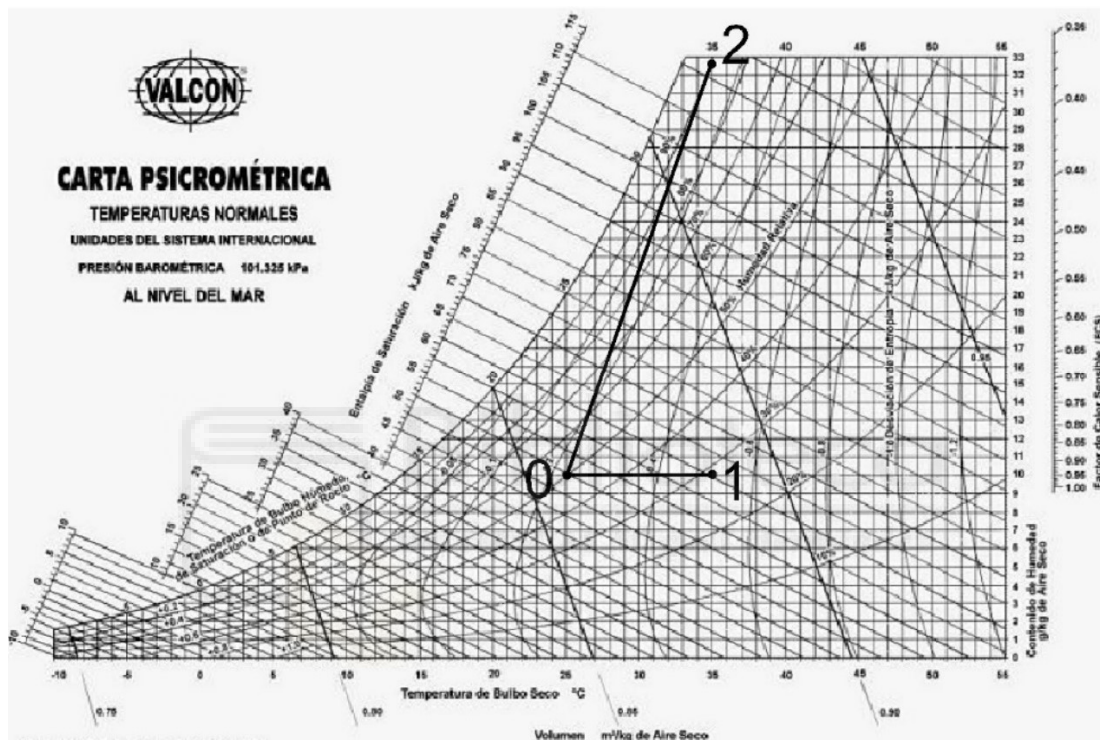


Figura 1. Diagrama psicrométrico torre húmeda vs torre seca

En la Figura 1 se puede observar un diagrama psicrométrico que permite visualizar la relación entre las diferentes propiedades del aire (la humedad, la temperatura, la entalpía). En el diagrama se encuentran dos procesos:

- Proceso enfriamiento por aire (Punto 0 → Punto 1): Se produce un incremento de la temperatura, pero no aumenta la humedad específica.
- Proceso enfriamiento por agua o evaporativo (Punto 0 → Punto 2): Se produce un incremento tanto de temperatura como de humedad específica.

En la Tabla 1 se muestra las propiedades del aire en los diferentes puntos señalados en el diagrama.

	Temperatura (°C)	Humedad específica (g agua /kg aire seco)	Entalpía (kJ/kg aire seco)
Punto 0	25	10	50
Punto 1	35	10	60
Punto 2	35	32,5	117

Tabla 1. Propiedades del aire en los puntos del diagrama psicrométrico

Como se puede observar en este ejemplo, en un enfriamiento por aire, la capacidad de disipación de calor es de 10 kJ/ kg de aire seco. En cambio, en el enfriamiento evaporativo, la capacidad de disipación de calor aumenta a 67 kJ/ kg de aire seco, con una transferencia de calor sensible y latente al aire del 15% y 85%, respectivamente. Para lograr la misma potencia con el enfriamiento por aire, sería necesario aumentar el flujo de aire alrededor de 7 veces más que en el enfriamiento evaporativo.

Cuando nos referimos a torre de refrigeración para ciclos de potencia, no hay duda de que el enfriamiento por evaporación permite un mayor ahorro energético y, por tanto, económico. Además, debido a que permite una presión de descarga menor en la entrada de las turbinas, los ciclos de potencia son más eficientes, mejorando alrededor del 6% y 7%. Asimismo, presentan un menor coste de inversión en comparación con las torres de aire, que oscila entre el 1,2% y el 2,2% , según lo descrito por Queremel & Alfonso (2001).

Sin embargo, debido a preocupaciones ambientales y de salud pública, la decisión entre torres de refrigeración o aerorefrigeradores se ha vuelto cada vez más compleja. A pesar de que las torres de refrigeración que emplean el enfriamiento por evaporación son más eficientes, el consumo de recursos hídricos y los brotes ocasionales de legionelosis plantean dudas sobre su elección.

1.1.1 Torres de refrigeración

Las torres de refrigeración son dispositivos mecánicos utilizados para enfriar masas de agua que necesitan disipar calor. Su uso está vinculado a la climatización de edificios, procesos industriales o centrales eléctricas, entre otros muchos.

En el pasado, las industrias solían ubicarse en las proximidades de ríos y lagos, aprovechando la conveniencia de acceder a grandes cantidades de agua para sus procesos productivos. Sin embargo, al devolver el agua utilizada como refrigerante en los procesos industriales a estos cuerpos de agua, alteraban ciertos parámetros que tenían un impacto negativo en el entorno. Las torres de refrigeración se desarrollaron para ser capaces de reutilizar el agua utilizada como refrigerante.

Según su funcionamiento, las torres se pueden clasificar en tres grupos:

- Torre húmeda: La disipación del calor se realiza mediante enfriamiento evaporativo (con contacto directo entre agua y aire).
- Torre seca: La disipación del calor se realiza mediante enfriamiento por aire (sin contacto directo entre agua y aire).
- Torre híbrida: Combina el funcionamiento de ambas torres mencionadas anteriormente.

Además, según cómo se induzca la corriente de aire a través de la torre, se pueden diferenciar como:

- Tiro natural: El flujo de aire se genera sin utilizar ningún elemento mecánico, sino que se induce debido a la diferencia de densidades entre el aire frío (más denso) y el aire caliente (menos denso).
- Tiro mecánico: Para generar el flujo de aire, se utilizan elementos mecánicos (ventiladores). En las torres de tipo inducido, el ventilador se sitúa en la descarga (parte superior). En cambio, en las torres de tipo forzado, el ventilador se coloca en la entrada de aire (parte inferior).

Por último, según la dirección de las corrientes de aire y de agua en el interior de la torre se puede diferenciar:

- Flujo contracorriente: El flujo de aire se desplaza verticalmente hacia arriba a través de la torre, en sentido contrario al flujo descendente del agua.
- Flujo cruzado: El flujo de aire se desplaza perpendicularmente al flujo de agua descendente.

En la Figura 2, se muestra un esquema de la torre de refrigeración utilizada en los ensayos. Se trata de una torre húmeda de tiro mecánico (tipo forzado) con flujo contracorriente.

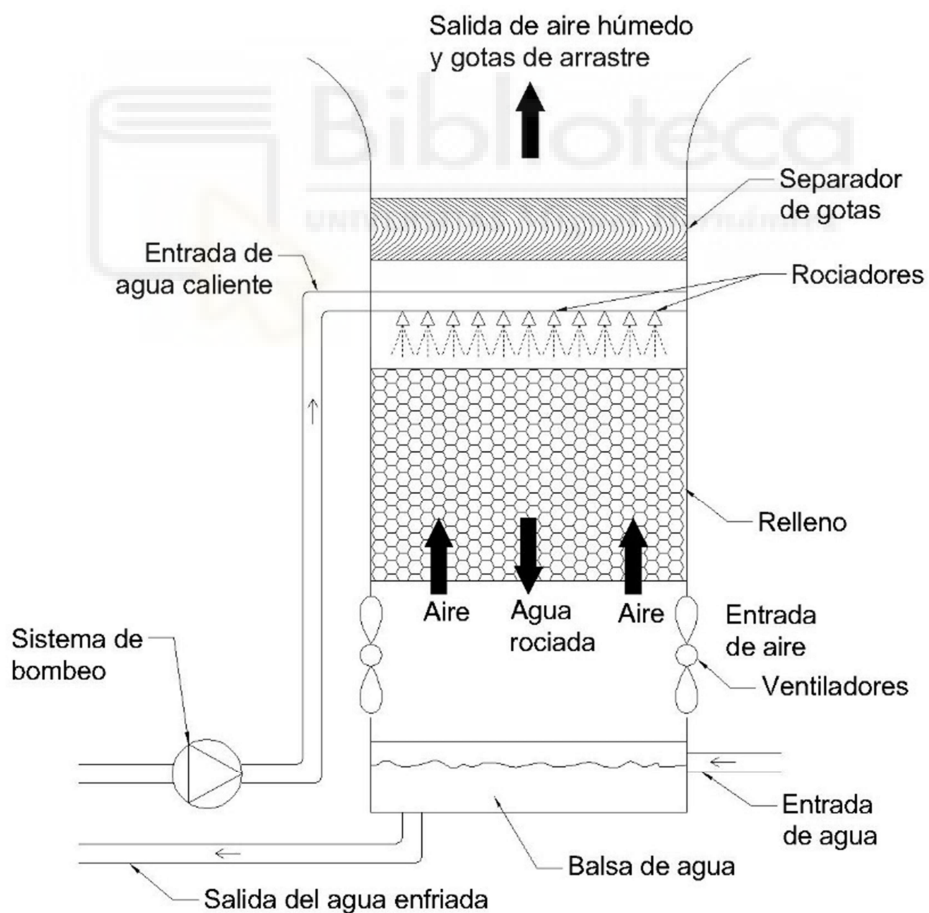


Figura 2. Esquema de torre de refrigeración

El funcionamiento de esta torre inicia con las bombas hidráulicas, las cuales impulsan el agua, recién salida del condensador, hacia los rociadores. El agua cae en pequeñas gotas a través de la torre hasta llegar al relleno. Al mismo tiempo, el aire ingresa por la parte inferior de la torre, con ayuda de ventiladores (tipo forzado). Es en el relleno donde aumenta la superficie de contacto entre el agua rociada y el aire ascendente, lo que permite una transferencia de calor más eficiente a través del enfriamiento evaporativo anteriormente mencionado. Por último, el agua enfriada cae a la balsa y el aire caliente y húmedo sale por la parte superior de la torre. Durante el proceso, es posible que pequeñas gotas sean arrastradas por la corriente de aire, y si el separador de gotas no es capaz de capturarlas, a este fenómeno se le conoce como emisión de arrastre.

Los principales problemas derivados de estas emisiones ya fueron descritos por Aynsley & Carson (1973) y Pedersen, Lamkin & Seich (1987):

- Pérdida de recursos utilizados en el proceso, como agua o energía, lo que puede ser ineficiente y costoso.
- Efectos perjudiciales en el entorno, la vegetación y la vida silvestre si no se controlan adecuadamente.
- Posible corrosión en las instalaciones cercanas.
- Posibilidad del transporte de sustancias nocivas y patógenos que pueden afectar a la salud de las personas.

Sin embargo, el estudio sobre la propagación de patógenos ha recibido considerable atención. La bacteria Legionela ha sido identificada como el agente responsable de brotes de legionelosis, como el ocurrido en Murcia con 449 casos confirmados y una tasa de letalidad del 1,1% observado en el estudio de García-Fulgueiras, y otros (2003). Con el fin de prevenir la repetición de incidentes de esta magnitud, se han establecido normativas cada vez más rigurosas. El Real Decreto 865/2003, emitido el 4 de julio, señaló a las torres de refrigeración, junto con otros sistemas como los acumuladores de agua caliente sanitaria o las piscinas climatizadas, como instalaciones con alta probabilidad de propagación y multiplicación de la bacteria. En este decreto se estableció la obligatoriedad de

contar con separadores de gotas con una eficiencia que permitiera un arrastre inferior al 0,05% del agua circulada.

Posteriormente, el 21 de junio de 2022, se produjo una actualización en el Real Decreto 487/2022, elevando la eficiencia mínima de los separadores de gotas a un arrastre del 0,002% del agua circulada.

1.1.2 Legionelosis

La legionelosis es una enfermedad causada por la bacteria Legionela. Esta infección bacteriana se puede presentar como una enfermedad febril sin afectación pulmonar, denominada 'fiebre de Pontiac' o una más severa, con desarrollo de neumonía, denominada 'enfermedad del legionario'.

La Legionela vive en aguas estancadas con un rango amplio de temperaturas, y es con 35°C cuando alcanza la temperatura óptima para su reproducción. A pesar de contar con más de 60 especies de Legionela, no son muchas las capaces de infectar a un ser humano. Entre ellas encontramos Legionella longbeachae, Legionella micdadei o Legionella pneumophila, siendo la mayoría de los casos graves producidos por esta última, Escobar Villalobos (2021).

Para que se produzca un brote de legionelosis en una torre de refrigeración, es necesario que varios factores y condiciones se alineen de una manera que permita la proliferación de la bacteria. Conociéndolos, podemos ser capaces de evitar su desarrollo y contagio:

- Es necesario que haya una vía de entrada de la bacteria a la instalación.
- Falta de una limpieza adecuada, que den unos factores proclives a la multiplicación de las bacterias. La materia orgánica es fundamental para su desarrollo.
- Emisión de aerosoles que contengan a la bacteria y la introduzca en el aire.
- Inhalación de estos aerosoles por personas susceptibles a desarrollar la enfermedad.



Figura 3. Cadena epidemiológica

Para prevenir brotes de legionelosis, el Real Decreto 487/2022 incorpora medidas preventivas para evitar la proliferación de la bacteria:

- Colocar las torres de refrigeración en lugares donde se reduzca el riesgo de exposición de los aerosoles con personas, sistemas acondicionados o de ventilación, tanto propios como adyacentes.
- Diseñar los sistemas favoreciendo su accesibilidad para tareas de limpieza, mantenimiento, revisiones o toma de muestras.
- Establecer puntos de muestreo para realizar análisis fisicoquímicos, microbiológicos y de desinfectante, siempre ubicados lo más alejados posible de las tomas de agua.
- Garantizar la existencia de suficientes puntos de purga para vaciar completamente la instalación y que estén dimensionados para permitir la eliminación de los sedimentos acumulados.
- Incorporar sistemas separadores de gotas de alta eficiencia, cuyo caudal de agua arrastrado sea menor al 0,002% del caudal de agua circulante.
- En caso de utilizar biocidas, deberán disponer de sistemas automáticos de dosificación para garantizar una desinfección efectiva.

El objetivo de estas medidas preventivas es actuar en la mayor cantidad de eslabones de la cadena epidemiológica (ver Figura 3). De esta manera, se busca prevenir que las personas contraigan la enfermedad, incluso si alguna de las medidas no resulta efectiva, ya que existirá otra que pueda reducir el riesgo de contagio.

1.2 Antecedentes

Este trabajo se encuentra vinculado con el grupo de investigación del área de Máquinas y Motores Térmicos del departamento de Ingeniería Mecánica y Energíá, quienes han desarrollado una línea de investigación relacionada con la eficiencia y emisión de arrastre en torres de refrigeración.

El primer trabajo realizado fue la Tesis Doctoral “Caracterización experimental del arrastre en torres de refrigeración” de Manuel Lucas Miralles (2009). Se llevó a cabo por la necesidad de caracterizar el arrastre emitido desde torres de refrigeración, debido a las implicaciones medioambientales que conlleva. Se utilizaron dos métodos para el cálculo del arrastre, el balance químico y el papel hidrosensible, obteniendo resultados similares. También se estudió el impacto que provoca la utilización de separadores de gotas, evidenciando la influencia en los coeficientes de transferencia de masa y energía, y no sólo en el flujo másico de aire. Finalmente, se desarrolló un modelo numérico para la simulación de la dispersión y deposición del arrastre.

Posteriormente, Javier Ruiz Ramírez continuó con la publicación de su Tesis Doctoral “Caracterización experimental y modelización del binomio sistema de distribución-separador de gotas en torres de refrigeración” (2014). Este estudio muestra la influencia en el comportamiento térmico y la emisión y dispersión de arrastre en función del sistema de distribución y separador de gotas utilizados.

En el presente trabajo se aplicarán los conocimientos adquiridos para el desarrollo de actividades de apoyo a empresas. Algunos de los trabajos ya realizados han sido:

- Ensayo de medida de arrastre en equipos de enfriadores secos y adiabáticos para Baltimore Aircoil Ibérica S.A (2006).
- Ensayo de medida de arrastre para un separador de gotas en fase de desarrollo para la empresa Control y Ventilación (2008).
- Ensayo de medida de arrastre para la empresa Enercom para un sistema llamado “techo solar” (2010).

- Ensayo de medida de arrastre para comprobar el cumplimiento del Real Decreto 865/2003 en un separador de gotas de la empresa Insnor (2012).

Este último trabajo podemos encontrarlo en “Análisis experimental de la emisión de arrastre en una torre de refrigeración para un separador comercial con sistema de distribución por presión” redactado por Ana María Berthón Acebal (2012).



1.3 Objetivos

El objetivo del presente proyecto es determinar, mediante un análisis experimental, si el separador de gotas de lamas sinusoidal instalado en la torre de refrigeración, cumple con el Real Decreto 487/2022. La normativa establece que la emisión de arrastre no puede ser mayor al 0,002% del caudal circulante en la torre de refrigeración, con el fin de evitar la dispersión de aerosoles que puedan contener la bacteria Legionela y provocar contagios.

Para realizar los ensayos, se ha utilizado la torre de refrigeración situada en la cubierta del edificio Torrepinet, en la Universidad Miguel Hernández de Elche. Se han realizado tres ensayos con diferentes frecuencias en el ventilador, a 25 Hz, 37,5 Hz y 50 Hz. Para comprobar la correcta realización del ensayo y poder verificar la repetitividad en los resultados, se han realizado cinco pruebas en cada ensayo.

El método utilizado para calcular la emisión de arrastre de la torre de refrigeración ha sido los papeles hidrosensibles. Con la ayuda del software DRIFT® se ha realizado el procesado de los papeles y obtenido los resultados de arrastre, para finalmente, verificar si se encuentra dentro de los parámetros de la legislación actual.



CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Introducción

En este capítulo 'Metodología', se presenta la instalación donde se han realizado los ensayos, mostrando los componentes de la misma y los instrumentos utilizados para la obtención de datos. También se explican los diferentes métodos utilizados para medir el arrastre y cuál de ellos ha sido escogido para realizar este estudio. Por último, se explica la forma de calcular el arrastre a partir de la información proporcionada por los papeles hidrosensibles.



2.2 Descripción de la instalación

La ubicación de la instalación donde se llevaron a cabo los ensayos de arrastre se encuentra en la cubierta del edificio Torrepinet, en la Universidad Miguel Hernández, en la ciudad de Elche.



Figura 4. Torre de refrigeración de la instalación

Se trata de una torre de refrigeración (ver Figura 4) empleada para el estudio experimental de comportamientos térmicos y para la caracterización del arrastre.

2.2.1 Componentes

A continuación, se detallan las características de los componentes que forman la torre de refrigeración:

La torre, de la marca Intercal (modelo P1-M1/3R3-3B3). Se trata de una torre comercial de tiro forzado con flujo contracorriente. La carcasa está fabricada con resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio. Las características técnicas y condiciones nominales de funcionamiento se pueden observar en la Tabla 2.

Dimensiones	760 x 525 x 2597 mm
Potencia nominal	30 kW
Caudal de agua	5,2 m ³ /h
Salto térmico	5°C
Temperatura de agua caliente	35°C
Temperatura de agua fría	30°C
Temperatura de bulbo húmedo	27°C
Potencia ventilador axial	0,55 kW

Tabla 2. Condiciones nominales de la torre de refrigeración Intercal

En el interior se encuentra el relleno, que consiste en un material plástico con una forma similar a un panel de abeja. En la parte superior se encuentra el sistema de distribución (ver Figura 5). En este estudio, se ha sido utilizado el modelo “por presión”, donde unos rociadores son los responsables de pulverizar el agua hacia el relleno. También existe el modelo “por gravedad”, donde se deja caer una fina lámina de agua al relleno. Este sistema “por gravedad” produce menos arrastre, sin embargo, la potencia de disipación de calor disminuye considerablemente, Ruiz Ramírez, y otros (2012).



Figura 5. Sistema de distribución por presión

Ventilador, de la marca Siemens (modelo 1LA7080-4AA10). De tipo axial con unas palas de polipropileno de alta resistencia diseñadas para evitar la corrosión y soportar las presiones a las que está sometido (ver Figura 6). Las características técnicas del ventilador se pueden observar en la Tabla 3.



Figura 6. Ventilador de la instalación Siemens

Polos	4
Tamaño	80
Voltaje	220 – 240 / 380 – 420 V
Δ/y	26 – 26 / 15 -15 A
Potencia	0,55 kW
Cos α	0,82
Protección	IP55

Tabla 3. Características técnicas ventilador axial Siemens

Variador de frecuencia, de la marca Toshiba (modelo Tosvert VF-nC1) de fase simple de 100 V y de clase de 0,1 a 0,75 kW (ver Figura 7). Este dispositivo regula la frecuencia suministrada al ventilador, permitiendo reducir su velocidad de giro cuando está conectado directamente a la red eléctrica.



Figura 7. Variador de frecuencia Toshiba

Es fundamental manejar este dispositivo con especial cuidado, evitando ambientes húmedos, altas temperaturas y obstrucciones en las entradas de aire destinadas a la refrigeración. Un uso incorrecto podría afectar los ensayos al modificar la frecuencia que el ventilador debe recibir.

Bombas hidráulicas, de la marca Grundfos (modelo A96023753 P1 0402). La instalación comprende dos bombas dispuestas en serie. Cuando el calentador no está en funcionamiento, es posible ajustar las válvulas del circuito para que funcione con una única bomba. La ficha técnica se encuentra detallada en la Tabla 4.

