

Trabajo Fin de Máster.



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Estudio de la emisión de gotas generadas en separadores de gota en torres de refrigeración.

Título: Máster Universitario en Energías Renovables.
Curso 2013/2014

Alumno: Salvador Rafael Jiménez Velázquez.

Tutores: Antonio Sánchez Kaiser.
Manuel Jiménez Buendía.

Cartagena, 4 de Septiembre de 2014

Contenido del Trabajo Fin de Máster:

Capítulo 1. Antecedentes.....	10
Capítulo 2. Introducción, estado del arte y objetivos.	15
2.1. Introducción.....	16
2.2. Estado del arte.....	17
2.3. Objetivos.....	21
Capítulo 3. Descripción de la instalación.	22
3.1. Instalación original.	23
3.1.1. Estructura de la torre experimental.....	23
3.1.2. Sección de ensayo. Separador de gotas.	25
3.1.3. Relleno.....	30
3.1.4. Sistema completo de la torre de refrigeración. Consideraciones adicionales.	31
3.1.5. Elementos auxiliares.....	31
3.1.6. Sistema de aporte de agua.	31
3.1.7. Sistema de generación del flujo de aire.	33
3.2. Propuestas de mejora.	34
3.2.1. Altura.....	35
3.2.2. Caudalímetro.	36
3.2.3. Variadores de frecuencia.	38
3.2.4. Cámara de alta definición.....	39
3.2.5. Generador de gotas.	40
3.2.6. Tarjeta de adquisición de datos.	41
3.2.7. Placa de relés.	42
3.3. Instalación mejorada.	43
3.4. Cálculo de la incertidumbre.	47
3.4.1. Incertidumbre típica combinada.....	48
3.4.2. Incertidumbre expandida.	49

3.4.3.	Cálculo de incertidumbre del hilo caliente.....	49
3.4.4.	Cálculo de incertidumbre del caudalímetro.....	51
Capítulo 4.	Diseño del sistema de control y adquisición de datos.....	53
4.1.	Descripción del proceso.....	54
4.2.	Descripción del software de adquisición de datos.....	55
4.2.1.	Diagrama de bloques.....	56
4.2.2.	Panel frontal.....	66
Capítulo 5.	Montaje y puesta en marcha de la instalación.....	69
Capítulo 6.	Toma de datos. Medidas.....	72
6.1.	Planificación de ensayos. Temporalización.....	73
6.1.1.	Calibración de la bomba.....	73
6.1.2.	Calibración del ventilador.....	76
6.1.3.	Calibración del caudalímetro.....	81
6.1.4.	Calibración del hilo caliente.....	82
6.2.	Presentación de resultados.....	83
6.2.1.	Ensayos de desprendimiento de gotas en el separador.....	83
6.2.1.1.	Introducción.....	83
6.2.1.2.	Procedimiento.....	84
6.2.1.3.	Resultados.....	86
6.2.1.4.	Imágenes.....	91
6.2.2.	Ensayos con el generador de agua.....	94
6.2.2.1.	Introducción.....	94
6.2.2.2.	Resultados.....	94
6.2.3.	Imágenes.....	99
Capítulo 7.	Conclusiones.....	102
7.1.	Conclusiones del estudio del desprendimiento de gotas en el separador.....	103
7.2.	Conclusiones del estudio del generador de gotas.....	106
Capítulo 8.	Referencias.....	109

Índice de ilustraciones del Trabajo Fin de Máster:

Ilustración 1: Dimensiones de la estructura.....	24
Ilustración 2: Canalización (vista lateral y vista frontal).....	24
Ilustración 3: Dimensiones de la placa que forman el separador de gotas (vista lateral).	25
Ilustración 4: Dimensiones de la placa que forman el separador de gotas (vista frontal).	26
Ilustración 5: Vista de la sección de ensayo sin las partes que forman el separador.....	27
Ilustración 6: Superficie A de la sección de ensayo (donde se sitúan las agarraderas)..	28
Ilustración 7: Superficie B de la sección de ensayo.	28
Ilustración 8: Sección de ensayo real colocada en la torre.	29
Ilustración 9: Sistema de inyección de agua.....	30
Ilustración 10: Sistema de inyección en la instalación experimental.	30
Ilustración 11: Esquema de la instalación experimental.	31
Ilustración 12: Especificaciones técnicas de la bomba.....	32
Ilustración 13: Ventilador centrífugo.	34
Ilustración 14: Distribución y denominación de los puntos en la sección de la torre. ...	35
Ilustración 15: Alturas h_1 , h_2 y h_3 en el separador de gotas.....	35
Ilustración 16: Diagrama de bloques del caudalímetro.	37
Ilustración 17: Caudalímetro.	37
Ilustración 18: Variador de frecuencia de la instalación.	39
Ilustración 19: Cámara de alta definición.....	40
Ilustración 20: Generador de gotas.....	41
Ilustración 21: Tarjeta de adquisición de datos.	42
Ilustración 22: Placa de relés instalada.....	43
Ilustración 23: Imágenes de la instalación ya equipada con las mejoras.....	44
Ilustración 24: Tarjeta de adquisición de datos con la placa de relés instalada.....	44
Ilustración 25: Variadores de frecuencia instalados.	45
Ilustración 26: Depósito y bomba instalados.....	45
Ilustración 27: Ventilador instalado.	46
Ilustración 28: Caudalímetro instalado.....	46
Ilustración 29: Programa LabVIEW.....	54
Ilustración 30: Ventana de LabVIEW Project.....	55
Ilustración 31: Ventana de “loading” del programa de control.....	55
Ilustración 32: Diagrama de bloques.....	56
Ilustración 33: Flat Sequence Structure.....	57
Ilustración 34: Constantes booleana, numérica y String.	58

Ilustración 35: While Loop.....	58
Ilustración 36: Wait (ms).....	59
Ilustración 37: Marcha paro motores.....	59
Ilustración 38: Configuración salidas digitales.	59
Ilustración 39: Controladores booleanos.	60
Ilustración 40: Salidas de tensión.	60
Ilustración 41: Configuración salidas analógicas.	61
Ilustración 42: Controladores numéricos.....	61
Ilustración 43: Sensores.....	62
Ilustración 44: Configuración de las entradas analógicas.	62
Ilustración 45: Merge Signals.....	63
Ilustración 46: Tendencias.....	63
Ilustración 47: Merge Errors.....	64
Ilustración 48: Stop Button.....	64
Ilustración 49: OR.	64
Ilustración 50: Reset myRIO.	65
Ilustración 51: Error out.	65
Ilustración 52: Panel frontal.	66
Ilustración 53: Error out en el panel frontal.	67
Ilustración 54: Controladores Booleanos en el panel frontal.	67
Ilustración 55: Stop Button en el panel frontal.....	67
Ilustración 56: Controladores numéricos en el panel frontal.....	68
Ilustración 57: Tendencias en el panel frontal.....	68
Ilustración 58: Caudal vs Frecuencia en la bomba.	74
Ilustración 59: Frecuencia vs Caudal en la bomba.	75
Ilustración 60: Resultados de los ensayos de calibración de la bomba.	76
Ilustración 61: Velocidad vs Frecuencia en el ventilador.....	78
Ilustración 62: Frecuencia vs Velocidad en el ventilador.....	78
Ilustración 63: Resultados de los ensayos de calibración del ventilador.....	81
Ilustración 64: Factor K vs Caudal en el caudalímetro.	82
Ilustración 65: Regresión de ajuste del hilo caliente.	83
Ilustración 66: Localización de las posiciones para el cálculo de las velocidades VLE, VLC y VLS.....	84
Ilustración 67: Localización de las posiciones P1 y P2.....	85
Ilustración 68: Localización de las posiciones P3.	85
Ilustración 69: Localización de las posiciones P4, P5 y P6.....	86
Ilustración 70: Distribución y denominación de los puntos en las secciones de la torre.	88
Ilustración 71: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la entrada del separador.	90
Ilustración 72: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la salida del separador.	91