Tipo	Gp 7 - 44	I_{1/1}	3,3 A
Caudal	7 m ³ /h	Frecuencia	50 Hz
Altura	10 m	P	700 W
Altura máx.	14 m	Protección	IP54
Tensión	1 x 220/240 V		

Tabla 4. Características técnicas bomba hidráulica Grundfos

Válvula de equilibrado, de la marca Tur Andersen (modelo TN32 STAD32). Se encarga de ajustar el caudal de agua deseado en el circuito (ver Figura 8). Además, ofrece la posibilidad de conexión a un caudalímetro para medir el flujo de agua de la instalación.

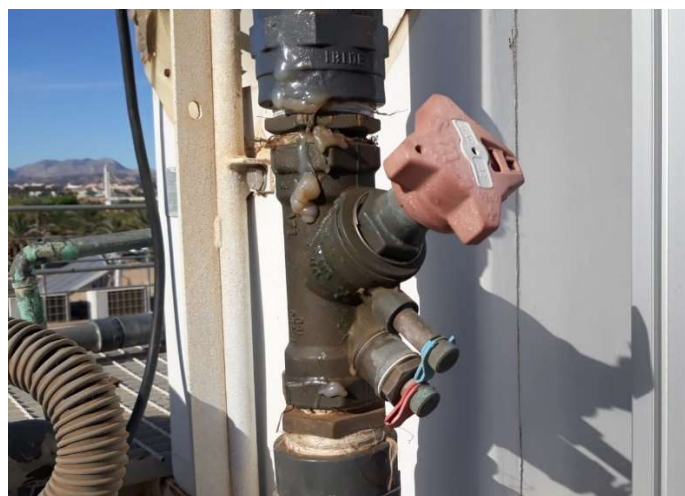


Figura 8. Válvula de equilibrado Tur Andersen

Instalación hidráulica, permite conectar todos los componentes de la torre de refrigeración mediante tuberías, incluyendo codos para facilitar los cambios de dirección necesarios en la instalación. Estas tuberías están fabricadas con PVC y tienen un diámetro exterior de 50 mm, con un espesor de 2,4 mm.

Además, se han colocado válvulas en puntos estratégicos para poder ajustar el recorrido del circuito según las necesidades del ensayo.

Separador de gota, está fabricado con lamas de un material plástico de 1 mm de espesor, con una geometría sinusoidal. Estas lamas se encuentran separadas entre sí por 47 mm. En la Figura 9 se puede observar el separador de gotas estudiado.



Figura 9. Separador de gotas con lamas sinusoidal

2.2.2 Instrumentos de medida

Los instrumentos de medida son herramientas fundamentales para cuantificar y evaluar magnitudes físicas, brindando datos precisos y confiables. En la instalación donde se ha trabajado, la mayoría de estos instrumentos se encuentran instalados de manera permanente. Sin embargo, también se ha empleado instrumentación móvil para medir datos necesarios en nuestro estudio.

Una parte significativa de los datos obtenidos se almacenan directamente en un ordenador a través de un sistema de adquisición de datos.

A continuación, se detallan las características de los instrumentos de medida utilizados:

Caudalímetro, de la marca Micronics (modelo Portaflow 300), tiene la función de medir el caudal que circula por la instalación (ver Figura 10). Se trata un medidor de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito diseñado para funcionar con transductores de sujeción.



Figura 10. Caudalímetro Micronics LTD

Las principales ventajas de este sistema incluyen su capacidad para medir con precisión tanto flujos lentos como rápidos. Además, no afecta a la presión del sistema debido a que se colocan en el exterior de la tubería. Las características técnicas se muestran en la Tabla 5.

Rango de velocidad	0,2 – 12 m / s (4-20 mA)
Tensión (DC)	9 V
Protección	IP66
Rango de temperatura	- 20 – 200 °C

Tabla 5. Características técnicas caudalímetro Micronics

El caudalímetro dispone de un pequeño display que permite conocer rápidamente el caudal de la instalación durante la realización de los ensayos. Simultáneamente, mediante el sistema de adquisición de datos, las mediciones se almacenan en el ordenador.

Termoresistencias PT – 100, (RTD), son sensores de temperatura que se basan en el cambio en la resistencia eléctrica de un material conductor, en función de la temperatura (ver Figura 11). La resistencia del platino aumenta de manera lineal con el aumento de la temperatura, lo que permite una medición precisa de la temperatura.



Figura 11. Termoresistencia PT - 100 (RTD)

Las RTD's se caracterizan por ser dispositivos capaces de medir con precisión en un amplio rango de temperaturas y de no necesitar calibración.

Anemómetro de molinete, de la marca TESTO (modelo 0635 9430), es un instrumento empleado para la medición de la velocidad de flujos de aire (ver Figura 12). Su funcionamiento se basa en la acción del viento, que hace girar un conjunto de hélices. La velocidad de este giro proporciona una indicación de la velocidad del viento en la ubicación donde se sitúa el anemómetro.

Este dispositivo registra los datos de velocidad recopilados cada segundo. Estos datos se transfieren posteriormente a un ordenador donde se extraen y promedian para calcular la velocidad. Las características técnicas se pueden observar en la Tabla 6.



Figura 12. Anemómetro TESTO

Diámetro	100 mm
Rango	0,3 – 35 m/s
Precisión	$\pm 0,1 / 0,2$ m/s ($\pm 1,5$ % lectura)
Resolución	0,01 m/s

Tabla 6. Características técnicas anemómetro TESTO

Sensor de humedad relativa y temperatura, de la marca Young (modelo 41372), es un dispositivo de dimensiones reducidas que permite un fácil manejo (ver Figura 13). Por ello, ha sido empleado para medir las propiedades del aire en la salida de la torre de refrigeración. Este sensor tiene un rango de precisión de $\pm 3\%$ para la humedad relativa y $\pm 0,2$ °C para la temperatura.



Figura 13. Sensor de humedad relativa y temperatura Young

2.2.3 Estación meteorológica

En la terraza donde está ubicada la torre de refrigeración, se ha instalado una pequeña estación meteorológica equipada con varios instrumentos de medida para recoger valores ambientales (ver Figura 14).



Figura 14. Estación meteorológica

Algunos de estos instrumentos ya han sido mencionados anteriormente, como el sensor de humedad y temperatura, de la marca Young.

Sin embargo, la estación meteorológica incluye otros instrumentos que aún no han sido mencionados:

Anemómetro de molinete y veleta, de la marca Young 05103, que miden la velocidad del viento a través del giro del molinete. Este molinete está diseñado para captar la fuerza del viento, lo que hace que gire alrededor del eje central del anemómetro. La velocidad a la que el molinete gira está directamente relacionada con la velocidad del viento en ese momento. En la Tabla 7 se puede observar las características técnicas del anemómetro.

Velocidad	0 – 100 m/s (4 – 20 mA)
Tensión (DC)	15 V
Precisión	±0,3 m/s (±1 % lectura)

Tabla 7. Características técnicas anemómetro Young

La veleta indica la dirección de la componente horizontal del viento, se trata de un potenciómetro sensible a la pieza del anemómetro que hace girar el viento. Inicialmente orientada hacia el norte, el giro del potenciómetro genera una señal de resistencia linealmente dependiente de la dirección del viento. Las características técnicas se pueden observar en la Tabla 8.

Dirección	0 – 360° (4 – 20 mA)
Tensión (DC)	15 V
Precisión	± 3°

Tabla 8. Características técnicas veleta Young

2.2.4 Sistema de adquisición de datos

La unidad de adquisición de datos utilizada durante los ensayos es de la marca Keysight modelo DAQ970A (ver Figura 15).



Figura 15. Sistema de adquisición de datos Keysight

Este dispositivo se emplea para recopilar información de sensores y transductores, convirtiéndola en datos digitales que pueden ser procesados, analizados y almacenados en una computadora u otro dispositivo.

La unidad está formada por módulos de adquisición HP34901A Multiplexor de 22 canales (ver Figura 16), que recibe las señales de los sensores. De estos canales, solo 2 se utilizan para medir intensidades, mientras que el resto realizan mediciones en voltaje. No obstante, con una resistencia Shunt, uniendo la entrada y salida del canal, se puede calcular la caída de tensión de la señal al atravesar la resistencia.

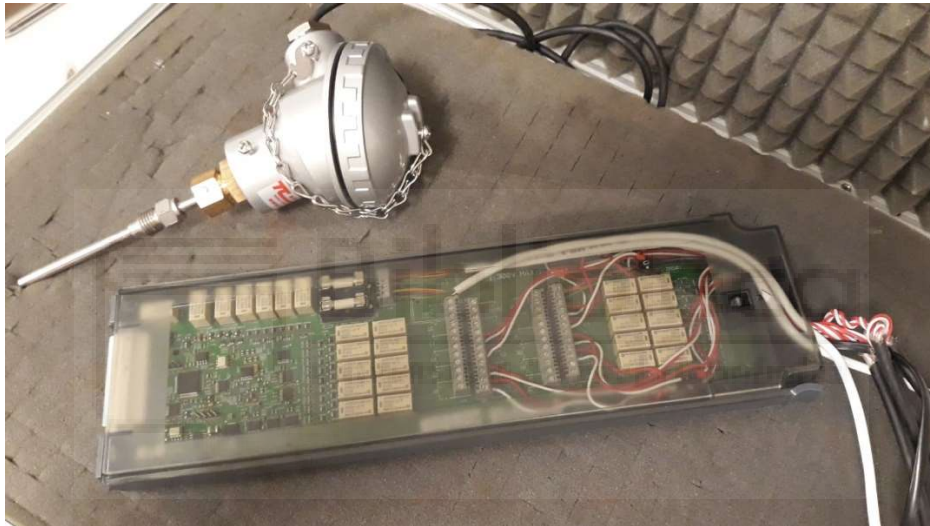


Figura 16. Multiplexor HP34901A

El intercambio de datos con el ordenador se lleva a cabo a través de un protocolo de comunicación RS-232, conectado al puerto LAN del ordenador o mediante USB.

2.3 Métodos de medida de arrastre

A pesar de las restricciones establecidas en el Real Decreto 487/2022, de 21 de junio, que limitan la emisión de arrastre a un máximo del 0,002% del caudal circulante por la torre de refrigeración, este decreto no especifica un método preciso para llevar a cabo las mediciones.

En la actualidad, existen diversos métodos para calcular el arrastre, sin embargo, ninguno se ha posicionado como la mejor técnica. Algunos de estos métodos muestran carencias evidentes o solo son capaces de ofrecer una información parcial, referente a la población de gotas de muestreo.

Es por eso, que algunos países han comenzado a adoptar uno de los métodos de medición de arrastre como la técnica de referencia (ver Tabla 9). En las normativas de estos países, se pueden encontrar descritos los procedimientos de estas técnicas, recopilados en el trabajo de Ruiz Ramírez, y otros (2012).

A continuación, se muestran las normativas de cada país:

- Australia: Australian Standard [1994]. AS-4180.1 Drift loss from cooling towers – Laboratory measurement. Part 1: Chloride balance method.
- Reino Unido: British Standard [1988]. BS- 4485. Water cooling towers. Part 2: Methods for performance testing. British Standards Institution.
- Estados Unidos: CTI ATC-140 Code Tower. Standard Specifications [1994]. Isokinetic Drift Test Code. Cooling Technology Institute.
- Japón: JIS B 8609 [1981] Performance tests of mechanical draft cooling towers.

País	Técnica de referencia
Australia	Balance Químico
Reino Unido	Balance Térmico
Estados Unidos	Método Isocinético HGBIK y Papel Hidrosensible
Japón	Balance Térmico

Tabla 9. Técnicas de referencia según normativa de los países.

Según la naturaleza de la medición, se pueden diferenciar dos grupos: métodos directos, en los cuales la medición se lleva a cabo en la sección de salida de la torre de refrigeración; y métodos indirectos, en los cuales se realizan balances globales.

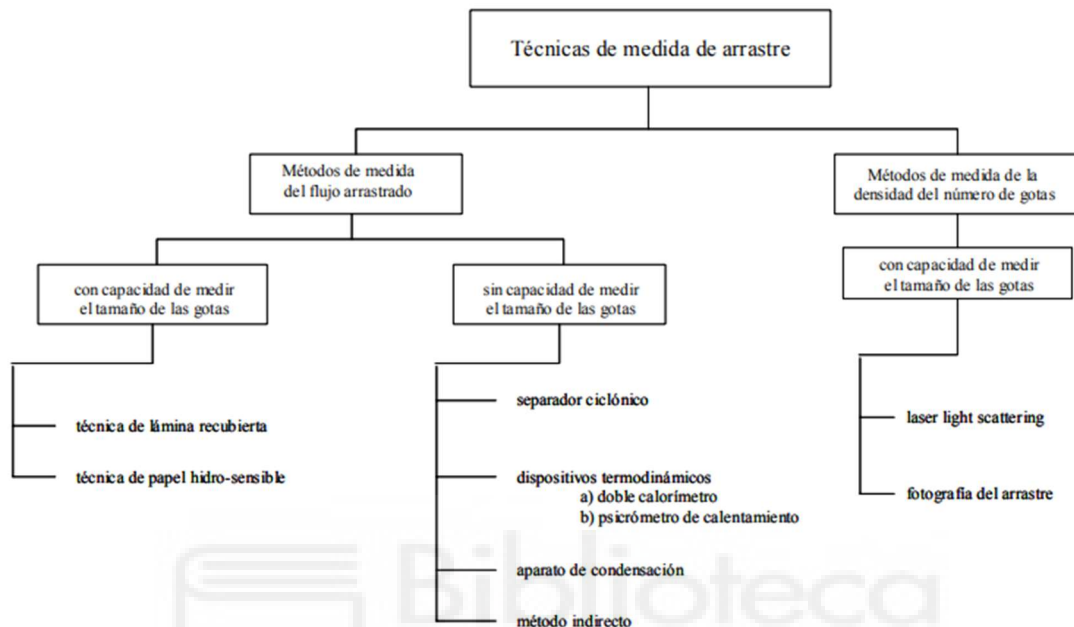


Figura 17. Clasificación de las técnicas de medición de arrastre (Solano Fernández, Martínez Beltrán, Viedma Robles, & Lucas Miralles, 2003)

A continuación, se muestra el procedimiento de los distintos métodos observados en la Figura 17.

Técnica de lámina recubierta.

La técnica de lámina recubierta implica el uso de una lámina de un material, generalmente de plástico, metal o vidrio, que se coloca en el flujo de aire saliente de la torre de refrigeración. La lámina está recubierta con una sustancia adhesiva o un líquido (generalmente carbono negro o aceite mineral) que tiene una buena afinidad para las gotas de agua.

Cuando las gotas arrastradas impactan sobre la lámina, éstas dejan una marca sobre el material que recubre. El diámetro de las marcas se puede correlacionar con el tamaño y velocidad del impacto de las gotas.

Dado que la lámina recubierta está dispuesta de manera perpendicular al flujo de aire, éste es alterado y las gotas capturadas no reflejan con precisión el arrastre real de la sección de salida representada por esta lámina.

Técnica del papel hidrosensible.

La técnica del papel hidrosensible es muy similar a la técnica anteriormente mencionada.

En este caso, la lámina se trata de un papel hidrosensible. Cuando una gota arrastrada por el flujo de aire impacta, se genera una reacción que produce una mancha azul sobre el fondo amarillo.

El diámetro de la mancha depende del tamaño de la gota y la velocidad con la que impacta. Al igual que la lámina recubierta, el flujo de aire es alterado y no reflejan con precisión el arrastre real.

El uso de esta técnica es ampliamente utilizado en la agricultura para conocer la eficiencia de la pulverización sobre plantas.

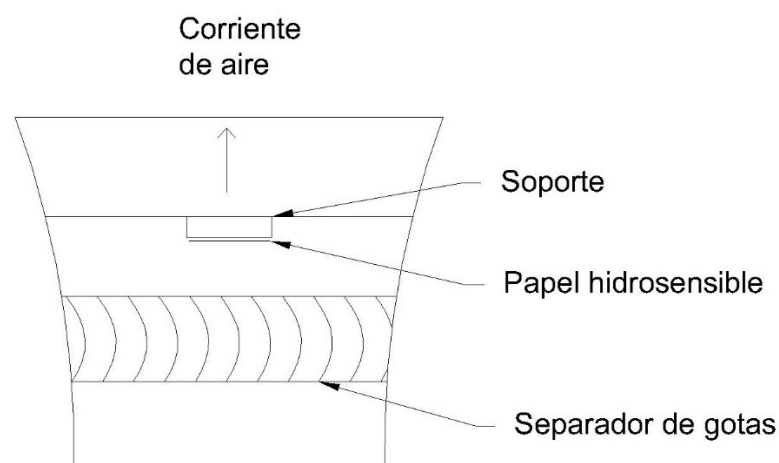


Figura 18. Técnica del papel hidrosensible o lámina recubierta

Separador ciclónico

Un separador ciclónico es un dispositivo utilizado en diversas aplicaciones para separar partículas sólidas o líquidas arrastradas por un flujo de gas, como puede ser el aire.

El aire ingresa a través de un conducto de entrada que generalmente está ubicado tangencialmente en el dispositivo. Una vez dentro del separador ciclónico, se dirige hacia una cámara de forma cónica. Esta cámara cónica es fundamental para el funcionamiento del dispositivo, ya que genera un movimiento rotativo en el flujo de aire debido a la fuerza centrífuga.

La fuerza centrífuga provoca que las partículas más pesadas tiendan a desplazarse hacia la pared exterior del cono, mientras que el aire más limpio y ligero tiende a moverse hacia el centro. Estas partículas arrastradas, al ser más pesadas, tienden a caer hacia abajo. Mientras tanto, el aire más limpio, con menos partículas, asciende hacia la parte superior.

Finalmente, en una bandeja se puede recoger el arrastre emitido por la torre de refrigeración.

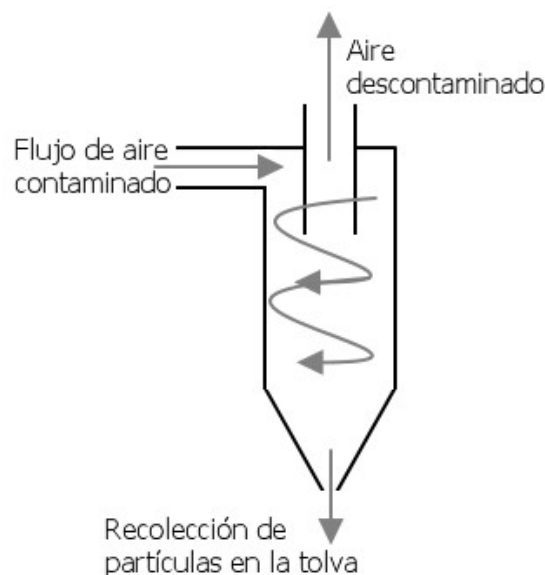


Figura 19. Esquema separador ciclónico (Bellon Hernandez & Benitez Ramirez, 2013)

Dispositivos termodinámicos: Psicrómetro de calentamiento y calorímetro doble.

El psicrómetro de calentamiento y el calorímetro doble son dispositivos termodinámicos utilizados para medir la cantidad de agua en estado líquido presente en un flujo de aire.

A través de procesos psicrométricos, se puede conocer el arrastre que contiene una muestra de aire, evaluando las propiedades psicrométricas a la entrada y salida de los dispositivos.

Aparato de condensación

Para emplear esta técnica, se introduce un material trazador en el circuito de agua de la instalación. Posteriormente, se toma una muestra del aire que sale de la torre de refrigeración y se hace pasar a través de un sistema de tuberías hasta llegar al dispositivo de condensación.

El propósito de este dispositivo es lograr la saturación de la muestra de aire. Esto se consigue mediante un proceso de enfriamiento, que suele realizarse utilizando un serpentín refrigerado o un intercambiador de calor. Al enfriar el aire y alcanzar la saturación, las partículas transportadas en el aire se condensan en pequeñas gotas de agua.

Finalmente, se mide la conductividad eléctrica del agua condensada para calcular el arrastre, a partir del principio de la conservación de los materiales trazadores.

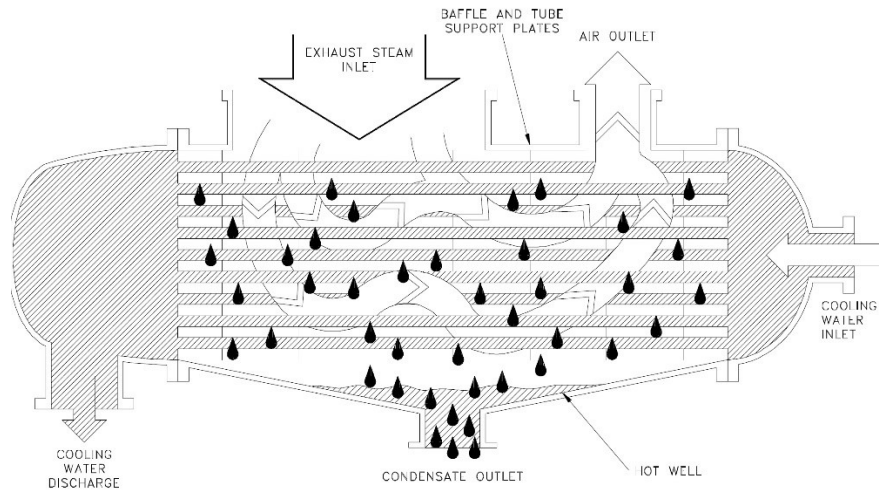


Figura 20. Aparato de condensación

Balance químico

El funcionamiento del balance químico se basa en la introducción de un material trazador disuelto en el agua del circuito de la torre. Cuando se produce la evaporación, el vapor de agua no transporta el material trazador a la corriente de aire. Sin embargo, cuando esta corriente arrastra partículas de agua en estado líquido, sí que se puede detectar una cierta cantidad del material trazador.

Para realizar el balance, se necesita conocer la concentración inicial y final del trazador en el agua de circulación, la concentración del agua de aporte y el caudal aportado. Así se puede conseguir conocer el arrastre de la torre de refrigeración.

Este método no proporciona información sobre el tamaño de las partículas de agua, sino que solamente ofrece el volumen de agua que ha escapado. La prueba requiere un tiempo extenso, y es fundamental considerar las posibles pérdidas en la instalación para evitar obtener resultados incorrectos.

Método isocinético de muestreo HGBIK

El método de muestreo HGBIK (Heated Glass Bead Isokinetic system) se realiza extrayendo una muestra de la corriente de aire a la salida de la instalación, manteniendo la misma velocidad y dirección.

La primera etapa consiste en una tobera rellena de pequeñas bolitas de cristal, donde un calefactor consigue mantener la temperatura para transformar el agua líquida en vapor. Al evaporarse, los materiales trazadores quedan impregnados en las bolitas.

La segunda etapa consiste en un filtro que se encuentra justo después de la salida de la tobera. Todas aquellas partículas trazadoras que han podido quedar en la corriente de aire, son atrapadas por este filtro. Por último, se añade otro filtro para recoger partículas que no han podido ser capturadas.

A partir del material trazador obtenido en los filtros y conociendo la concentración en el agua circulante, se puede medir el arrastre producido por la torre.

Técnica de láser light scattering.

La técnica de láser light scattering, es un método utilizado para medir el tamaño de partículas (en el caso de torres de refrigeración, del arrastre) en un medio disperso.

En esta técnica, se emplea un láser como fuente de luz. Este láser emite un haz de luz monocromático y coherente, lo que significa que la luz tiene una sola longitud de onda y todas sus ondas están en fase.

Cuando el haz de láser atraviesa el flujo de aire de la torre, las gotas de agua son atravesadas por el láser y eso provoca que la luz sea dispersada en diferentes direcciones.

Un detector ubicado en un ángulo específico mide la luz dispersada. La cantidad de luz dispersada y el ángulo en el que se dispersa están relacionados con el tamaño de las partículas en la muestra. Las partículas más grandes dispersan más luz a ángulos más amplios, mientras que las partículas más pequeñas dispersan menos luz y a ángulos más estrechos.

Fotografía del arrastre

La técnica de la fotografía del arrastre consiste en el uso de una cámara que sea capaz de capturar imágenes de alta calidad a velocidades adecuadas para la detección de gotas de agua en movimiento.

La cámara se debe colocar en un lugar estratégico cerca de la torre de refrigeración para obtener una vista clara de las gotas de agua que se elevan en el aire. Asegurándose de que haya suficiente luz para iluminar las gotas de agua en la escena. En algunos casos, es posible que se deba utilizar iluminación adicional, como luces estroboscópicas o luces LED, para resaltar las gotas.

Requiere una configuración de la cámara para que utilice una velocidad de obturación adecuada para capturar las gotas en movimiento.

Posteriormente, se utiliza un software de análisis de imágenes para procesar las fotografías y contar las gotas de agua. También se puede medir el tamaño de las gotas y la densidad en el aire. Con los datos recopilados de las imágenes, se puede calcular la cantidad de arrastre producido.

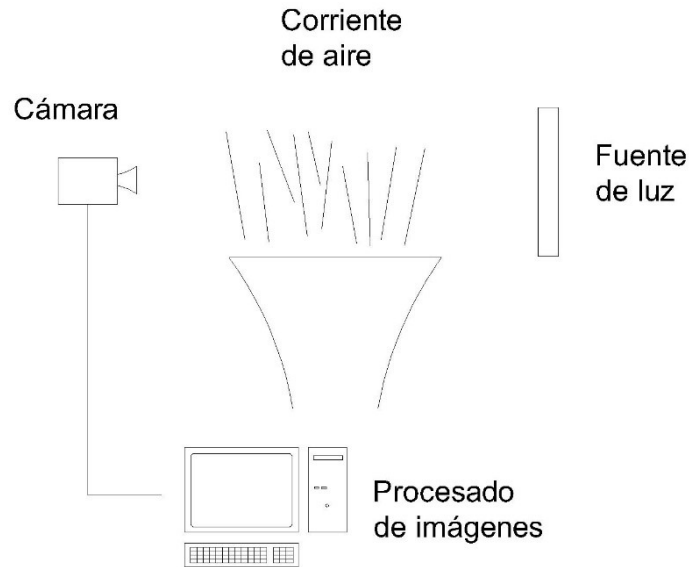


Figura 21. Técnica fotografía del arrastre.

2.3.1 Método seleccionado para realizar la medición de arrastre

Para seleccionar el método más apropiado e idóneo hay que tener en cuenta muchos aspectos, por ejemplo, la instalación donde se realiza los ensayos y sus características, la viabilidad económica o la preparación técnica necesaria para realizar los ensayos.

Considerando los aspectos previamente mencionados, se ha considerado que la elección más idónea para llevar a cabo nuestro estudio son los papeles hidrosensibles, los cuales han sido objeto de estudio y empleo por parte de la línea de investigación de la Universidad Miguel Hernández durante numerosos años, generando así una amplia y valiosa experiencia en su aplicación.

2.4 Ensayos de arrastre con el método del papel hidrosensible

En el apartado anterior se han mostrado los diferentes métodos y técnicas para medir el arrastre producido por una torre de refrigeración. Finalmente, se ha optado por utilizar el método del papel hidrosensible debido a su simplicidad técnica y fiabilidad.

2.4.1 Papel hidrosensible

El papel hidrosensible es un tipo de papel tratado químicamente, mediante un baño de ferrocianuro potásico y un tratamiento superficial de amonio ferroso, este último es el que le proporciona el color amarillo característico.

Cuando las gotas de agua que se transportan en el aire en forma de aerosoles impactan inercialmente contra el papel, dispuesto de manera perpendicular al flujo de aire. Este impacto hace que el agua disuelva los compuestos presentes en el papel, lo que resulta en la aparición de manchas de color azul.

Es importante tener en cuenta que cuando una gota de líquido impacta en el papel hidrosensible, la mancha resultante en el papel no tiene el mismo diámetro que la gota original. Esto ocurre porque la gota se deforma al impactar, creando una mancha con un diámetro mayor. Para obtener el tamaño real de la gota, se utiliza un factor de corrección llamado "factor de aplastamiento".

Para medir con precisión los diámetros de las manchas, también es fundamental evitar que se superpongan entre sí. Por ello, es necesario emplear un tiempo de exposición que permita capturar la máxima cantidad de información posible sin que se produzca el solapamiento.

La manipulación y el almacenamiento de los papeles hidrosensibles son procesos críticos para garantizar la integridad y la calidad de los ensayos. A continuación, se presentan algunas pautas que se deben seguir:

- Utilizar guantes de látex o nitrilo al manipular los papeles hidrosensibles. Esto ayuda a prevenir la transferencia de aceites y contaminantes de la piel que podrían afectar los resultados.
- Mantener los papeles hidrosensibles alejados de la humedad, ya que puede activar prematuramente la reacción química en el papel. Se deben almacenar en sitios secos y hacer uso de materiales desecantes si es necesario.
- Almacenar los papeles a la temperatura recomendada por el fabricante. Las temperaturas extremas pueden afectar la estabilidad de los reactivos en el papel.
- Guardar en envases opacos o en un lugar oscuro para evitar la degradación de los reactivos.
- Manipular los papeles con cuidado para evitar dañarlos físicamente, con el uso de pinzas o herramientas adecuadas si es necesario.
- Evitar manchas no provocadas por gotas de agua. Para ello, se puede utilizar un pañuelo de papel seco para limpiar la superficie del papel.

Los papeles hidrosensibles (ver Figura 22) utilizados en nuestros ensayos son de la marca Spraying Systems C.O., fabricados por Syngenta Crop. Protection AG de tamaño 76 mm x 52 mm.



Figura 22. Papel hidrosensible 76 x 52 mm.

2.4.2 Realización de ensayos

Los pasos a seguir para llevar a cabo los ensayos experimentales de arrastre, empleando el método previamente mencionado de los papeles hidrosensibles, se detalla a continuación:

Primer paso: *Sectorización de la sección de salida de la torre de refrigeración.*

Según en los sectores que se decida dividir la sección de salida de la torre de refrigeración, se podrá obtener menor o mayor cantidad de información. Esto se debe a que las características del flujo de aire a la salida no son uniformes en toda la sección, por lo que se puede encontrar diferentes valores de velocidad y de arrastre.

En los ensayos realizados, se ha decidido dividir la sección en nueve partes. A medida que aumenta la división, el proceso posterior de escaneo y procesamiento de datos se vuelve considerablemente más laborioso. Por esta razón, se considera que utilizar nueve papeles hidrosensibles es la mejor opción, ya que proporciona una cantidad significativa de información sin generar un excesivo trabajo en el procesado posterior.

La numeración de los sectores se muestra en la Figura 23.

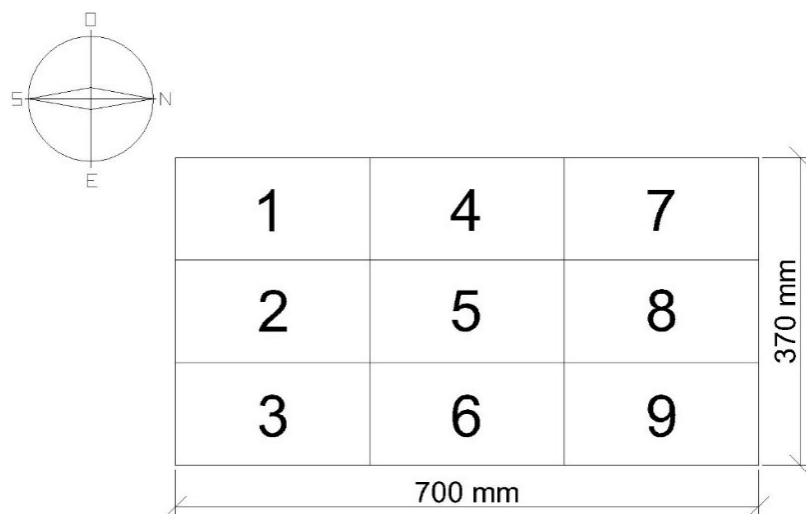


Figura 23. Sectorización sección de salida efectiva

Segundo paso: *Elaboración del instrumento para la colocación de los papeles hidrosensibles en la torre de refrigeración.*

Se ha utilizado una varilla circular metálica de diámetro 15 mm con una pletina continua rectangular, que se encuentran anclada a la varilla. Se utiliza una pletina continua con el fin de evitar el efecto borde, que modifica la trayectoria del flujo de aire. De este modo, se logra eliminar el efecto de borde transversal, quedando únicamente el longitudinal. En la Figura 24 se puede observar la varilla con pletina continua.



Figura 24. Varilla para colocación de papeles hidrosensibles

Los papeles hidrosensibles se adhieren a la pletina utilizando cinta adhesiva de doble cara. El adhesivo debe ser suave para retirar los papeles sin dañarlos. Para ello, se aplica una capa de goma de borrar sobre el adhesivo.

Tercer paso: *Elaboración del soporte para la colocación de las varillas en la torre de refrigeración.*

Se ha creado un cabezal que se fija en la sección de salida de la torre de refrigeración (ver Figura 25). Su objetivo es reproducir la posición de las varillas de forma uniforme en todos los ensayos.

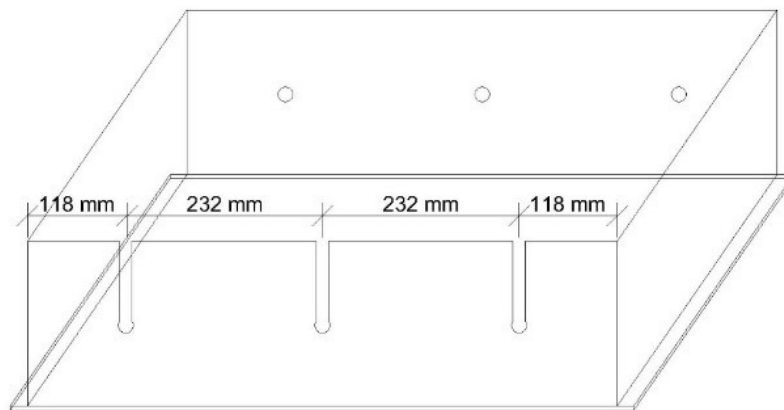


Figura 25. Cabezal para colocación de las varillas

La varilla se coloca con los papeles hacia arriba, introduciéndola a través del agujero en la parte posterior del cabezal y deslizándola a lo largo de la ranura. Al comenzar el cronómetro, se rota la varilla rápidamente para exponer los papeles al flujo de aire. Al concluir el período de prueba, se gira nuevamente la varilla y se retira rápidamente.

Cuarto paso: *Realización de los mapas de velocidades.*

Previamente a la colocación de los papeles, se lleva a cabo la medición de la velocidad en cada uno de los sectores utilizando un anemómetro. Este dispositivo registra mediciones a intervalos de un segundo, almacenando los datos en su memoria. Posteriormente, estos datos se transfieren a un ordenador para realizar el promedio.

El resto de las variables como el caudal, la humedad relativa y las temperaturas, se obtienen mediante el sistema de adquisición de datos conectado a los instrumentos de medición ubicados en la torre de refrigeración. Estos datos se almacenan en un ordenador para su posterior tratamiento.

Quinto paso: *Colocación de los papeles hidrosensibles en las varillas.*

Este paso es uno de los más importantes para obtener unos resultados correctos. A partir del momento en el que se abre el paquete con los papeles hidrosensibles, hay que tener especial cuidado con ellos.

Durante la colocación de los papeles en la varilla no se puede hablar ni tampoco puede haber un contacto directo con la piel humana, cualquier aerosol expulsado por la boca o el sudor de las manos puede estropear los papeles.

Para prevenir tales inconvenientes, hay que tomar medidas preventivas como la utilización de guantes de látex y uso de mascarilla.

Los papeles hidrosensibles se disponen sobre las placas rectangulares de la varilla, asegurándose de que la cara amarilla de los papeles esté orientada hacia arriba. Se procura colocarlos lo más centrados posible y sin aplicar demasiada fuerza, facilitando así su posterior extracción.

Una vez colocados los papeles, es importante mantener el cuidado, ya que cualquier roce podría marcar los papeles, dejándolos inutilizables.

Sexto paso: *Transporte de las varillas hasta la torre de refrigeración.*

Como ya se ha reiterado en el paso anterior, hay que llevar especial cuidado con los papeles hidrosensibles. Para el transporte, los papeles deben mirar siempre hacia el suelo, intentando alejarse lo máximo posible de la torre de refrigeración para evitar la exposición a aerosoles. Para evitar tiempos muertos, una persona debe estar en posición para recibir la varilla y colocarla rápidamente en el cabezal.

Séptimo paso: *Elección del tiempo de exposición de los papeles.*

Antes de realizar las pruebas para determinar el tiempo de exposición de los papeles, la torre de refrigeración debe ponerse en marcha y alcanzar el punto de funcionamiento nominal.

Durante el tiempo de exposición, los papeles deben ser capaces de registrar el mayor número de gotas sin que se produzca solapamiento. Se deben realizar varias pruebas con diferentes tiempos de exposición y con una revisión visual, decidir cuál es el más idóneo.

Otro factor importante a la hora de decidir el tiempo de exposición es que, a mayor tiempo, los fallos con el cronómetro (adelantarse o retrasarse al girar las varillas) tendrán un impacto menor en los resultados.

Finalmente, el tiempo decidido para realizar los ensayos ha sido de 10 segundos. Después de realizar pruebas con 15 y 20 segundos, se encontraban ciertos sectores con un excesivo solapamiento de manchas.

Octavo paso: *Realización de los ensayos.*

Esta operación requiere el trabajo de dos personas, una que deberá cronometrar y otra que se encargará de exponer los papeles al flujo de aire de la torre.

Cuando la persona con la varilla se encuentre preparada, deberá esperar el aviso de la persona que controla el cronómetro. Al momento de iniciar la cuenta de tiempo, se girará la varilla. Finalmente, cuando haya transcurrido el tiempo, se avisará para volver a girar la varilla y dejar de exponer los papeles al flujo de aire. Se deberá sacar rápidamente la varilla y llevarla a un sitio seguro sin aerosoles.

Noveno paso: *Almacenamiento de los papeles posterior a la exposición.*

El almacenamiento de los papeles se debe hacer en un sitio libre de aerosoles, y al igual que en la colocación de los papeles, se deberá utilizar las mismas medidas preventivas.

Los papeles se deberán despegar con mucho cuidado para que no se rompan, utilizando guantes de látex. Para almacenarlos, se deberán introducir en fundas donde no entre la humedad para el posterior escaneado y procesado. Es importante el marcado de los papeles para saber la prueba a la que pertenecen.

El escaneado debe realizarse rápidamente, sin superar las 24 horas, para prevenir que la humedad del aire altere el color amarillo de los papeles a un tono verdoso.

Décimo paso. *Escaneado de los papeles hidrosensibles.*

Para llevar a cabo el procesado, los papeles deben ser convertidos en imágenes digitales a través de un escáner de alta calidad. Posteriormente, un programa será capaz de analizar estas imágenes.

Para asegurar un escaneado preciso, es esencial mantener limpio el escáner, eliminando cualquier polvo, mancha o suciedad presente en el equipo. Después de cada escaneo, al abrir y cerrar la tapa, se puede introducir partículas que afecten la calidad de la imagen, por lo que es recomendado la limpieza del escáner de manera regular.

Para asegurar que los papeles hidrosensibles se escaneen de manera correcta, se utiliza cualquier tipo de instrumento que posicione los papeles de forma paralela a los bordes del escáner, así se consigue evitar imágenes torcidas.

Para el escaneado de las imágenes se utiliza un escáner fotográfico profesional modelo CanonScan 9950F, escáner plano de 4800 x 9600 ppp de resolución óptica.

El siguiente paso es la configuración del escaneado:

- Modo de color: A Color
- Resolución de salida: 4800 ppp
- Tamaño de salida: Se realiza mediante un ajuste manual
- Tamaño de datos: Solo permite < 400 MB

El ajuste manual se realiza intentando perder la menor cantidad de información posible del papel, pero evitando cualquier posible zona correspondiente al fondo de la aplicación del escáner.

El formato de archivo utilizado para las imágenes se trata de Bitmap Image File (.bmp), un tipo de archivo de imagen que almacena gráficos digitales en un formato sin compresión. Esto resulta en archivos de mayor tamaño, pero con muy buena calidad de imagen, ya que no sufren pérdida de datos debido a la compresión.

Finalmente, se guarda en una carpeta donde se introduce el ensayo al que pertenecen y la posición.

2.4.3 Procesado digital de las imágenes

El procesado de las imágenes se ha realizado con el software DRIFT[®], programa de reconocimiento de imagen desarrollado por los investigadores de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

A partir de las imágenes introducidas al programa, se realiza un tratamiento digital para obtener la mayor cantidad de información posible. De estas imágenes se pueden extraer tres canales de color, R, G y B. El software utiliza el canal R, que recoge mayor información y mayor contraste con el fondo. El canal G es muy similar al canal R, pero con peor contraste y el canal B es todo ruido de fondo.

A continuación, se aplica el detector de bordes Canny (Canny, 1986), uno de los métodos más utilizados para la detección de bordes. Establece los puntos de contorno, de espesor un píxel, en la zona media donde existe un cambio brusco de escala de grises. Además, en caso de que algún borde quede abierto, este detector lo cierra.

Tras establecer los contornos de las manchas (ver Figura 26), el programa identifica las características de estas (diámetro, área, factor de redondez y 7 momento de Hu).

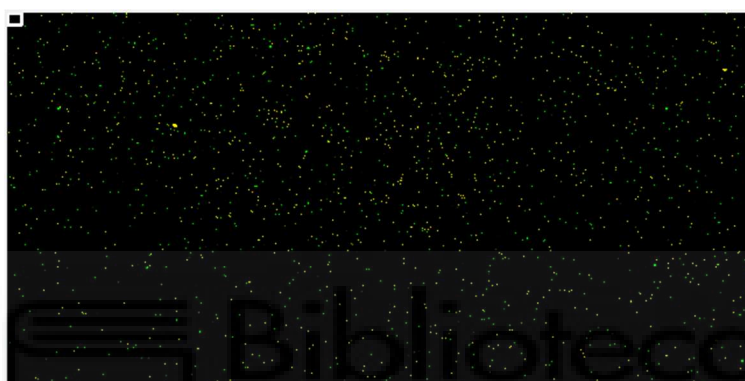


Figura 26. Detección de manchas por el software DRIFT®

El siguiente paso es crear un clasificador, características como el diámetro y el área se descartan por ser variables dimensionales. Un clasificador necesita variables adimensionales para que su uso pueda ser extensible a otros problemas.

Para crear el clasificador, se hace uso del software Weka, desarrollado por la universidad de Waikato (Nueva Zelanda), que contiene una colección de herramientas de visualización y algoritmos para análisis de datos y modelado predictivo. Tras a hacerse un testeo con 1011 manchas supervisadas manualmente, se puede observar que solo son relevantes las características: factor de redondez y momentos de Hu 1, 2 y 4.

Para clasificar las manchas se debe conocer el origen de estas. En este estudio solo son interesantes las manchas producidas por gotas o gotas múltiples, esta

última producida por el impacto de dos gotas muy cerca una de otra. Las manchas que no tienen origen con una gota se nombrarán como “no gota”.

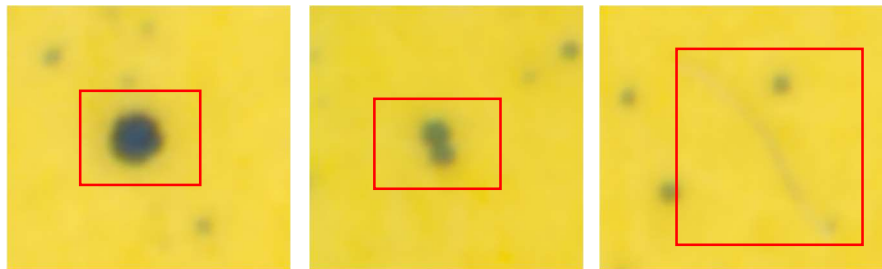


Figura 27. Gota, gota múltiple y no gota

El clasificador se ha realizado con un árbol de decisión J48, que construye un árbol que toma decisiones de clasificación a medida que se desciende por sus ramas (ver Figura 28).