Ilustración 73: Arrastre en la entrada del separador para el caudal Q2 de 4,5 L/(min·m) (VLE = 2,15 m/s).....	92
Ilustración 74: Arrastre en la entrada del separador para el caudal Q5 de 10,68 L/(min·m) (VLE = 3 m/s).....	92
Ilustración 75: Arrastre en la zona intermedia del separador para el caudal Q2 de 4,5 L/(min·m) (VLE = 9,9 m/s).....	92
Ilustración 76: Arrastre en la zona intermedia del separador para el caudal Q5 de 10,68 L/(min·m) (VLE = 9,5 m/s).....	93
Ilustración 77: Arrastre en la salida del separador para el caudal Q2 de 4,5 L/(min·m) (VLE = 11 m/s).....	93
Ilustración 78: Arrastre en la salida del separador para el caudal Q5 de 10,68 L/(min·m) (VLE = 11,6 m/s).....	93
Ilustración 79: Velocidades de los diferentes ensayos.	95
Ilustración 80: Tamaños de gota de los diferentes ensayos.....	96
Ilustración 81: Imágenes de los distintos experimentos realizados.	101
Ilustración 82: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la entrada del separador.	105
Ilustración 83: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la salida del separador.	105
Ilustración 84: Velocidades de las gotas formadas en el generador.	106
Ilustración 85: Tamaños de las gotas formadas en el generador.	107

Índice de tablas del Trabajo Fin de Máster:

Tabla 1: Características necesarias para el ventilador.	34
Tabla 2: Tabla de caudales máximos para el caudalímetro.	37
Tabla 3: Resultados de la calibración de la bomba.	74
Tabla 4: Resultados de la calibración del ventilador.	77
Tabla 5: Valores usados para la calibración del caudalímetro.	82
Tabla 6: Rango de frecuencia del ventilador para las velocidades límite de desprendimiento.	87
Tabla 7: Velocidades límite tomadas en la entrada al separador a partir de las cuales comienza a observarse arrastre de gotas para distintas posiciones y caudales.	88
Tabla 8: Valores de velocidades límite de desprendimiento para los caudales Q_2' y Q_5'	88
Tabla 9: Velocidades obtenidas en los distintos ensayos.	94
Tabla 10: Radio de las gotas de los diferentes ensayos.	95
Tabla 11: Estudio de diferentes casos experimentales.	97
Tabla 12: Observaciones a los resultados de los ensayos.	98
Tabla 13: Rango de frecuencia del ventilador para las velocidades límite de desprendimiento.	104
Tabla 14: Velocidades límite tomadas en la entrada al separador a partir de las cuales comienza a observarse arrastre de gotas para distintas posiciones y caudales.	104
Tabla 15: Velocidades de las gotas formadas en el generador.	106
Tabla 16: Radio de las gotas formadas en el generador.	107

Capítulo 1.

Antecedentes.

1. Antecedentes.

La existencia de las torres de refrigeración surge de la necesidad de evacuar energía al ambiente. El segundo principio de la termodinámica exige la presencia de un sumidero térmico para el funcionamiento tanto de las máquinas térmicas, como de las máquinas frigoríficas. Además, los procesos industriales evacuan calor al ambiente para mantener sus condiciones de funcionamiento dentro de los límites de diseño.

Las alternativas prácticas que se pueden convertir en sumideros térmicos son el aire atmosférico y las masas de agua naturales. Los intercambiadores de calor aerorrefrigerados son soluciones que se emplean hoy día para múltiples aplicaciones, cediendo calor sensible directamente al aire atmosférico. La cesión de calor a una corriente de agua natural se empleó en el pasado ampliamente. Sin embargo, razones de índole económico, por el coste creciente del uso del agua justificado por su escasez, y consideraciones medioambientales relacionadas con la modificación del ecosistema aguas abajo de la instalación han restado importancia al empleo de masas de agua naturales como sumideros térmicos. Para superar estas limitaciones, se emplea agua en recirculación como medio para evacuar calor asociada a equipos de enfriamiento evaporativo, como son las torres de refrigeración. El enfriamiento evaporativo basa su principio de operación en la combinación de la transferencia de masa y energía entre una corriente de agua y una de aire. Existen múltiples referencias de aplicaciones de enfriamiento evaporativo, Hernández [2003] describe una evolución histórica de las aplicaciones del enfriamiento evaporativo hasta llegar al desarrollo de las torres de refrigeración.