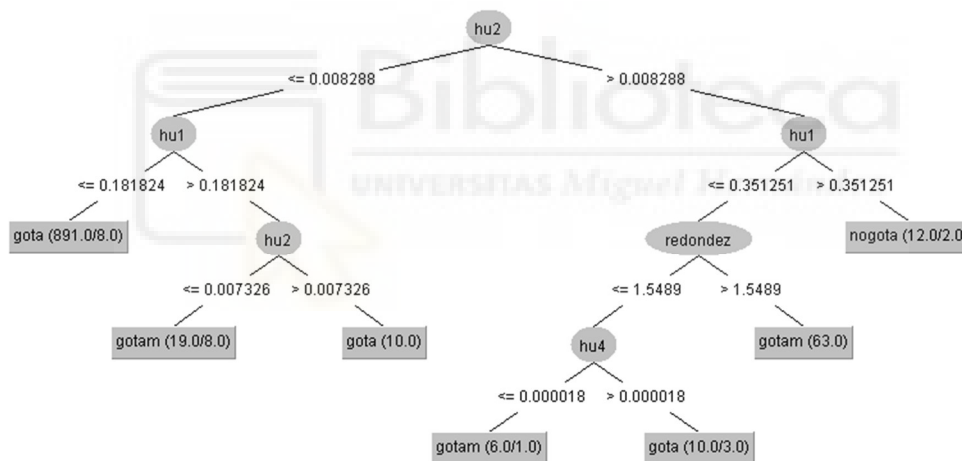


Figura 28. Clasificador (árbol de decisión J48)

Este método ha sido elegido por que suele mostrar los porcentajes de acierto más elevados. Una forma de saber dónde está acertando o fallando el clasificador es observar la matriz de confusión (ver Figura 29). Esta matriz muestra cuantas gotas (a) han sido clasificadas como gotas (a), gotas múltiples (b) o no gotas (c), y de igual manera con las gotas múltiples y las no gotas.

```

=== Confusion Matrix ===
      a   b   c  <-- classified as
894  15   1 |   a = gota
 18  71   2 |   b = gotam
  0   1   9 |   c = nogota
  
```

Figura 29. Matriz de confusión del clasificador

Este clasificador se integrará en el software DRIFT® para llevar a cabo una clasificación de las manchas. El porcentaje de acierto es del 96,34%, además, la mayor parte de este error se produce en la clasificación entre gota y gota múltiple por lo que poca información de una verdadera gota es perdida en el proceso.

2.4.4 Cálculo del arrastre

Los datos obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes requieren la aplicación de diferentes factores para calcular el arrastre producido por la torre de refrigeración. Esta información se encuentra documentada en la tesis doctoral de Ruiz Ramírez, titulada 'Caracterización experimental y modelización del binomio sistema de distribución-separador de gotas en torres de refrigeración' (2014).

2.4.4.1 Factor de aplastamiento

Con el procesado de las imágenes, se puede determinar el diámetro de las manchas causadas por gotas. No obstante, lo que se requiere de verdad es conocer el diámetro de la gota que causó la mancha. Cuando se produce el impacto en el papel hidrosensible, la mancha producida tiene mayor diámetro debido a que se produce un aplastamiento de la gota.

El fabricante del papel hidrosensible que se ha utilizado, Syngenta Crop. Protection AG., modelo Teejet de 52 x 76 mm, proporciona una curva de aplastamiento (ver Figura 30) que es necesaria para el cálculo del diámetro de las gotas. Esta curva es específica para el papel hidrosensible que se ha utilizado.

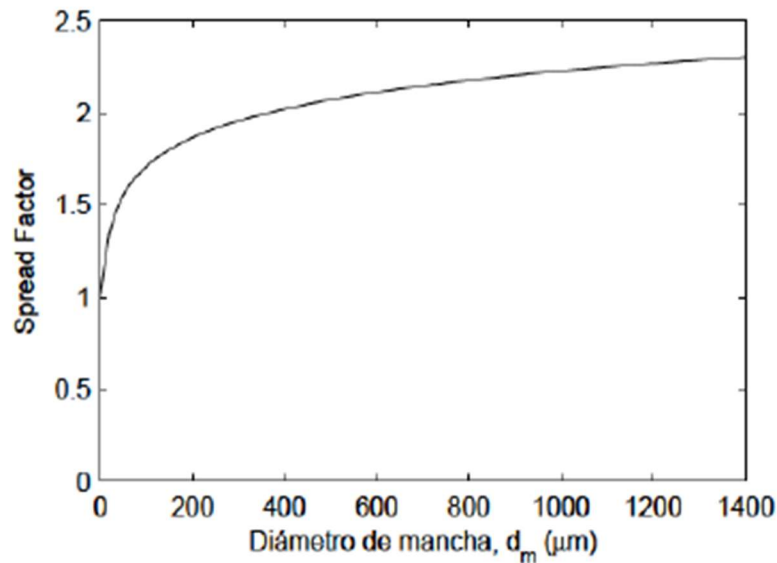


Figura 30. Curva de aplastamiento (modelo Teejet 52 x 72 mm)

La ecuación del factor de aplastamiento se define como:

$$F_a = \frac{\Phi_{mancha}}{\Phi_{gota}}$$

Con la información proporcionada por la gráfica y la ecuación del factor de aplastamiento, se pueden obtener los diámetros originales de las gotas que impactaron en el papel.

2.4.4.2 Eficiencia de captura

El siguiente paso requiere conocer cómo de eficiente es el papel hidrosensible a la hora de capturar las gotas, ya que no todas las gotas que son generadas en la sección que representa, impactan contra él.

Esto se debe a que las partículas de agua se encuentran suspendidas en la corriente de aire expulsada por la torre de refrigeración. Mientras no existan elementos que obstruyan el flujo, su sentido tiende a seguir una trayectoria recta. Sin embargo, al llegar a los papeles hidrosensibles, la corriente debe modificar

su trayectoria, lo que provoca que las partículas de menor inercia se desvíen junto con el flujo de aire.

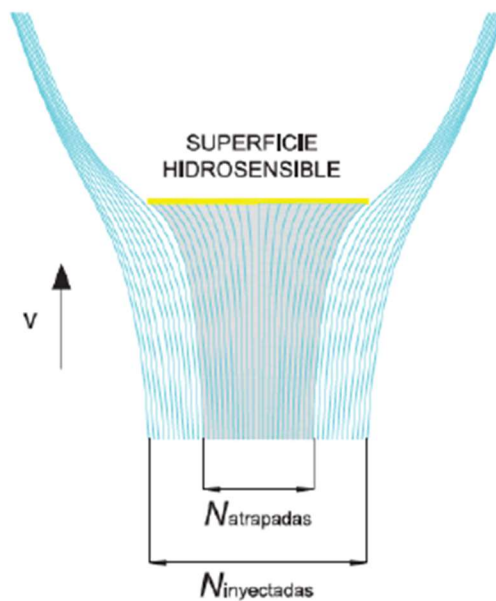


Figura 31. Eficiencia de captura del papel hidrosensible (Ruiz Ramírez J. , 2014)

En la Figura 31, se puede observar cómo las líneas de corriente de aire comienzan perpendicularmente al papel. A medida que se acercan, se produce un desvío en la trayectoria, buscando los bordes del papel hidrosensible. Solo una fracción de la corriente de aire y las gotas que transporta logran impactar en el papel, mientras que el resto no logran capturarse.

Conociendo la eficiencia de captura, se puede obtener el número real de gotas que se encuentran en la sección de salida representada por el papel hidrosensible.

La ecuación de la eficiencia de captura se define como:

$$\varepsilon = \frac{N_{atrap}}{N_{iny}}$$

Siendo:

N_{atrap} el número de gotas atrapadas por el papel hidrosensible.

N_{iny} el número total de gotas inyectadas en la superficie proyectada del papel hidrosensible.

El parámetro fundamental que afecta a la eficiencia de captura por impacto inercial es el número de Stokes que se define como:

$$Stk = \frac{\rho_g \cdot D_p^2 \cdot v \cdot C_c}{18 \cdot \mu_a \cdot L}$$

Siendo:

ρ_g la densidad de la gota.

D_g el diámetro de la gota.

v la velocidad relativa entre partícula y gas.

C_c el factor de corrección de Cunningham.

μ_a la viscosidad dinámica del fluido.

L la dimensión característica.

Esta última, la dimensión característica, corresponde a la proyección de la anchura del objeto en la dirección perpendicular al flujo, en este caso, el diámetro de la gota. El factor de corrección de Cunningham, C_c , se aplica para tener en cuenta que la ley de Stokes deja de ser exacta cuando el tamaño de las partículas es similar al desplazamiento medio libre de las moléculas del gas en las que están inmersas. Este factor es prácticamente igual a la unidad y, por lo tanto, insignificante, cuando se trata de partículas con un diámetro de hasta 1 mm en aire con condiciones normales de temperatura y presión. Sin embargo, en el caso de partículas más pequeñas o en condiciones de baja presión, el factor de corrección de Cunningham puede adquirir relevancia.

Existe una relación entre el número de Stokes y la eficiencia de captura. Esta relación se puede observar en la gráfica experimental realizada por May & Clifford (1967), que muestra la eficiencia de captura frente al número de Stokes.

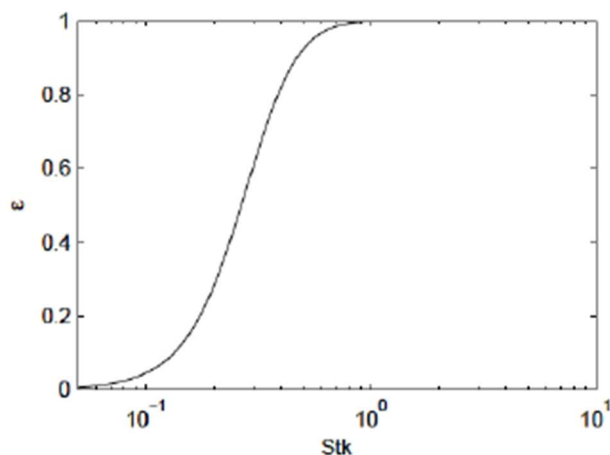


Figura 32. Curva de eficiencia de captura experimental para bandas (May & Clifford, 1967)

2.4.4.3 Cálculo del arrastre

Teniendo en cuenta los factores de aplastamiento y de eficiencia, ya se puede calcular el arrastre producido en la sección de salida que representa cada papel hidrosensible.

$$\dot{m}_d = \frac{\rho \cdot \pi}{6 \cdot A_p \cdot t_{\text{exp}}} \cdot \sum_{i=1}^N d_i^3 \cdot \varepsilon_i^{-1} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

donde:

ρ es la densidad del agua.

A_p es el área del papel hidrosensible

t_{exp} es el tiempo de exposición

d_i es el diámetro de las gotas

N es el número total de gotas

Para calcular el flujo másico de agua total que es arrastrado por la corriente de aire, se suman los flujos másicos de cada papel y se multiplica por el área del sector de salida que es representado por un papel.

$$\dot{m}_s = \frac{A_T}{n_p} \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \dot{m}_{d,i} \quad \left(\frac{kg}{s} \right)$$

donde:

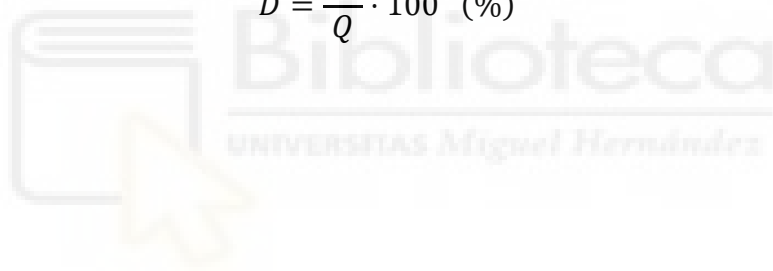
A_T es la sección de salida de la torre de refrigeración.

n_p es el número de papeles hidrosensibles.

\dot{m}_d es el gasto másico por unidad de superficie asociado a cada uno de los papeles expuestos.

Finalmente, el Real Decreto 487/2022 expresa la emisión de arrastre como el flujo másico que es arrastrado entre el caudal circulante en la instalación, en tanto por ciento:

$$D = \frac{\dot{m}_s}{Q} \cdot 100 \quad (\%)$$



2.5 Introducción de la información al software DRIFT[®]

Al ejecutar el software DRIFT[®], se muestra una interfaz muy sencilla e intuitiva (ver Figura 33).

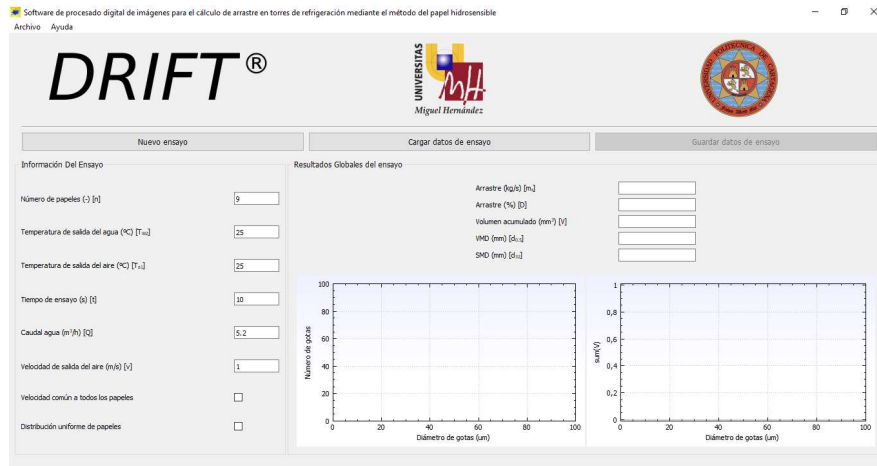


Figura 33. Interfaz del software DRIFT[®]

En primer lugar, es necesario introducir los parámetros que no varían de un ensayo a otro, como la sección de salida o el área de los papeles hidrosensibles. Para esto, se debe acceder a Archivo > Configuración Avanzada, donde se desplegará una ventana en la que se deben ingresar los datos que están señalados en rojo (ver Figura 34).

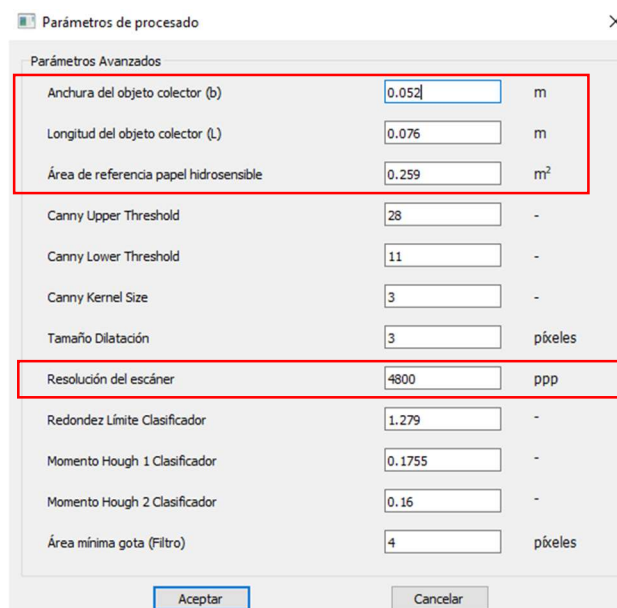


Figura 34. Parámetros avanzados

Luego, se ingresan los datos obtenidos por los instrumentos de medida durante la realización de los ensayos (ver Figura 35).

Figura 35. Información del ensayo

Mientras que parámetros como el número de papeles o tiempo de exposición son iguales en todos los ensayos, las temperaturas, velocidades o caudales varían según el ensayo. La casilla de “velocidad común en todos los papeles” no se activa, dado que en cada papel se ha tomado una velocidad diferente. La casilla de “distribución uniforme de papeles” sí se activa, ya que los sectores en los que está dividida la sección de salida son iguales.

Por último, se introduce la velocidad de cada sector junto a su papel (ver Figura 36).

Figura 36. Información de cada papel

En la parte superior aparecen tantos papeles como hemos especificado en “Información del ensayo”. Para introducir el papel, se debe clicar donde se indica (ver Figura 37) y buscar el archivo .bmp en la carpeta donde ha sido guardado.

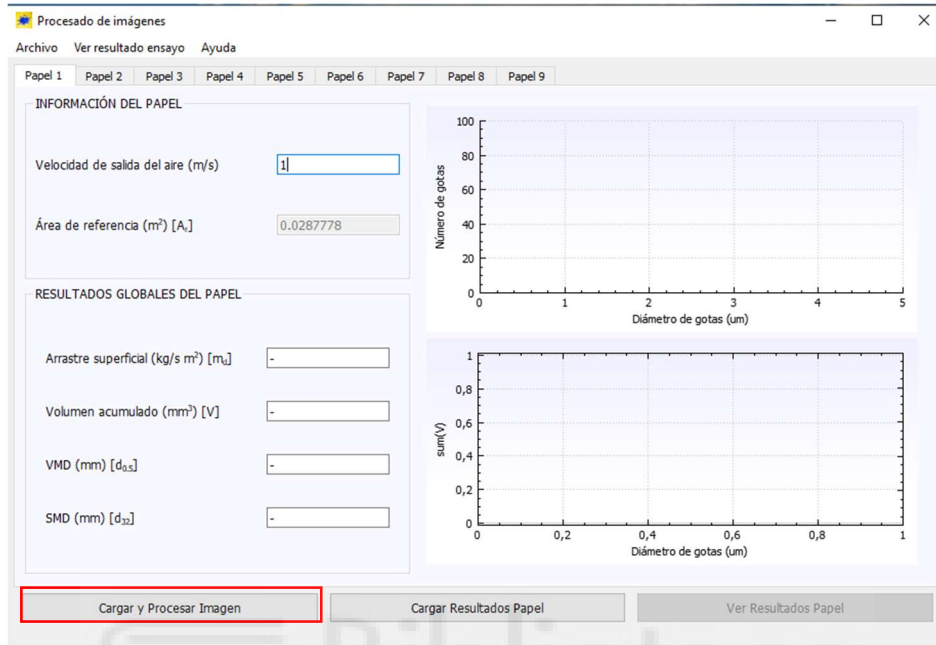


Figura 37. Insertar imagen de los papeles en DRIFT®

Este proceso se repite con los nueve papeles hidrosensibles del ensayo. Con esta información, el software es capaz de proporcionar los resultados finales de arrastre del ensayo.



CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Introducción

En este capítulo “Resultados”, se presentan los resultados obtenidos de las cinco pruebas realizadas en cada uno de los tres ensayos. Cada ensayo ha sido realizado con una velocidad de ventilador distinta (25, 37,5 y 50 Hz) y ha sido utilizado el separador de gotas de lamas sinusoidal. Los resultados han sido obtenidos a partir de la metodología anteriormente descrita.



3.2 Resultados de los ensayos

A continuación, se mostrará la siguiente información para cada prueba realizada:

- La ficha de datos con toda la información relativa a las condiciones de exposición de los papeles hidrosensibles (temperaturas, humedad relativa, caudal, etc.).
- Los mapas de velocidades y de arrastre de cada sector a la salida de la torre de refrigeración.
- Los mapas de velocidad y arrastre para representar gráficamente los valores a la salida de la torre de refrigeración.
- Los histogramas que representan el número de gotas según su tamaño y la curva de volumen acumulado según el diámetro de las gotas.
- Las imágenes escaneadas de los papeles hidrosensibles utilizadas en el programa para calcular el arrastre.
- Los valores obtenidos tras el procesado de los datos, como el arrastre, el volumen acumulado, el arrastre en tanto por ciento, etc.

3.2.1 Ensayo velocidad 25 Hz

El primer ensayo realizado en la torre de refrigeración se utilizó el variador de frecuencia para modificar la frecuencia del ventilador a 25 Hz. En este ensayo se realizaron 5 pruebas:

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	25 Hz – Prueba 1

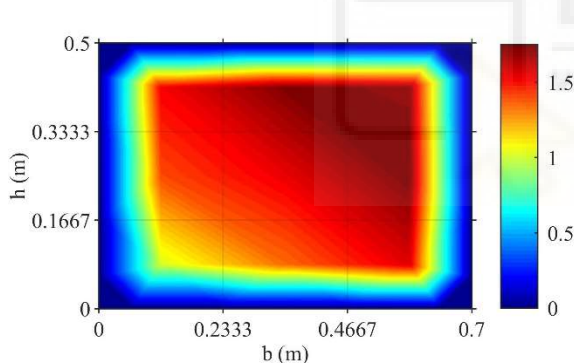
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,644	Arrastre (kg/s)	0,000128
Humedad relativa (%)	51,991	Vol. Acumulado (mm ³)	176,605
Temp. salida aire (°C)	26,074	VMD (mm)	0,0401
Temp. entrada agua (°C)	22,206	SMD (mm)	0,0387
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,0127

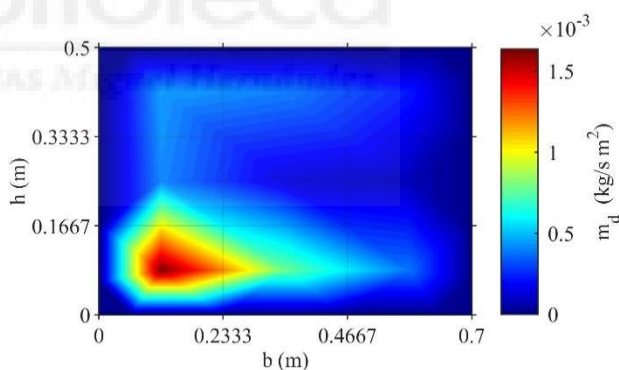
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	1,532	1,738	1,716	4,402	3,839	2,300
	2	5	8	1,392	1,553	1,752	3,984	1,280	0,804
	3	6	9	1,015	1,336	1,573	16,365	7,792	3,819
	ESTE			Vel. media: 1,512 m/s					

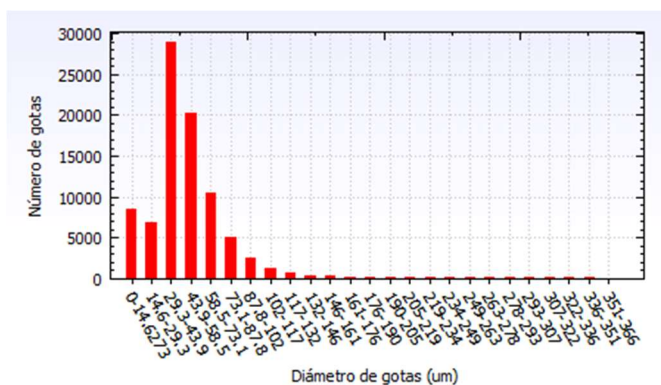
FIGURAS



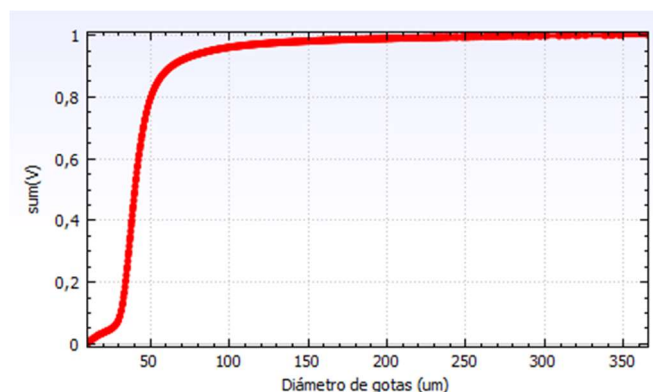
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 10. Datos y resultados de la 1a prueba a 25 Hz



Figura 38. Papeles hidrosensibles de la 1a prueba a 25 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	25 Hz – Prueba 2

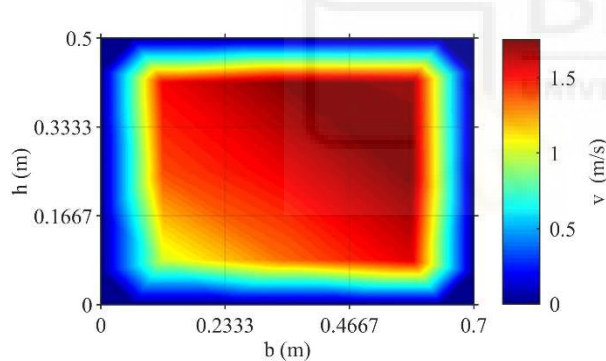
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,431	Arrastre (kg/s)	0,000120
Humedad relativa (%)	59,336	Vol. Acumulado (mm ³)	164,745
Temp. salida aire (°C)	25,420	VMD (mm)	0,0426
Temp. entrada agua (°C)	23,103	SMD (mm)	0,0380
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,0126

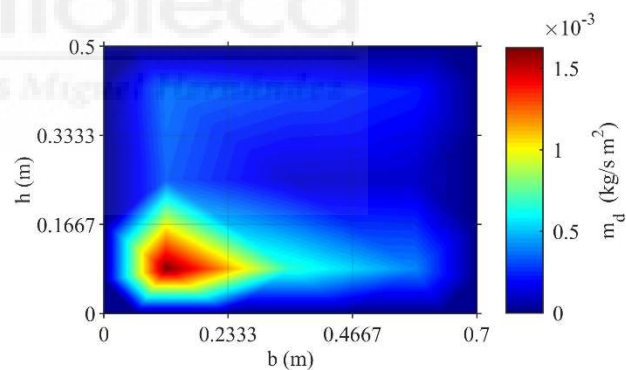
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
	SUR	1	4	7	1,532	1,738	1,716	3,776	2,984
2		5	8	1,392	1,553	1,752	3,325	1,162	1,036
3		6	9	1,015	1,336	1,573	16,254	6,644	4,115
	ESTE			Vel. media: 1,512 m/s					

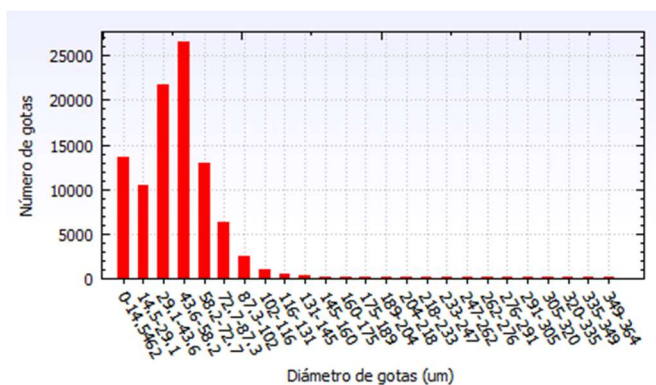
FIGURAS



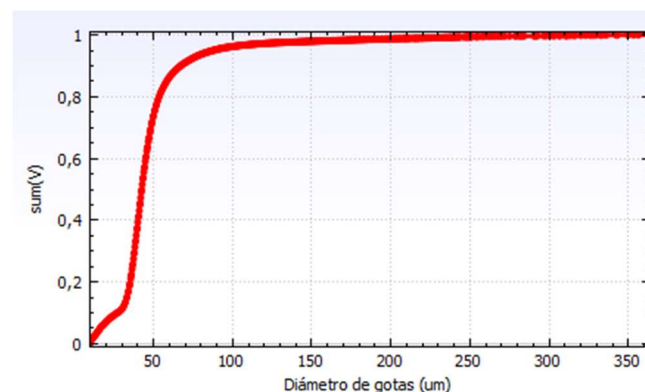
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 11. Datos y resultados de la 2a prueba a 25 Hz



Figura 39. Papeles hidrosensibles de la 2a prueba a 25 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	25 Hz – Prueba 3

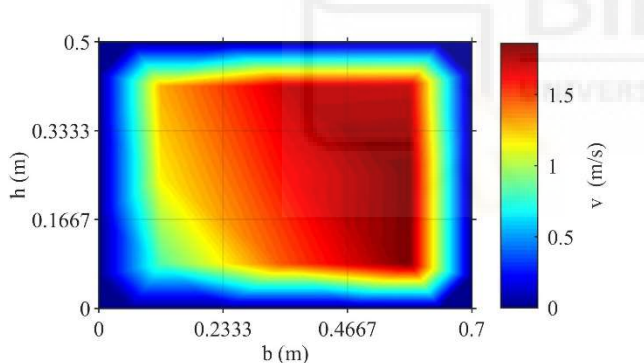
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,355	Arrastre (kg/s)	0,000142
Humedad relativa (%)	54,470	Vol. Acumulado (mm ³)	195,113
Temp. salida aire (°C)	24,723	VMD (mm)	0,0434
Temp. entrada agua (°C)	23,074	SMD (mm)	0,0403
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,0152

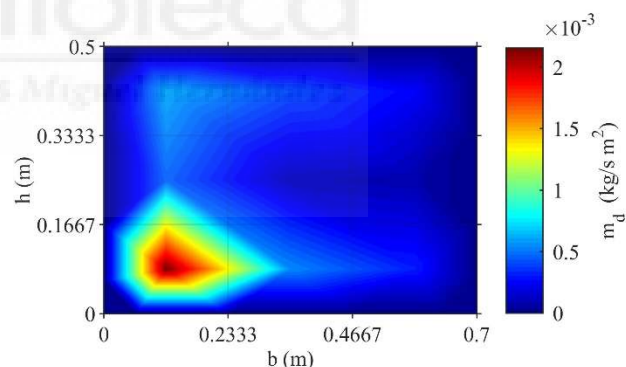
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
	SUR	1	4	7	1,298	1,714	1,729	6,144	4,083
2		5	8	1,175	1,600	1,856	4,570	1,117	0,777
3		6	9	0,842	1,467	1,861	21,546	5,442	3,110
	ESTE			Vel. media: 1,505 m/s					

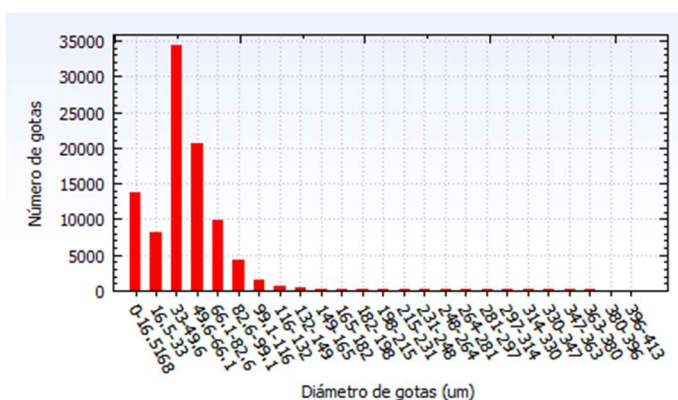
FIGURAS



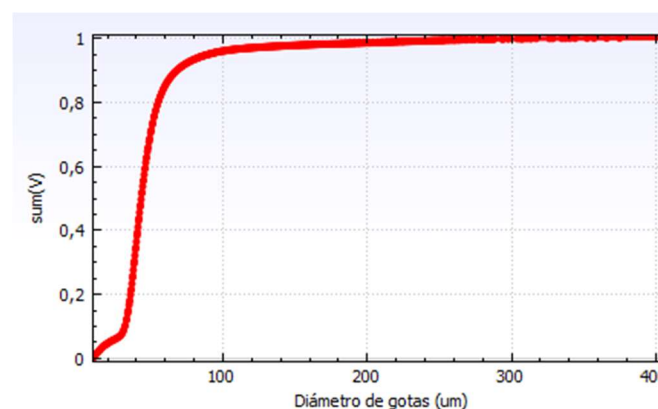
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 12. Datos y resultados de la 3a prueba a 25 Hz



Figura 40. Papeles hidrosensibles de la 3a prueba a 25 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	25 Hz – Prueba 4

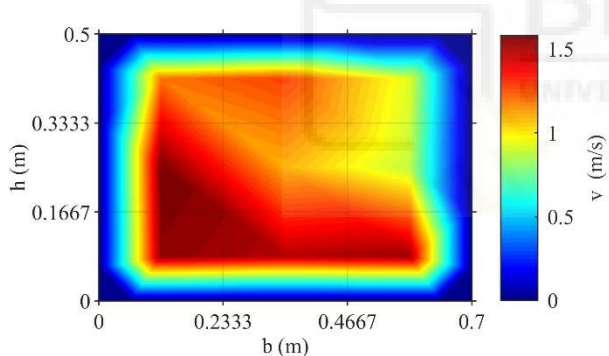
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,798	Arrastre (kg/s)	0,000118
Humedad relativa (%)	39,518	Vol. Acumulado (mm ³)	162,577
Temp. salida aire (°C)	24,996	VMD (mm)	0,0399
Temp. entrada agua (°C)	25,015	SMD (mm)	0,0393
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,0112

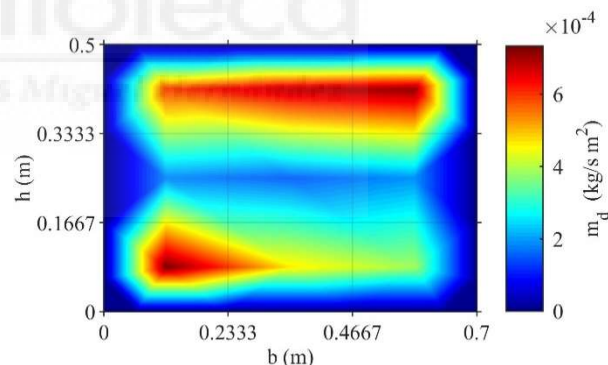
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	1,188	1,273	0,933	5,900	6,812	7,149
	2	5	8	1,580	1,097	0,879	1,834	1,529	1,923
	3	6	9	1,549	1,487	1,523	7,329	4,649	3,889
	ESTE			Vel. media: 1,279 m/s					

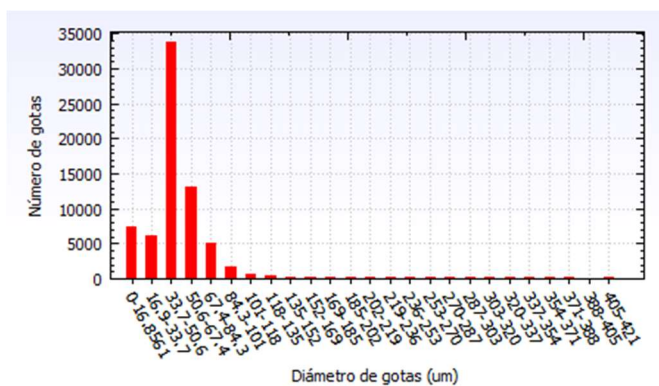
FIGURAS



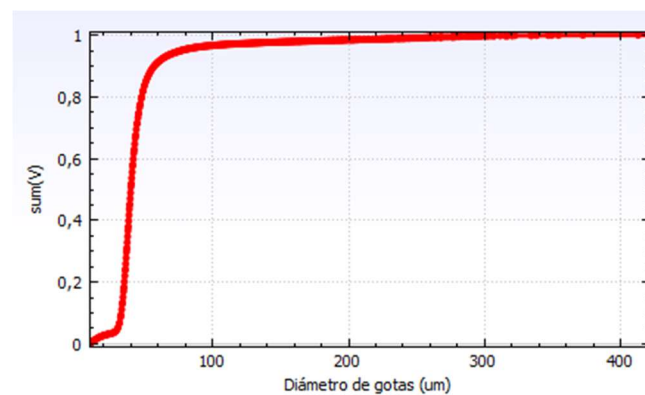
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 13. Datos y resultados de la 4a prueba a 25 Hz



Figura 41. Papeles hidrosensibles de la 4a prueba a 25 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	25 Hz – Prueba 5

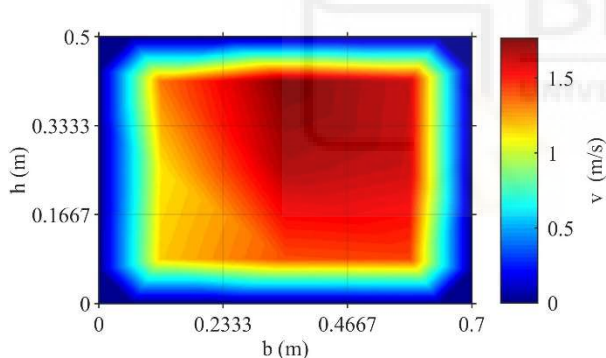
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,659	Arrastre (kg/s)	0,000103
Humedad relativa (%)	35,378	Vol. Acumulado (mm ³)	142,362
Temp. salida aire (°C)	27,095	VMD (mm)	0,0392
Temp. entrada agua (°C)	24,728	SMD (mm)	0,0391
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,0102

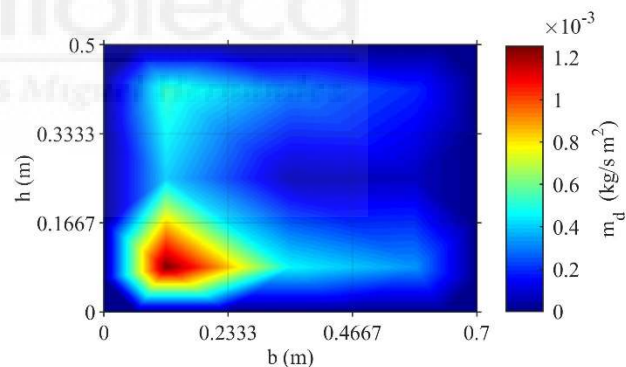
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
	SUR	1	4	7	1,324	1,766	1,630	5,235	3,079
2		5	8	1,126	1,674	1,620	3,968	0,572	0,699
3		6	9	1,181	1,397	1,420	12,528	4,558	3,346
	ESTE			Vel. media: 1,460 m/s					

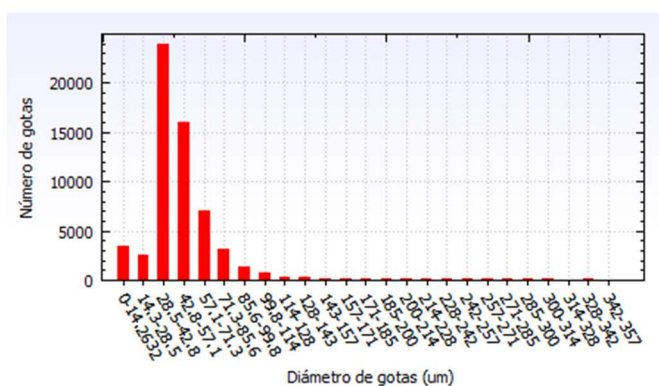
FIGURAS



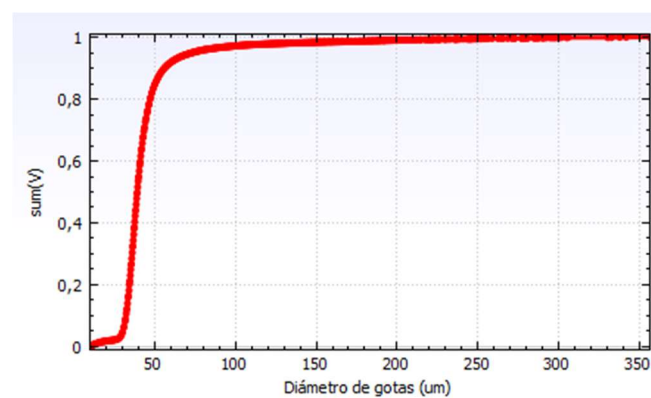
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 14. Datos y resultados de la 5a prueba a 25 Hz



Figura 42. Papeles hidrosensibles de la 5a prueba a 25 Hz

Las gráficas que se muestran a continuación contienen todos los valores de arrastre y velocidad del aire que se han medido en cada papel durante el ensayo a 25 Hz (ver Figura 43 y 44). Estas gráficas permiten observar la variación de datos entre las diferentes pruebas realizadas. Además, se ha añadido la media para facilitar la observación de los picos de arrastre y velocidad.

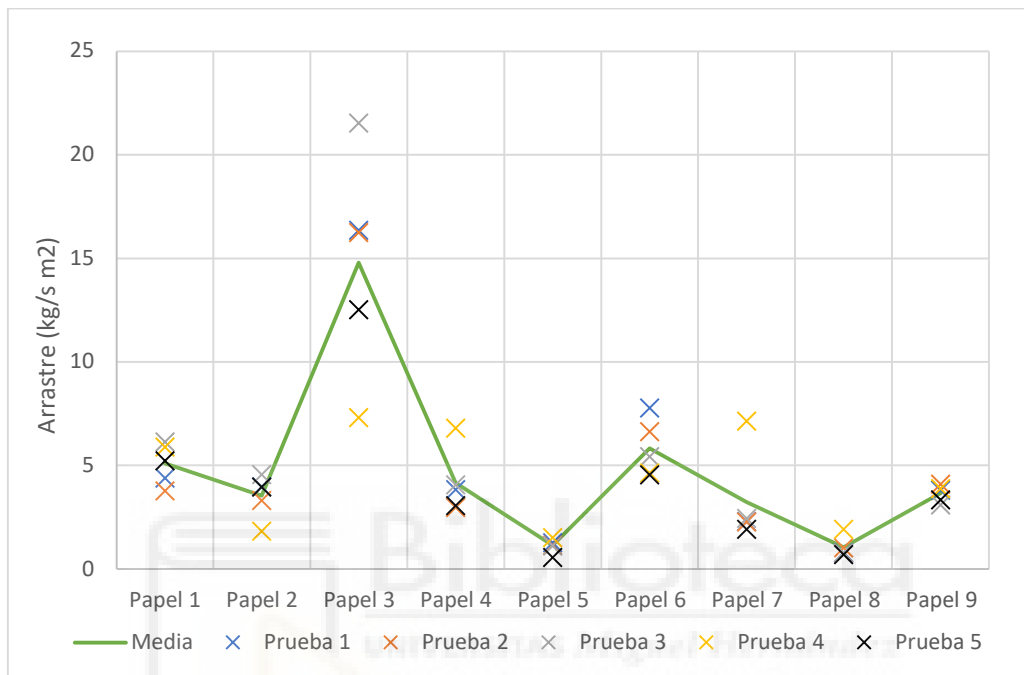


Figura 43. Variación del arrastre medido en cada papel a 25 Hz

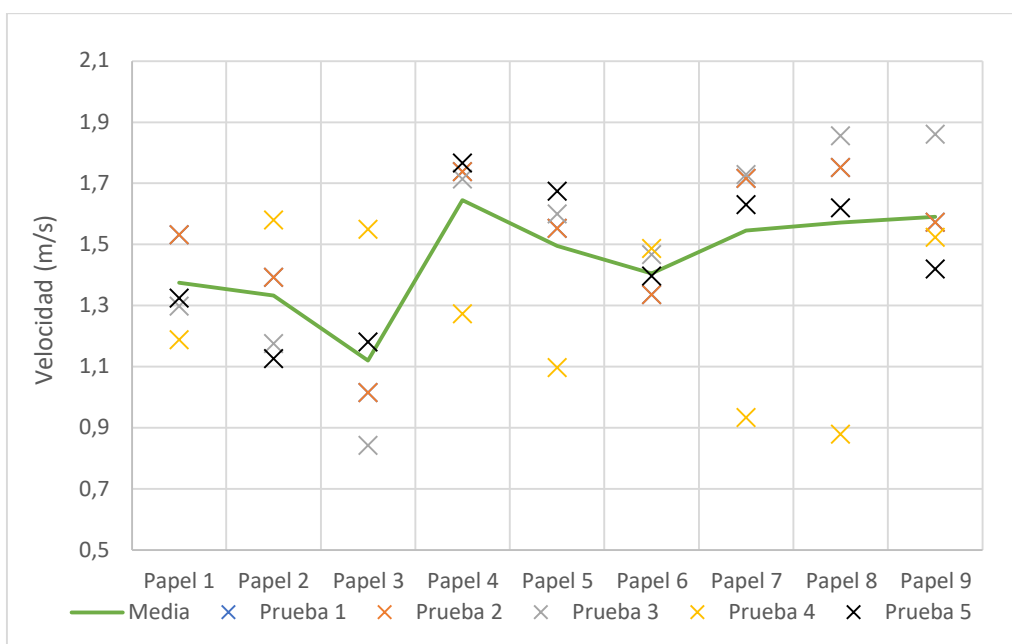


Figura 44. Variación de la velocidad medido en cada papel a 25 Hz

Datos a destacar tras la comparación de las gráficas:

1. El papel 3 es la región donde se produce la mayor emisión de arrastre y, al mismo tiempo, la zona con la menor velocidad del flujo de aire.
2. En la prueba 4, se observan valores de velocidad del flujo de aire que son notablemente anómalos en comparación con los valores de otras pruebas. Esta variación puede deberse a las condiciones del viento que condicionan la entrada del aire a la torre de refrigeración.