Como diferencia fundamental entre la condensación por agua y la condensación por aire para instalaciones de refrigeración y climatización, puede indicarse que la condensación por agua, si el mantenimiento es correcto, origina menor presión de condensación en el sistema de producción de frío, con lo que a igualdad del resto de condiciones de operación, el coste de funcionamiento del equipo es menor.

En una torre de refrigeración, el flujo de agua es bombeado a la parte superior del sistema donde se distribuye por medio de rociadores o canales abiertos. El agua cae sobre el relleno que, bien está diseñado para la creación de láminas de agua, bien para la formación de pequeñas gotas por salpicadura. El aumento del tiempo y la superficie de intercambio favorecen la evaporación de una pequeña parte del agua y el enfriamiento del resto. En la mayoría de instalaciones, exceptuando las centrales térmicas de potencia, se utiliza un ventilador para provocar la corriente de aire que circula por el interior del sistema. Como la corriente de aire es dirigida a lo largo de la torre, una pequeña parte de las gotas de agua son arrastradas. Unos deflectores, llamados separadores de gotas, se instalan en la sección de salida del aire para minimizar, mediante impacto inercial, la cantidad de gotas de agua arrastradas al exterior y emitidas a la atmósfera. A las gotas que escapan de la torre de refrigeración se les llama arrastre. El nivel de emisión de arrastre de las torres de refrigeración normalmente se mide como un porcentaje del agua circulante en la torre.

Es importante distinguir entre arrastre y penacho, dado que el penacho visible se debe a la mezcla de una corriente de aire húmedo con una corriente de aire fría y cuyo resultado es un aire húmedo sobresaturado, con la aparición de gotas condensadas. Una diferencia esencial entre arrastre y penacho es que las gotas arrastradas tienen la misma composición que el agua circulante en la torre, mientras que el agua presente en un penacho es agua pura.

Existen diversos aspectos medioambientales destacables relacionados con las torres de refrigeración y, en particular, con el arrastre de torres de refrigeración. Los trabajos de Aynsley y Carson [1973] y de Pedersen et al. [1987] describen diversos problemas medioambientales que se resumen a continuación:

- Pérdida de un bien escaso, como es el agua, sin realizar la función de enfriamiento para la que se ha ubicado en la torre.
- Posibilidad de generar problemas de corrosión en equipos, conductos y elementos estructurales que rodean la torre.
- Formación de hielo en las zonas cercanas a la instalación en períodos invernales.

- Degradación de cultivos del entorno por deposición de sales.
- Efectos sobre la salud humana debido a la exposición a compuestos, bien químicos, bien biológicos del agua arrastrada.

De todos los aspectos medioambientales glosados, el más destacable es el referido a la posibilidad de deteriorar la salud humana. En este sentido, la contaminación por legionela tiene un especial protagonismo.

Existe una serie de condiciones que deben aparecer para que se produzca una contaminación por legionela asociada al funcionamiento de las torres de refrigeración: debe existir una *vía de penetración* de las bacterias en el circuito de agua de la torre, así como unas condiciones de temperatura, estancamiento y presencia de nutrientes en la instalación que facilite la *multiplicación* de estas bacterias. La siguiente condición es la *dispersión de las bacterias en el aire* en forma de aerosol. Finalmente, es necesario que se produzca la *exposición de los individuos* susceptibles al microorganismo, en una concentración y durante un tiempo suficiente para que puedan contraer la enfermedad. Diversas referencias presentan a las torres de refrigeración como equipos de riesgo de desarrollo y dispersión de la bacteria y causantes del desarrollo de legionelosis. A modo de muestra se pueden destacar por su significación los trabajos de Cooper et al. [2004], Navarro et al. [2001] y Sumiyo et al. [2001].