Los resultados finales del arrastre del ensayo a 25 Hz son:

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
\dot{m}_s (kg/s)	0,000128	0,000120	0,000142	0,000118	0,000103
D (%)	0,0127	0,0126	0,0152	0,0112	0,0102

Tabla 15. Resultados finales del ensayo a 25 Hz

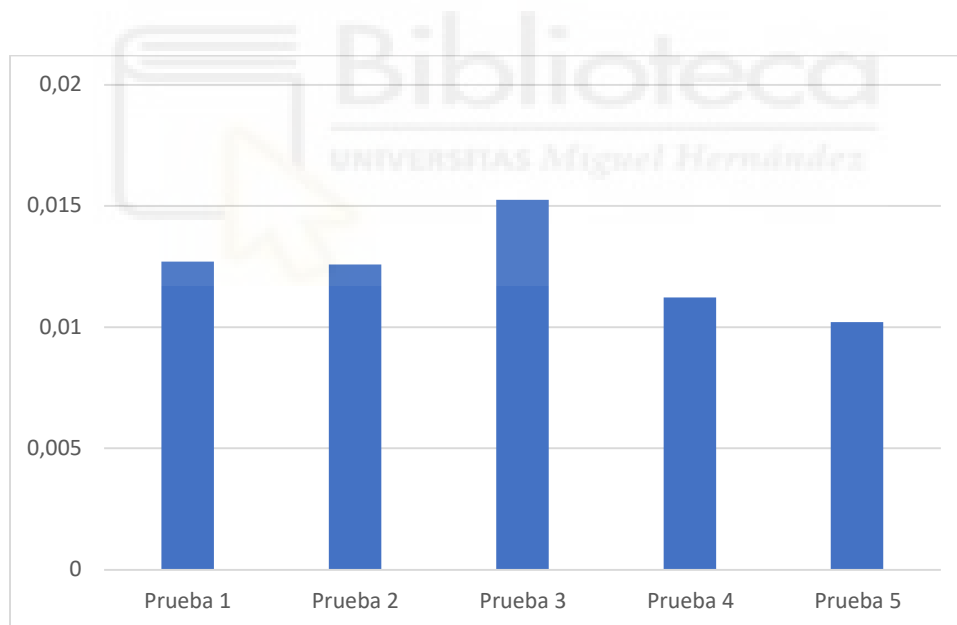


Figura 45. Gráfica de arrastre del ensayo a 25 Hz

3.2.2 Ensayo velocidad 37,5 Hz

El segundo ensayo realizado en la torre de refrigeración se utilizó el variador de frecuencia para modificar la frecuencia del ventilador a 37,5 Hz. En este ensayo se realizaron 5 pruebas:

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	37,5 Hz – Prueba 1

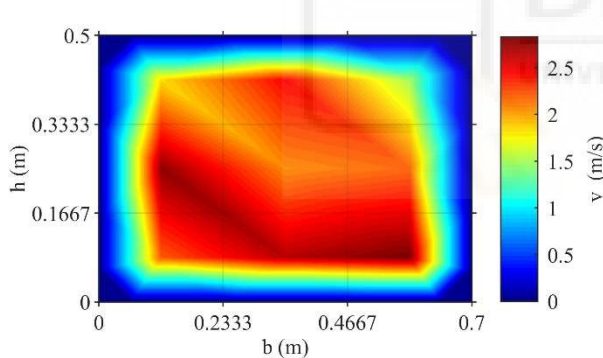
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,864	Arrastre (kg/s)	1,863 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	37,523	Vol. Acumulado (mm ³)	66,395
Temp. salida aire (°C)	21,163	VMD (mm)	0,0374
Temp. entrada agua (°C)	20,623	SMD (mm)	0,0355
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,004504

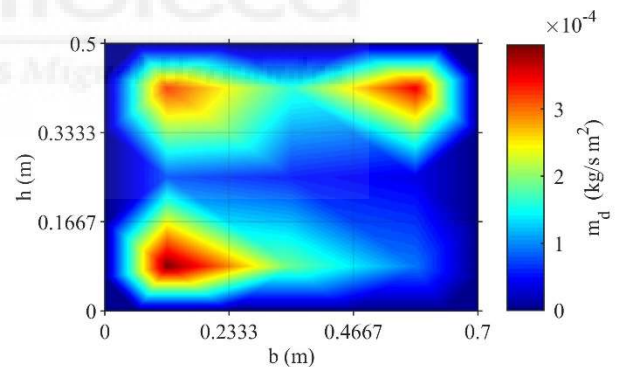
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	1,843	2,454	1,497	3,205	1,616	3,479
	2	5	8	2,764	2,071	2,185	0,782	0,551	0,379
	3	6	9	2,27	2,662	2,831	3,955	1,867	0,933
	ESTE			Vel. media: 2,27 m/s					

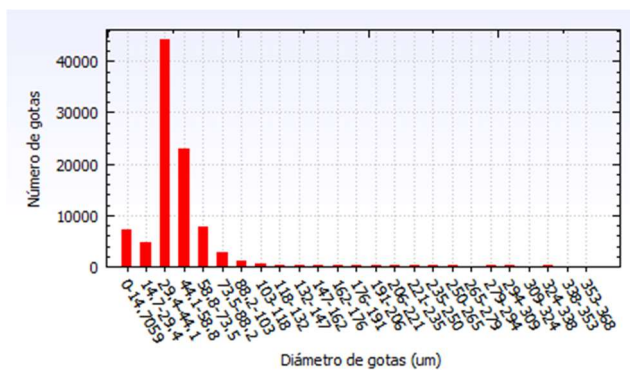
FIGURAS



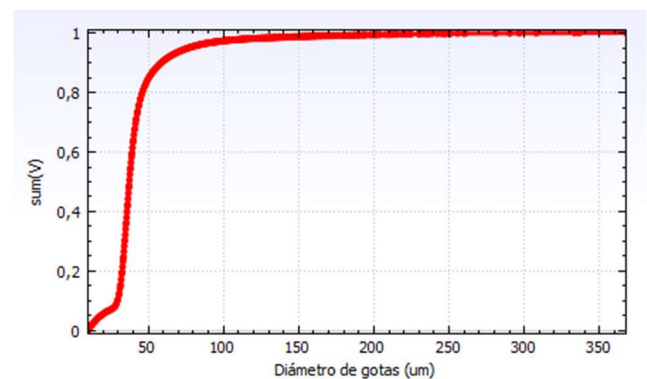
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 16. Datos y resultados de la 1a prueba a 37,5 Hz



Figura 46. Papeles hidrosensibles de la 1a prueba a 37,5 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	37,5 Hz – Prueba 2

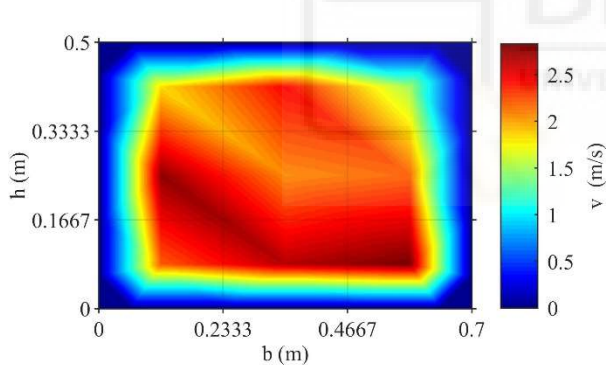
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,779	Arrastre (kg/s)	1,835 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	37,663	Vol. Acumulado (mm ³)	65,389
Temp. salida aire (°C)	24,289	VMD (mm)	0,0363
Temp. entrada agua (°C)	20,909	SMD (mm)	0,0356
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,004536

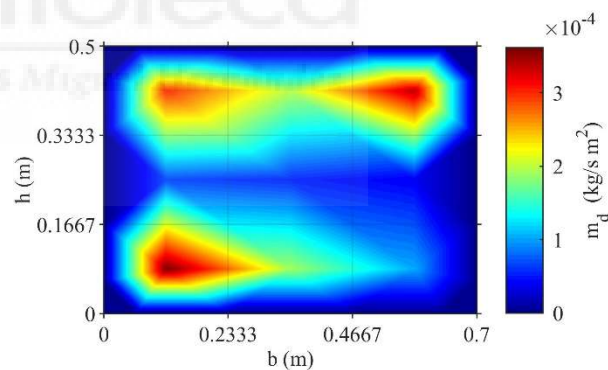
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	1,843	2,454	1,497	2,993	1,979	3,383
	2	5	8	2,764	2,071	2,185	0,666	0,546	0,389
	3	6	9	2,27	2,662	2,831	3,615	1,913	1,028
	ESTE			Vel. media: 2,27 m/s					

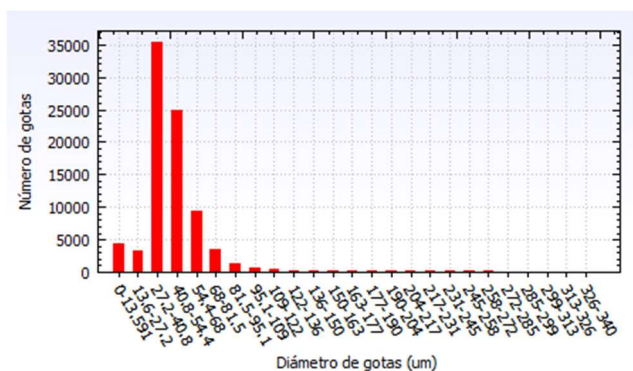
FIGURAS



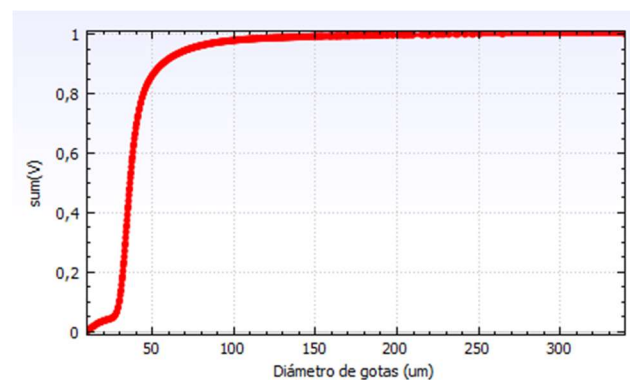
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 17. Datos y resultados de la 2a prueba a 37,5 Hz



Figura 47. Papeles hidrosensibles de la 2a prueba a 37,5 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	37,5 Hz – Prueba 3

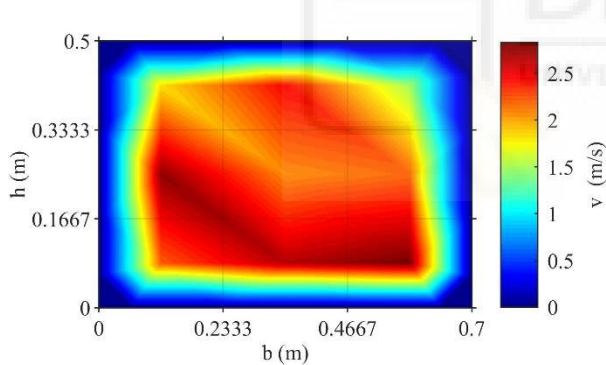
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,719	Arrastre (kg/s)	2,246 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	30,989	Vol. Acumulado (mm ³)	80,044
Temp. salida aire (°C)	23,642	VMD (mm)	0,0350
Temp. entrada agua (°C)	21,643	SMD (mm)	0,0347
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,005641

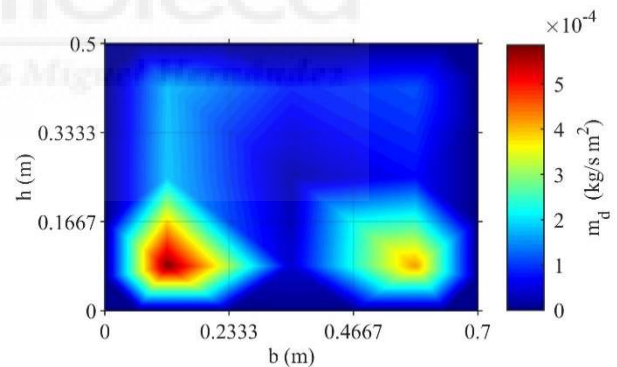
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	1,843	2,454	1,497	3,690	2,080	3,483
	2	5	8	2,764	2,071	2,185	0,987	0,641	0,428
	3	6	9	2,27	2,662	2,831	5,798	2,006	1,099
	ESTE			Vel. media: 2,27 m/s					

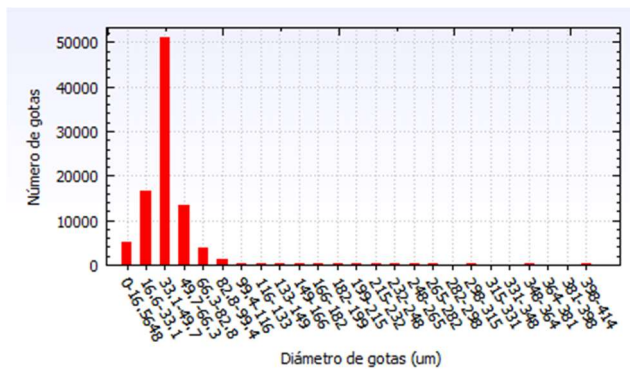
FIGURAS



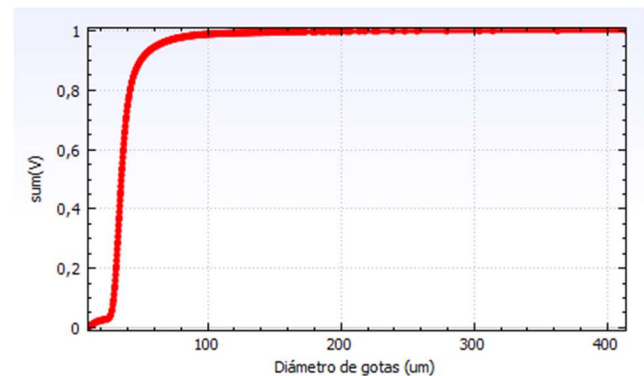
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 18. Datos y resultados de la 3a prueba a 37,5 Hz



Figura 48. Papeles hidrosensibles de la 3a prueba a 37,5 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	37,5 Hz – Prueba 4

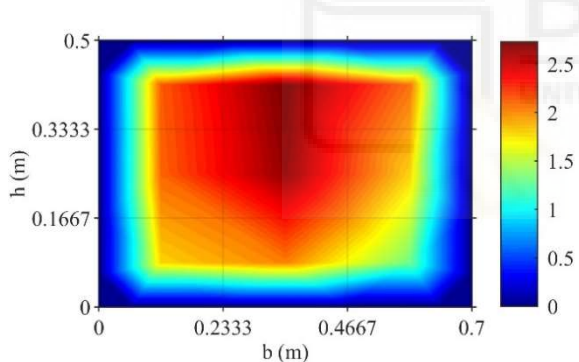
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,699	Arrastre (kg/s)	1,890 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	61,001	Vol. Acumulado (mm ³)	67,472
Temp. salida aire (°C)	29,076	VMD (mm)	0,0387
Temp. entrada agua (°C)	27,426	SMD (mm)	0,0369
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,004781

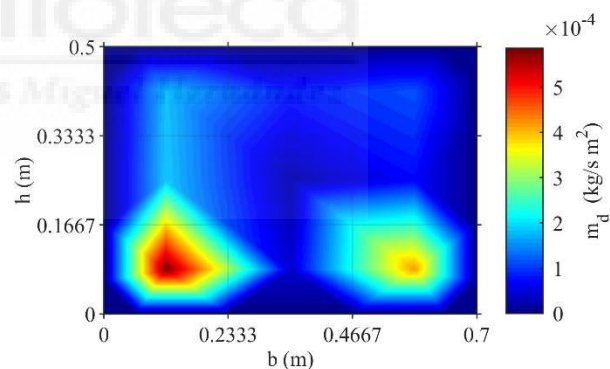
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	2,125	2,729	2,081	1,781	0,839	1,155
	2	5	8	2,097	2,657	1,806	1,831	0,217	0,710
	3	6	9	1,798	2,021	1,321	5,863	0,415	4,201
	ESTE			Vel. media: 2.070 m/s					

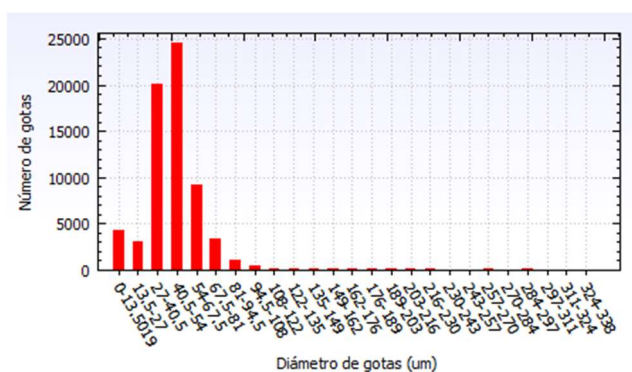
FIGURAS



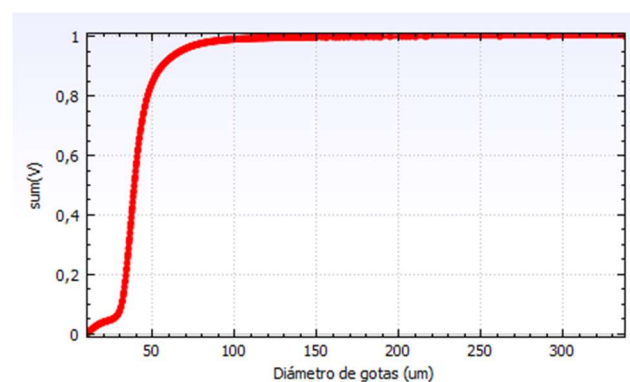
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 19. Datos y resultados de la 4a prueba a 37,5 Hz



Figura 49. Papeles hidrosensibles de la 4a prueba a 37,5Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	37,5 Hz – Prueba 5

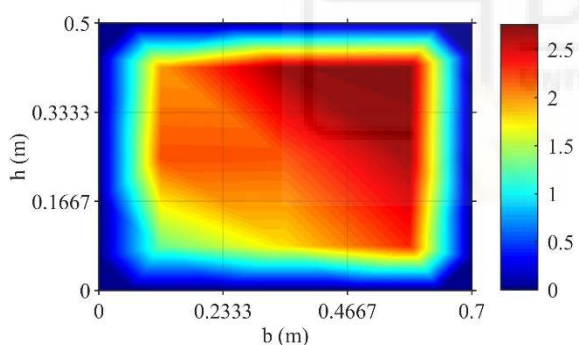
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,645	Arrastre (kg/s)	2,417 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	61,464	Vol. Acumulado (mm ³)	86,270
Temp. salida aire (°C)	28,566	VMD (mm)	0,0396
Temp. entrada agua (°C)	27,387	SMD (mm)	0,0378
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,006205

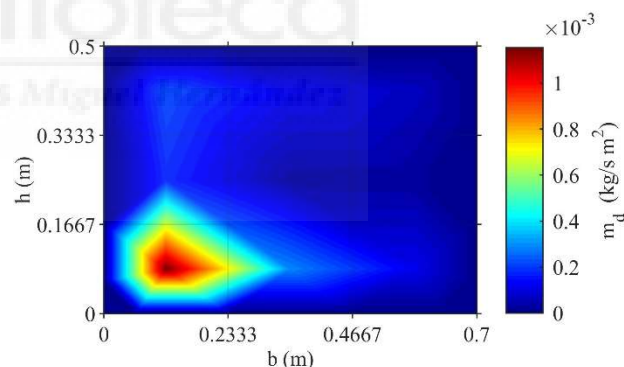
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
	SUR	1	4	7	1,980	2,708	2,760	2,187	1,138
2		5	8	2,185	2,176	2,657	1,727	0,259	0,227
3		6	9	1,324	1,779	2,301	11,535	2,876	1,164
ESTE			Vel. media: 2.208 m/s						

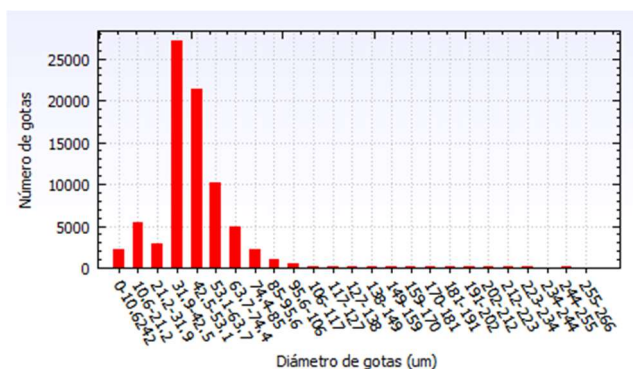
FIGURAS



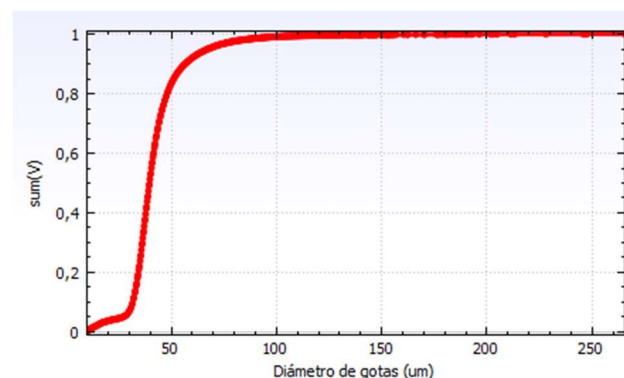
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 20. Datos y resultados de la 5a prueba a 37,5 Hz



Figura 50. Papeles hidrosensibles de la 5a prueba a 37,5 Hz

Como se ha realizado en el ensayo a 25 Hz, a continuación, se muestran las gráficas que contienen todos los valores de arrastre y velocidad del aire que se han medido en cada papel durante el ensayo a 37,5 Hz (ver Figura 51 y 52).