El modo más eficaz de controlar el contagio de la enfermedad es actuar en cuantos eslabones de la cadena de transmisión sea posible. Esta redundancia en la seguridad tiene su lógica en prevenir posibles fallos en las medidas de seguridad, de forma que si una no es efectiva existirá otra que evite el contagio, ASHRAE [2000]. En la actualidad esencialmente se está trabajando en combatir la multiplicación, a través de acciones en fase de diseño y explotación de los equipos, evitando el estancamiento del agua, la proliferación de nutrientes, trabajar en determinadas condiciones de temperatura o disponer de tratamientos de agua adecuados. En lo referido a la dispersión de las bacterias en el aire, es donde aparece la reducción de la cantidad de agua arrastrada. En este sentido existen diversas normativas que limitan este valor. A nivel nacional el RD 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis, limita el valor del arrastre a

0,05% del agua circulante. Sin embargo no describe el método a utilizar para la medida. A nivel internacional, tomando como ejemplo Australia, país de referencia en el control de la legionelosis, fija el valor máximo del arrastre en 0,02% en su norma AS 3666-1986.

En España, algunas administraciones locales están restringiendo o dificultando la instalación de torres de refrigeración tras brotes graves de legionelosis. Por ejemplo, el Ayuntamiento de la ciudad de Murcia ha prohibido la instalación de torres de refrigeración en el área metropolitana, BORM 20/6/2006. La Comunidad Autónoma de Valencia ha hecho públicas ayudas, DOGV núm. 5311 de 26.07.2006, para la sustitución de torres de refrigeración por “una alternativa más segura” (aero-refrigeradores). Siguiendo esta tendencia, algunas compañías propietarias de edificios con sistemas centralizados de aire acondicionado (en ocasiones de miles de kilovatios) han sustituido las torres de refrigeración por aero-refrigeradores, con los consiguientes efectos de incremento del consumo energético y de las emisiones de CO₂.

Capítulo 2.

Introducción, estado del arte y objetivos.

2.1. Introducción.

2.2. Estado del arte.

2.3. Objetivos.

2. Introducción y objetivos.

2.1. *Introducción.*

El nuevo RITE incluye una Instrucción Técnica (la 1.2.3) relativa a la eficiencia energética que exige que “En los edificios nuevos que dispongan de una instalación de potencia térmica nominal a instalar en generación de calor o frío mayor que 70 kW, y cuya superficie útil total sea mayor que 1.000 m², la justificación del sistema de climatización elegido desde el punto de vista de la eficiencia energética incluirá su comparación con otros alternativos. En este análisis se deberá considerar y tener en cuenta aquellos sistemas que sean viables técnica, medioambiental y económicamente, en función del clima y de las características específicas del edificio y su entorno”.

Se observa que la viabilidad técnica, medioambiental y económica de los sistemas de evacuación de calor asociados a los condensadores de máquinas frigoríficas, puede excluirlos del estudio comparativo. Este es uno de los motivos por los que se realiza este proyecto, como se explicará a continuación, y por lo que se presta especial atención a los aspectos de emisiones (que conllevan implicaciones medioambientales y económicas) asociados a las torres de refrigeración.

La instalación experimental objeto de este estudio es una instalación que servirá para el desarrollo de una de las tareas programadas dentro del proyecto de investigación “Análisis energético de instalaciones de climatización asociado a la variación del diseño de torres de refrigeración. Control de emisiones y su impacto en áreas urbanas (ENE2010-21679-C02-01/CON)” que el grupo de investigación de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena se encuentra desarrollando. Dicho proyecto forma parte del Plan Nacional de Investigación, desarrollado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, y el objetivo principal del mismo es mejorar la eficiencia energética y el grado de implementación de las torres de refrigeración en instalaciones de climatización a través del estudio de las prestaciones térmicas y de las emisiones de estos equipos asociadas a sus parámetros de diseño y a sus condiciones de funcionamiento.

Particularmente, la subtarea de dicho estudio de investigación es en la que se requiere la instalación objeto de este proyecto. El objetivo inicial es desarrollar un procedimiento experimental que proporcione información cualitativa del impacto de gotas sobre superficies para diferentes velocidades.

El procedimiento permitiría determinar en qué condiciones las gotas que impactan sobre los eliminadores de gotas quedan pegadas a la pared formando una película de agua, rebotan o dan lugar a gotas más pequeñas tras el impacto.