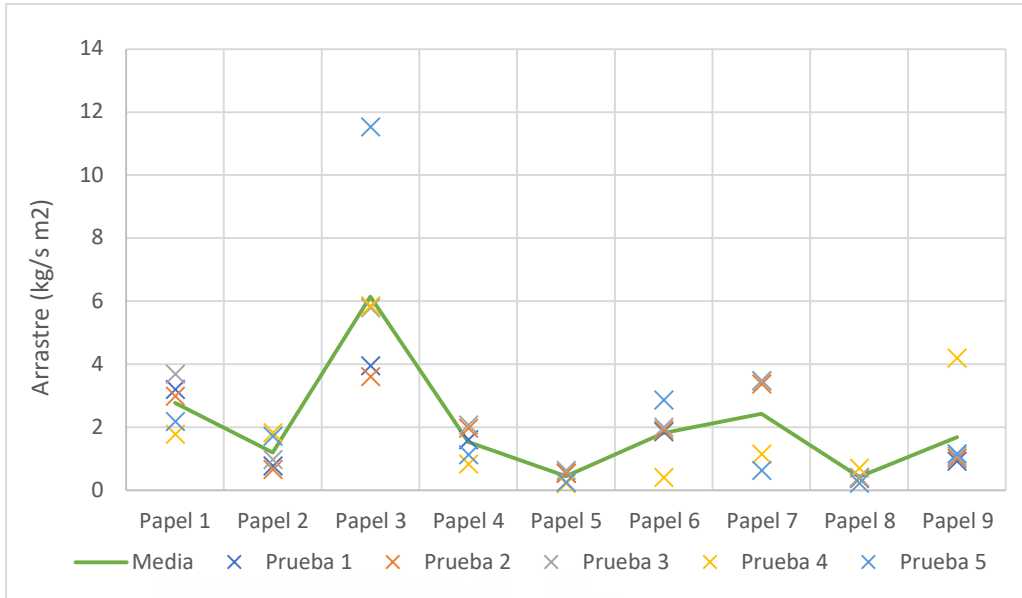


Figura 51. Variación del arrastre medido en cada papel a 37,5 Hz

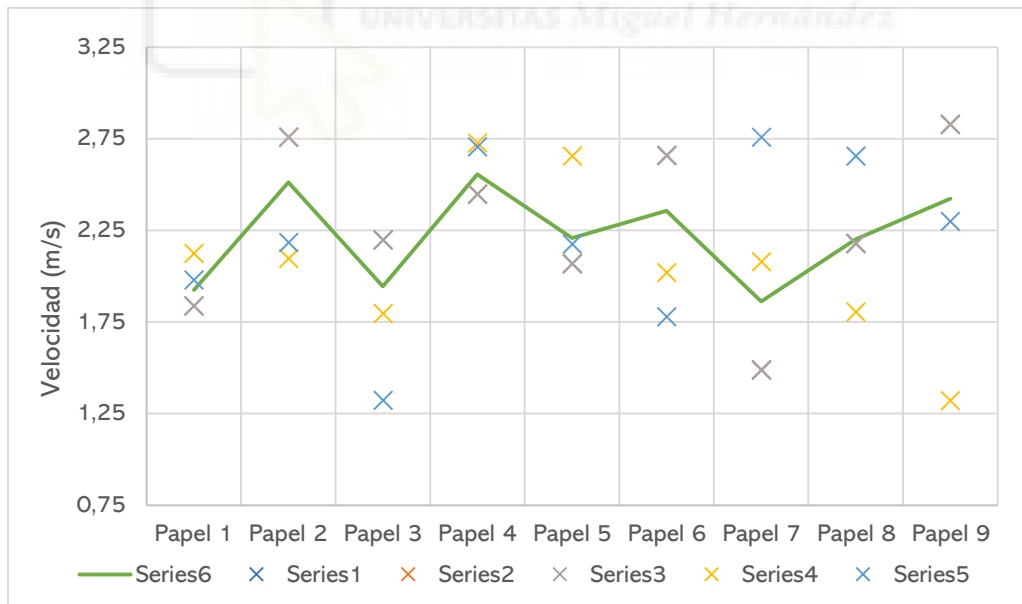


Figura 52. Variación de la velocidad medido en cada papel a 37,5 Hz

Datos que destacar tras la comparación de las gráficas:

1. El papel 3 sigue siendo el que captura mayor emisión de arrastre.
2. La velocidad medida en los papeles 3 y 9, anómalamente bajas, ha resultado en un aumento del arrastre en comparación con el resto de las pruebas.

Los resultados finales del arrastre del ensayo a 37,5 Hz son:

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
\dot{m}_s (kg/s)	0,000186	0,000184	0,000225	0,000189	0,000242
D (%)	0,00450	0,00454	0,00564	0,00478	0,00621

Tabla 21. Resultados finales del ensayo a 37,5 Hz

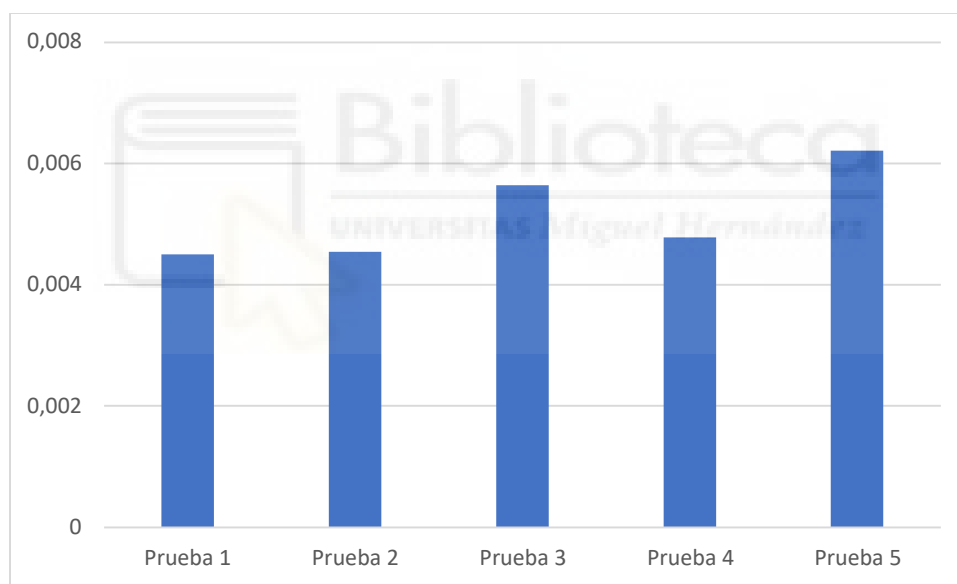


Figura 53. Gráfica de arrastre del ensayo a 37,5 Hz

3.2.2 Ensayo velocidad 50 Hz

El último ensayo realizado en la torre de refrigeración, el ventilador se conectó directamente a la red, por lo que operó a una frecuencia de 50 Hz. En este ensayo se realizaron 5 pruebas:

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	50 Hz – Prueba 1

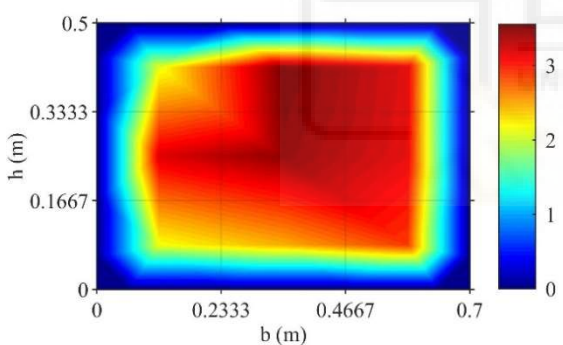
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,789	Arrastre (kg/s)	9,549 · 10 ⁻⁵
Humedad relativa (%)	40,981	Vol. Acumulado (mm ³)	34,033
Temp. salida aire (°C)	24,151	VMD (mm)	0,0373
Temp. entrada agua (°C)	21,252	SMD (mm)	0,0341
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,002355

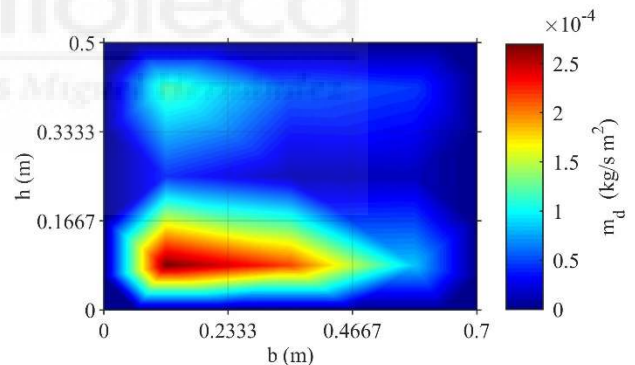
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	2,132	3,554	3,192	1,189	0,571	0,464
	2	5	8	3,192	3,478	3,167	0,409	0,118	0,137
	3	6	9	2,172	2,476	2,884	2,697	2,162	0,848
	ESTE			Vel. media: 2.91 m/s					

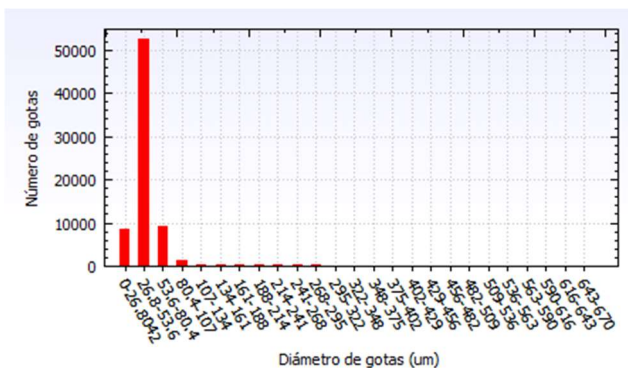
FIGURAS



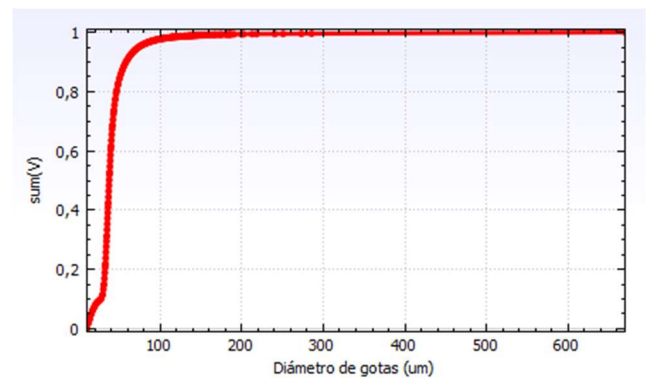
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 22. Datos y resultados de la 1a prueba a 50 Hz



Figura 54. Papeles hidrosensibles de la 1a prueba a 50 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	50 Hz – Prueba 2

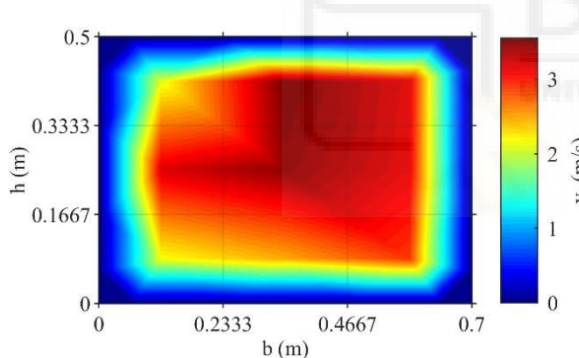
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3.613	Arrastre (kg/s)	1,193 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	31,871	Vol. Acumulado (mm ³)	42,516
Temp. salida aire (°C)	24.732	VMD (mm)	0,0356
Temp. entrada agua (°C)	22.559	SMD (mm)	0,0347
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,003084

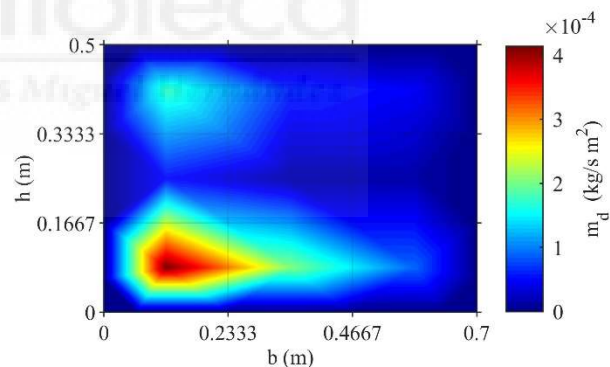
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	2,132	3,554	3,192	1,753	0,636	0,137
	2	5	8	3,192	3,478	3,167	0,517	0,131	0,137
	3	6	9	2,172	2,476	2,884	4,137	2,057	0,899
	ESTE			Vel. media: 2.91 m/s					

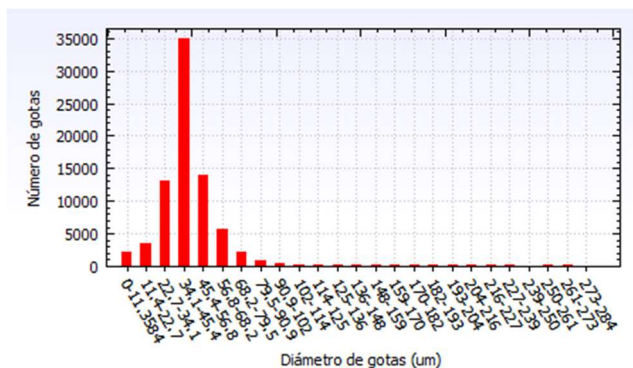
FIGURAS



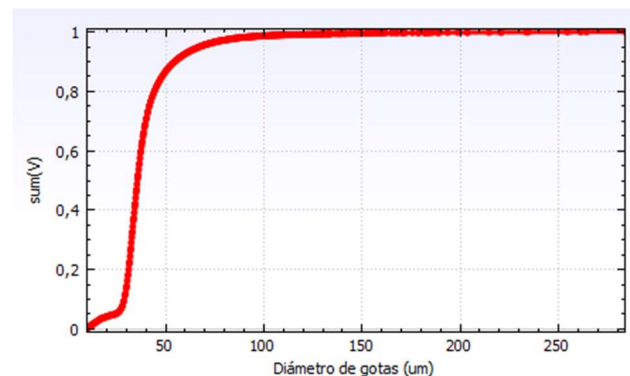
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 23. Datos y resultados de la 2a prueba a 50 Hz



Figura 55. Papeles hidrosensibles de la 2a prueba a 50 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	50 Hz – Prueba 3

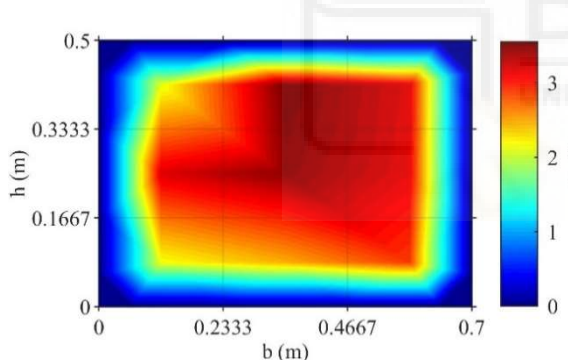
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,755	Arrastre (kg/s)	1,195 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	33,093	Vol. Acumulado (mm ³)	42,592
Temp. salida aire (°C)	25,436	VMD (mm)	0,0348
Temp. entrada agua (°C)	22,803	SMD (mm)	0,0341
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,002974

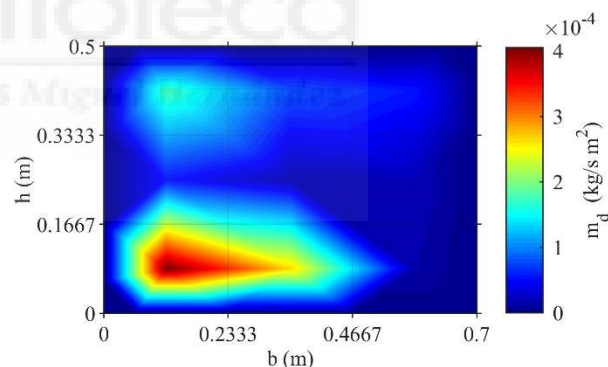
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	2,132	3,554	3,192	1,755	0,759	0,556
	2	5	8	3,192	3,478	3,167	0,517	0,141	0,188
	3	6	9	2,172	2,476	2,884	4,048	2,653	0,135
	ESTE			Vel. media: 2.91 m/s					

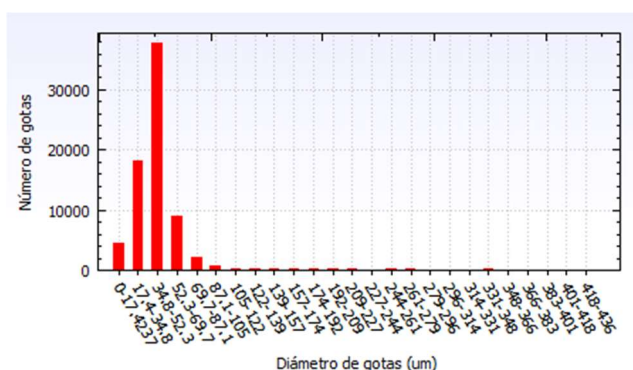
FIGURAS



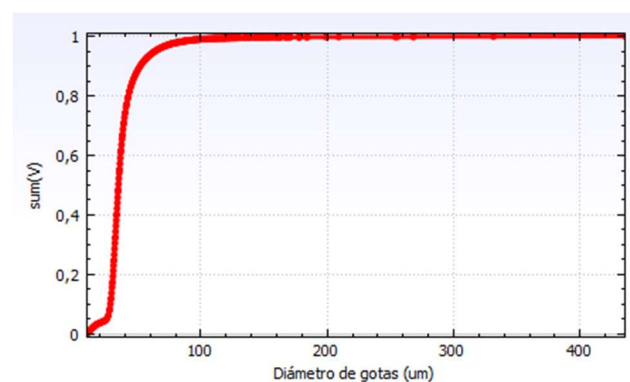
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 24. Datos y resultados de la 3a prueba a 50 Hz



Figura 56. Papeles hidrosensibles de la 3a prueba a 50 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	50 Hz – Prueba 4

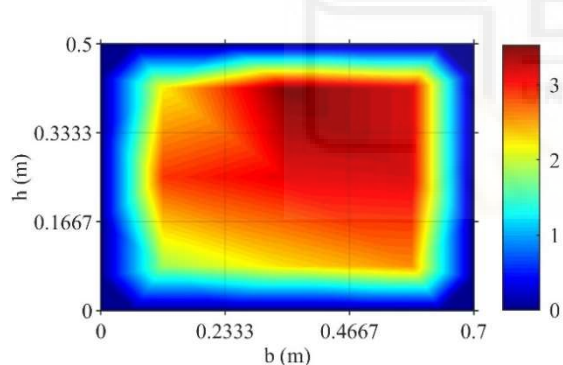
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,772	Arrastre (kg/s)	8,229 · 10 ⁻⁵
Humedad relativa (%)	62,782	Vol. Acumulado (mm ³)	29,372
Temp. salida aire (°C)	28,688	VMD (mm)	0,0378
Temp. entrada agua (°C)	27,187	SMD (mm)	0,0359
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,002042

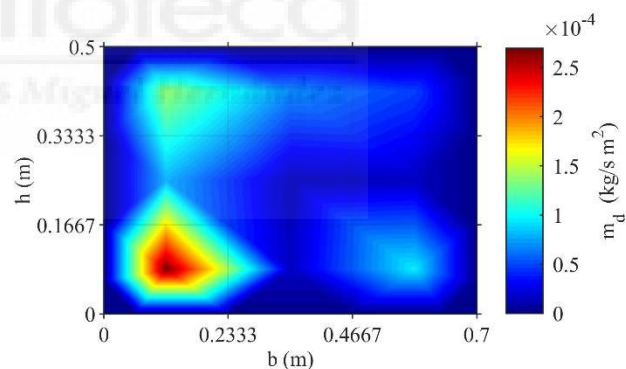
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
SUR	1	4	7	2,227	3,525	3,195	1,379	0,678	0,482
	2	5	8	2,871	3,148	3,191	0,777	0,125	0,157
	3	6	9	1,866	2,280	2,563	2,696	0,161	0,951
	ESTE			Vel. media: 2.763 m/s					

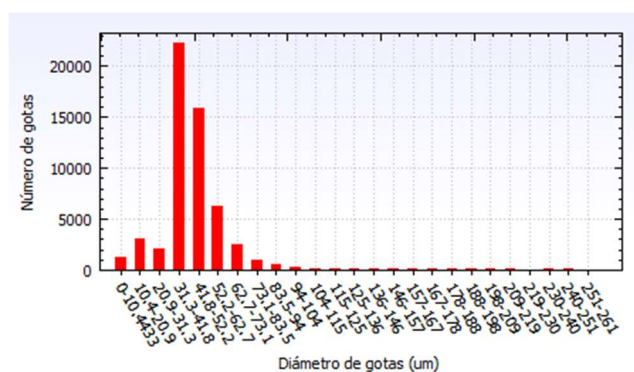
FIGURAS



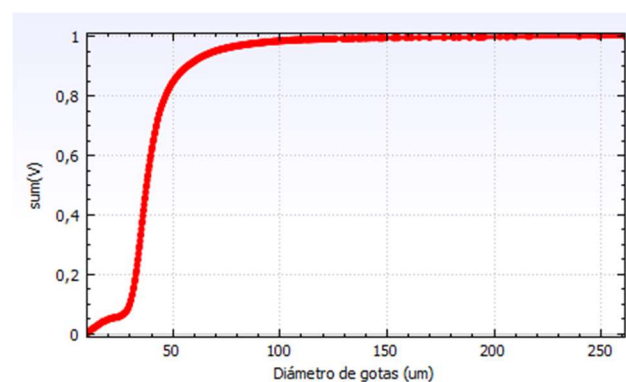
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 25. Datos y resultados de la 4a prueba a 50 Hz



Figura 57. Papeles hidrosensibles de la 4a prueba a 50 Hz

Separador gotas	ENSAYO
SEPARADOR DE LAMAS SINUSOIDAL	50 Hz – Prueba 5

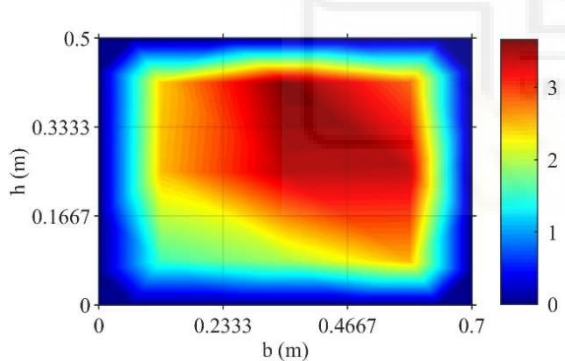
INFORMACIÓN DE PARTIDA Y RESULTADOS GLOBALES

Condiciones particulares del ensayo		Resultados globales	
Caudal (m ³ /h)	3,556	Arrastre (kg/s)	1,343 · 10 ⁻⁴
Humedad relativa (%)	62,661	Vol. Acumulado (mm ³)	47,957
Temp. salida aire (°C)	28,379	VMD (mm)	0,0369
Temp. entrada agua (°C)	27,365	SMD (mm)	0,0356
Tiempo exposición (s)	10	ARRASTRE (%)	0,003535