La información cualitativa obtenida resultaría de utilidad para elegir la condición de contorno a imponer en un modelo numérico sobre el impacto de gotas de agua en las paredes de los separadores, tarea que también se enmarca dentro del proyecto de investigación.

No obstante, tras analizar a fondo el problema físico de los separadores de gotas de agua dentro de una torre de refrigeración, se llega a la conclusión de que tiene más importancia el problema de desprendimiento de la película de agua que se forma sobre la superficie de las placas que conforman el separador de gotas que el propio problema de impacto de gotas, ya que es ese desprendimiento el que genera la mayor cantidad de gotas de agua de tamaño grande emitidas al exterior, tal y como indica Meroney [1] ó [2].

2.2. *Estado del arte.*

El uso de sistemas de climatización en edificios está cobrando, cada vez más, una importancia originada por la calidad de vida y los niveles de confort presentes en la sociedad actual. En la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre, relativa a la eficiencia energética de los edificios se recoge que en el sector de la vivienda y de los servicios, compuesto en su mayoría por edificios, absorbe más del 40% del consumo final de energía en la Comunidad y se encuentra en fase de expansión, tendencia que previsiblemente hará aumentar el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones de dióxido de carbono. A la vista de esta Directiva, se comprende

la importancia que la Unión Europea concede al ahorro energético en el sector terciario. El aire acondicionado participa, como responsable directo, del incremento de la demanda energética del sector terciario.

El documento básico HS4 del CTE sobre suministro de agua, exige en su apartado 3.6 relativo al ahorro de agua que “*los equipos que utilicen agua para consumo humano en la condensación de agentes frigoríficos, deben equiparse con sistemas de recuperación de agua*”. La solución más habitual en estos casos es el uso de torres de refrigeración.

Las torres de refrigeración enfrían el agua por contacto con el aire y por evaporación de una parte de la misma (Kloppers y Kröger, 2005a, 2005b). Su funcionamiento se caracteriza normalmente por la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua de la torre (rango), y por la diferencia de temperaturas entre la salida del agua de la torre y la de bulbo húmedo de entrada del aire (aproximación). Las torres de refrigeración son dispositivos eficaces y económicos para evacuar calor en instalaciones. El principio de funcionamiento de las torres de refrigeración se basa en la pulverización de agua sobre una superficie a través de la que se hace circular una corriente de aire que al no estar saturado, hace que se evapore una pequeña parte de agua y se enfríe el resto. El agua enfriada cae dentro de la bandeja de la torre y el calor extraído del agua se evacua con la corriente de aire descargada al exterior. Como resultado de este proceso, se incorporan a la corriente de aire pequeñas gotas de agua que serán arrastradas en parte fuera de la torre de refrigeración. A esta emisión se le conoce como arrastre y es independiente del agua que se evapora en la torre como consecuencia del proceso de transferencia de calor y masa que en ella tiene lugar.

Las emisiones de gotas de agua de las torres de refrigeración son indeseables por diversos motivos, Lewis (1974), principalmente porque representan la emisión de productos químicos y microorganismos a la atmósfera. Sin lugar a dudas, las sustancias patógenas más conocidas son las múltiples especies de la bacteria conocida comúnmente como legionela. Estas bacterias tienden a desarrollarse bien en el agua presente en las torres de refrigeración dado su rango de temperaturas. De este modo, cualquier persona próxima a la torre puede estar expuesta al arrastre, inhalar aerosoles

que contengan la bacteria de la legionela y resultar infectada con la enfermedad. Son numerosos los brotes de legionelosis asociados a torres de refrigeración (Brown et al., (1999); Isozumi et al., (2005)).

Con objeto de reducir la cantidad de agua arrastrada se instalan en la sección de salida del aire, en el interior de la torre de refrigeración, unas estructuras estáticas que reflejan la corriente (*separadores de gotas*), actuando por impacto inercial. El comportamiento de los separadores puede cuantificarse mediante dos factores: la eficiencia de captura de gotas, definida como la relación entre la masa de agua capturada y la masa total que llega al separador en el seno de la corriente de aire, y la pérdida de presión producida. La existencia de una caída importante de carga en el interior del cuerpo principal de la torre puede bajar de forma drástica el gasto de aire y reducir por tanto la eficiencia térmica del sistema.