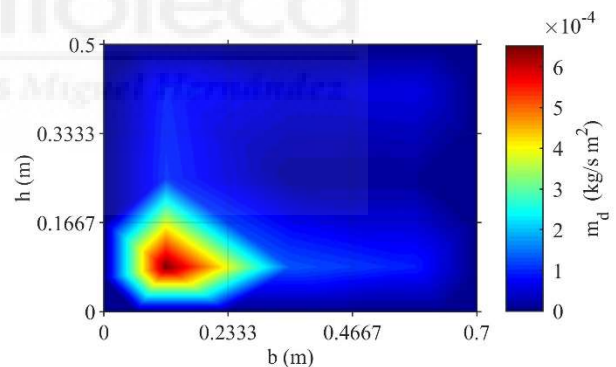
MAPAS

	Posición papeles			Velocidades (m/s)			Arrastre x 10 ⁴ (kg/s m ²)		
	SUR	1	4	7	2,432	3,664	2,834	0,946	0,527
2		5	8	2,497	3,443	3,428	1,048	0,144	0,100
3		6	9	1,596	1,958	2,532	6,514	1,308	0,943
	ESTE			Vel. media: 2.704 m/s					

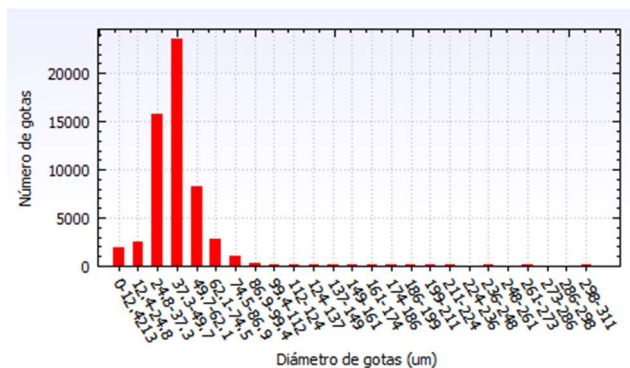
FIGURAS



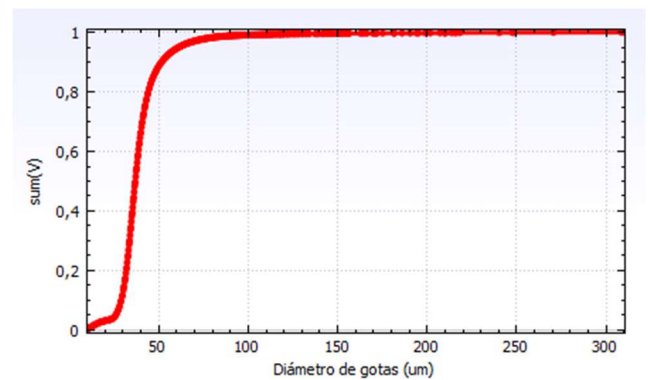
(a) Mapa de velocidades



(b) Mapa de arrastre



(c) Histograma de gotas



(d) Curva de volumen acumulado

Tabla 26. Datos y resultados de la 5a prueba a 50 Hz



Figura 58. Papeles hidrosensibles de la 5a prueba a 50 Hz

Como se ha realizado en los ensayos anteriores, a continuación, se muestran las gráficas que contienen todos los valores de arrastre y velocidad del aire que se han medido en cada papel durante el ensayo a 50 Hz (ver Figura 59 y 60).

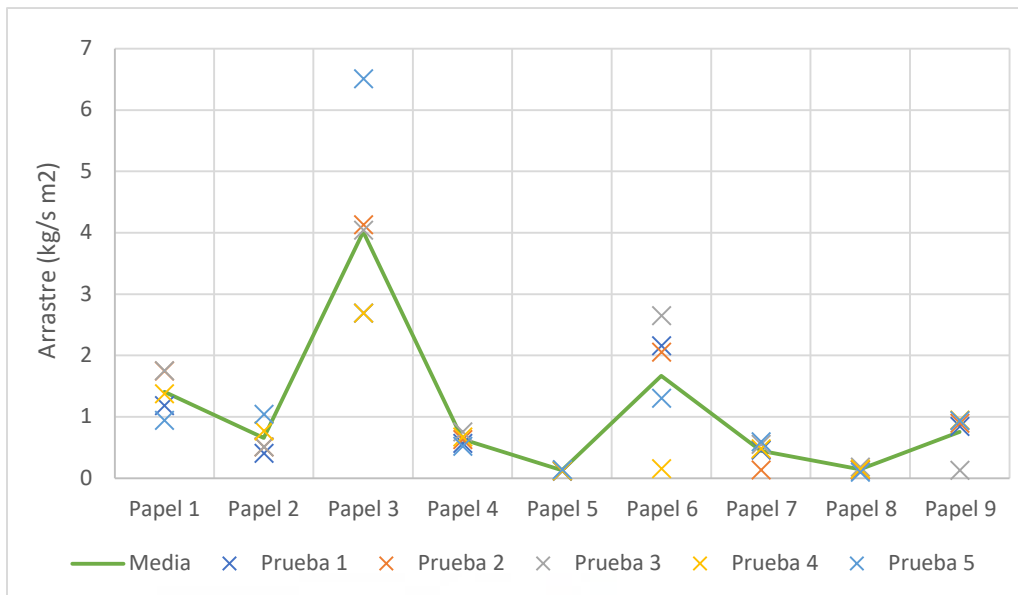


Figura 59. Variación del arrastre medido en cada papel a 50 Hz

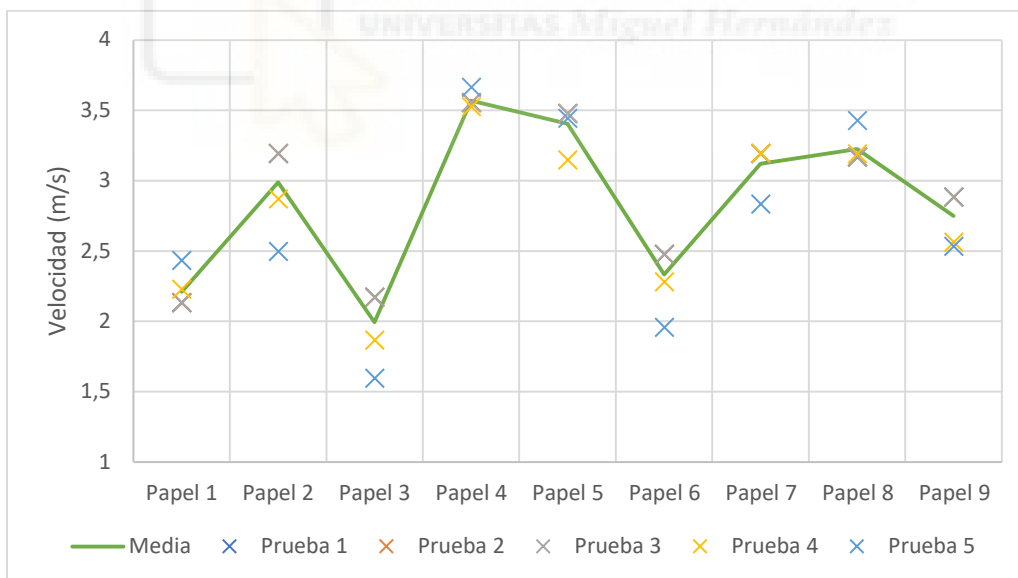


Figura 60. Variación de la velocidad medido en cada papel a 50 Hz

Datos que destacar tras la comparación de las gráficas:

1. El papel 3 es el sector donde se produce el mayor arrastre en todos los ensayos realizados.
2. Los papeles donde se ha medido mayor arrastre, muestran mayor variación entre los valores que el resto de papeles.

Los resultados finales del arrastre del ensayo a 50 Hz son:

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
\dot{m}_s (kg/s)	0,000095	0,000119	0,000120	0,000082	0,000134
D (%)	0,00236	0,00308	0,00297	0,00204	0,00354

Tabla 27. Resultados finales del ensayo a 50 Hz

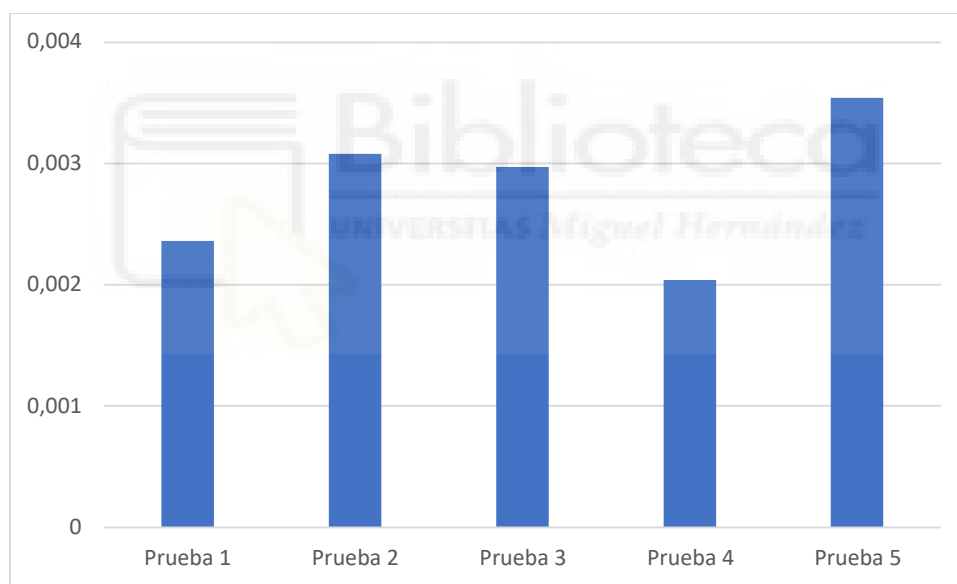


Figura 61. Gráfica de arrastre del ensayo a 50 Hz

3.2 Discusión

Después de obtener los resultados de los diferentes ensayos de arrastre, el objetivo es llevar a cabo un análisis comparativo con la intención de obtener conclusiones significativas.

En primer lugar, se observa que el arrastre de un mismo papel en los diferentes ensayos muestra repetitividad, lo que indica la obtención de valores muy similares entre las pruebas realizadas. Esta condición es fundamental para asegurar la fiabilidad y validez de los resultados.

En la tabla 28 que se muestra a continuación, se ha realizado la media de arrastre de los papeles situados en la misma posición del ensayo.

	Ensayo 25 Hz $\times 10^4$ (kg/s·m ²)	Ensayo 37,5 Hz $\times 10^4$ (kg/s·m ²)	Ensayo 50 Hz $\times 10^4$ (kg/s·m ²)
Papel 1	5,091	2,771	1,404
Papel 2	3,536	1,199	0,654
Papel 3	14,804	6,163	4,018
Papel 4	4,159	1,53	0,634
Papel 5	1,132	0,443	0,132
Papel 6	5,817	1,815	1,668
Papel 7	3,225	2,428	0,448
Papel 8	1,048	0,427	0,144
Papel 9	3,656	1,685	0,755

Tabla 28. Valores medios del arrastre en cada ensayo

De esta tabla se pueden sacar dos grandes conclusiones:

En primer lugar, el "papel 3" presenta un arrastre significativamente mayor que el resto de los papeles y si observamos la velocidad medida en este sector, nos damos cuenta de que es la más baja del flujo de aire.

La razón por la que el arrastre aumenta a menor velocidad se encuentra en el factor de eficiencia, ya que depende directamente del número de Stokes y por tanto de la velocidad.

$$Stk = \frac{\rho_g \cdot D_p^2 \cdot v \cdot C_c}{18 \cdot \mu_a \cdot L}$$

Cuando más pequeño es el valor del número de Stokes, el factor de eficiencia disminuye. Hay que recordar que el arrastre se calcula multiplicando la inversa de la eficiencia con los diámetros equivalentes de las gotas ($\sum D_G^3 \cdot \varepsilon^{-1} (mm^3)$).

En segundo lugar, se puede observar cómo los valores de arrastre son más bajos a medida que aumenta la velocidad de la corriente de aire. El ensayo a 25 Hz presenta los valores de arrastre más altos en todos los papeles, mientras que el ensayo a 50 Hz muestra los valores de arrastre más bajos.

La explicación a este hecho se puede observar en la Figura 62, que muestra cómo existe una velocidad del flujo de aire en la que se alcanza la tasa mínima de arrastre. Si la velocidad aumenta o disminuye desde ese punto, el arrastre aumenta.

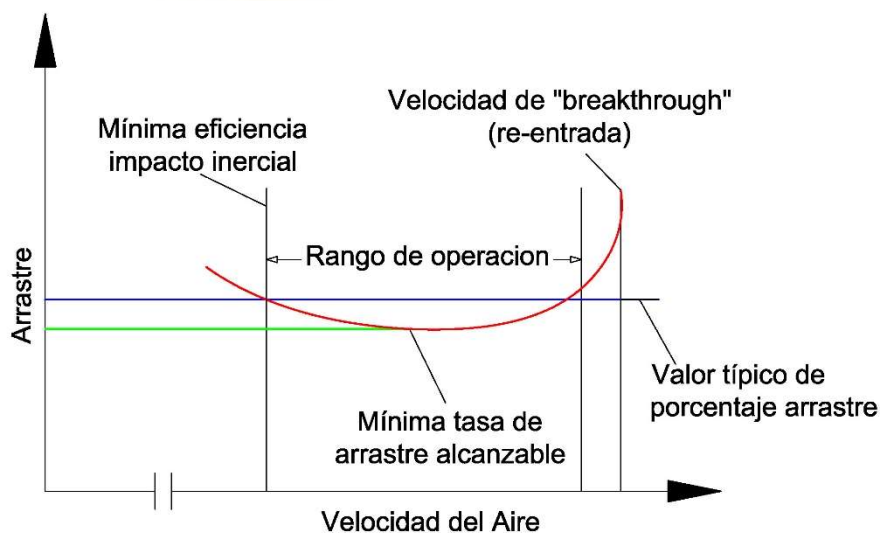


Figura 62. Gráfico de arrastre porcentual frente a velocidad de aire (Ruiz Ramírez J. , 2014)

En la Figura 63, se aprecia la curva experimental que hemos obtenido, representando el arrastre en relación con la velocidad del ventilador. En esta gráfica, no es apreciable el punto donde el arrastre es mínimo, lo que sugiere la posibilidad de que aumentar la velocidad del ventilador pueda resultar en una disminución del arrastre.

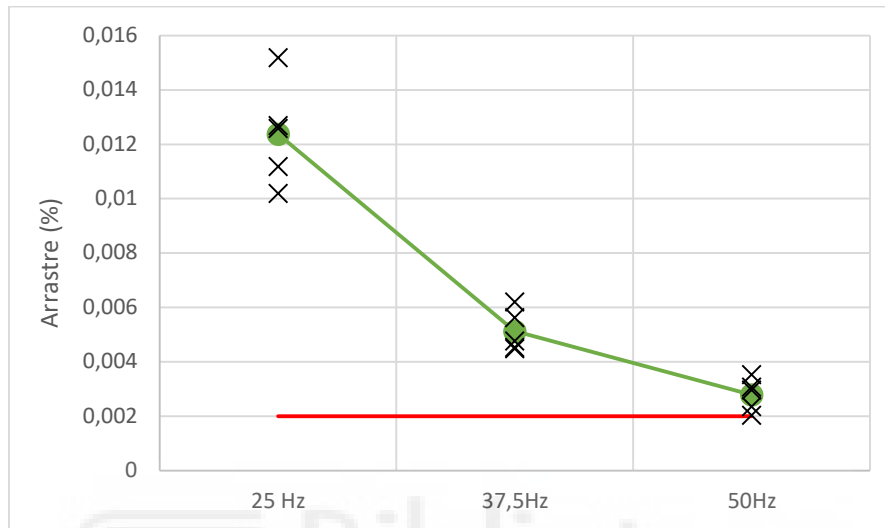


Figura 63. Gráfica de arrastre frente a velocidad del ventilador

	Ensayo 25 Hz	Ensayo 37,5 Hz	Ensayo 50 Hz
Arrastre (%)	0,01238	0,005134	0,002798

Tabla 29. Resultados finales de arrastre

Finalmente, para concluir, los resultados obtenidos en los ensayos muestran que la eficiencia del separador de gotas de lamas sinusoidal estudiado, no es suficiente para cumplir con el límite establecido de 0,002% del caudal circulante de la torre de refrigeración.



CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

Tras la publicación del Real Decreto 487/2022, de 21 de junio, que establece el límite de emisión máxima de arrastre permitida en torres de refrigeración en 0,002% del caudal circulante de la instalación, se propone llevar a cabo el estudio de un separador de gotas para calcular su eficiencia.

Las torres de refrigeración son sistemas ampliamente utilizados para disipar el calor debido a su eficiencia energética y capacidad de enfriamiento, en comparación con otros sistemas que no emplean procesos evaporativos. Sin embargo, en años recientes, se les ha culpado de causar brotes de la enfermedad de la legionelosis, lo que ha motivado a las autoridades a promover alternativas de refrigeración que no emitan aerosoles, aunque estas sean menos eficientes.

Por esta razón, se ha solicitado la evaluación de la eficiencia del separador de gotas de lamas sinusoidal, para determinar si cumple con la normativa actual. Estos sistemas se emplean para reducir la emisión de gotas al aire y así prevenir la propagación de la bacteria Legionela.

El estudio se llevó a cabo en la instalación ubicada en el edificio Torrepinet de la Universidad Miguel Hernández, la cual alberga una torre de refrigeración en la que se han realizado numerosos análisis para calcular la emisión arrastrada y modelar la deposición de partículas emitidas por la torre.

En este estudio se detallan todos los componentes utilizados en esta torre y los instrumentos de medición empleados para recopilar datos.

Actualmente, existen diversos métodos y técnicas para medir la emisión de arrastre producida por una torre de refrigeración, sin embargo, todas estas técnicas no son igual de fiables. En este estudio se eligió la técnica del papel hidrosensible, por ser un método con un bajo coste, fácil de realizar y fiable. Su funcionamiento se basa en la reacción química de su superficie al entrar en contacto con el agua, lo cual genera manchas.

En los ensayos realizados se probaron distintas velocidades del ventilador (25, 37,5 y 50 Hz) y se decidió exponer los papeles hidrosensibles al flujo de aire saliente de la torre durante 10 segundos para obtener la máxima información sin que las gotas se solaparan.

Tras finalizar los ensayos, se escanearon los papeles a alta resolución (4800 píxeles) para procesar digitalmente las imágenes mediante el software desarrollado por la Universidad Miguel Hernández, DRIFT[®], especializado en el reconocimiento de imágenes.

Los resultados obtenidos con este software fueron analizados para extraer conclusiones significativas. Se observó que, a menor velocidad del ventilador, mayor era la emisión de arrastre y un factor crucial para asegurar la fiabilidad del estudio fue la repetitividad de las pruebas.

Los valores obtenidos muestran, que ninguno de los ensayos con distintas velocidades del ventilador cumplió con el límite del 0,002% del caudal de agua circulante de la instalación. El ensayo a 50 Hz fue el que más se acercó, con una emisión media de arrastre del 0,0028%.

Por consiguiente, se puede concluir que el separador de gotas utilizado en las torres de refrigeración de lamas sinusoidal, con la velocidad del flujo de aire estudiada en este trabajo, no cumple con el Real Decreto 487/2022, que establece que la emisión arrastrada no debe exceder el 0,002% del caudal de agua circulante en la torre de refrigeración.

CAPÍTULO 5

BIBLIOGRAFÍA

1. Acebal, A. M. (2012). *Análisis experimental de la emisión de arrastre en una torre de refrigeración para un separador comercial con sistema de distribución por presión.*
2. Aynsley, & Carson. (1973). *Atmospheric effects of water cooling facilities. A summary.* United States.
3. Bellon Hernandez, O., & Benitez Ramirez, D. (2013). *Tecnificación de equipos de control y monitorización de material particulado para mejorar la calidad del aire en zonas de explotación de carbón en Boyacá.*
4. Canny, J. (1986). *A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, (6), 679-698.*
5. Escobar Villalobos, C. A. (2021). *Principales aspectos patogénicos, clínicos y de diagnóstico del género legionella.* (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Escuela de Tecnología Médica.).
6. García-Fulgueiras, A., Navarro, C., Fenoll, D., García, J., González-Diego, P., Jiménez-Buñuales, T., . . . Pelaz, C. (2003). *Legionnaires' disease outbreak in Murcia, Spain. Emerging infectious diseases, 9(8), 915–921.*
7. May, K. R., & Clifford, R. (1967). *The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs. Annals of Occupational Hygiene, 10(2), 83-95.*

8. Miralles, M. L. (2009). *Caracterización experimental del arrastre en torres de refrigeración (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Cartagena)*.
9. Pedersen, G. C., Lamkin, V. K., & Seich, M. (1987). *An economical solution to cooling tower drift (No. CONF-870250-)*. Cooling Tower Institute. Houston, TX.
10. Queremel, N., & Alfonso, R. (2001). *Estudio comparativo técnico económico entre sistema de condensación por agua y sistema de condensación por aire en plantas de generación de ciclos combinados (Doctoral dissertation)*.
11. *Real Decreto 487/2022, de 21 de junio, por el que se establecen los requisitos sanitarios para la prevención y el control de la legionelosis. Boletín Oficial del Estado, núm. 148, de 22 de junio de 2022.*
12. *Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Boletín Oficial del Estado, núm. 171, de 18 de julio de 2003.*
13. Ruiz Ramírez, J. (2014). *Caracterización experimental y modelización del binomio sistema de distribución-separador de gotas en torres de refrigeración.*
14. Ruiz Ramírez, J., Lucas Miralles, M., Martínez Beltrán, P. J., Sánchez Kaiser, A., Zamora Parra, B., & Viedma Robles, A. (2012). *Medida experimental del arrastre en torres de refrigeración; influencia del sistema de distribución.*
15. Solano Fernández, J. P., Martínez Beltrán, P. J., Viedma Robles, A., & Lucas Miralles, M. (2003). *Medida del arrastre en torres de refrigeración.*