En las torres de tiro mecánico puede producirse un incremento considerable en el consumo energético de los ventiladores para un mismo gasto de aire. Obviamente, el mejor diseño debería aunar por un lado una eficiencia de captura alta, y por el otro, una pérdida de carga inducida no demasiado importante.

Cabe destacar varias contribuciones importantes al estudio del comportamiento de los separadores. Foster et al. (1974) llevaron a cabo estudios analíticos y experimentales sobre dos tipos de separadores de gotas: de doble fila de lamas de madera, y de perfiles senoidales de fibrocemento, los mismos que los estudiados por Gardner y Lowe (1974). Chan y Golay (1977) desarrollaron un modelo numérico para calcular la eficiencia de captura y la pérdida de presión de diferentes separadores. Becker y Burdik (1992) han investigado experimentalmente la pérdida de presión entre la entrada de aire y el plenum para dos tipos comerciales de separadores de gotas de geometría tridimensional. Más recientemente, se han publicado entre otros los trabajos de James et al. (2003, 2005) y Li et al. (2007), centrados en una morfología concreta de separadores.

El estudio del comportamiento de las gotas de agua impactando sobre las paredes sólidas que constituyen los separadores puede conducir a la mejora y optimización de estos elementos. El análisis numérico de la interacción de las gotas

dispersas en el aire sobre los separadores puede plantearse de distintas formas. Autores como Lee et al. (16) han utilizado modelos de flujo con partículas dispersas eulerianos y lagrangianos. Centrando la atención en la simulación correcta de la deposición de las gotas sobre las paredes del separador, lo que conduce a obtener la eficiencia de captura del mismo, se ha comprobado que pueden obtenerse buenos resultados imponiendo una condición de contorno simple en las paredes (condición “trap”). Sin embargo, el modelo de turbulencia empleado, así como el tratamiento de las paredes, parecen ser determinantes en la obtención de resultados ajustados a los experimentales de la bibliografía. Autores tales como Wang y James (1999) y Galletti et al. (2008) han investigado los efectos de utilizar modelos de turbulencia tales como el k- ϵ y el k- ω para bajos números de Reynolds, con distintas variantes de la denominada *dispersión turbulenta* de las gotas, esto es, la introducción en el modelo numérico de un submodelo para simular el efecto aleatorio de la turbulencia sobre la trayectoria de las gotas inyectadas en el seno de la corriente.

En cuanto a los *modelos experimentales de la dispersión y deposición de gotas*, se ha demostrado que es posible obtener resultados razonables mediante ensayos en el túnel de viento; sin embargo, la necesidad de escalado de las magnitudes geométricas y físicas como consecuencia del pequeño tamaño de gota, lleva a que las velocidades impuestas sean excesivamente bajas, lo que puede conducir a una distorsión en los resultados obtenibles (Kennedy y Fordyce, (1974); Jain y Kennedy, (1978); Petersen, (2004)).

Para la medida de la deposición de gotas han sido escasos los trabajos que se han encontrado en la bibliografía que abordan este problema. Los experimentos llevados a cabo en Chalk Point descritos en los trabajos de Hanna (1974) y Policastro et al. (1978-a) y (1978-b) y los posteriores de Policastro (1981) son de las pocas referencias localizadas.

2.3. *Objetivos.*

Los objetivos principales del trabajo son:

- Evaluar los focos de generación de gotas de agua en películas de agua sobre separadores de gota de torres de refrigeración.
- Estudiar la interacción de gotas de agua y película de agua sobre separadores de gota en diferentes condiciones.

Para ello se dispone de un dispositivo de un prototipo experimental de torre de refrigeración sobre el que se ha de poner en práctica la evaluación de la generación de gotas de agua y su interacción con la película de agua.

Para llevar a cabo estos objetivos fundamentales, hemos de desarrollar otros objetivos secundarios como pueden ser:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los estudios existentes, ya sean de otros autores o de los propios investigadores del departamento donde se desarrolla este TFM.
- Analizar la instalación experimental disponible y comprobar que elemento es necesario añadir para desarrollar los objetivos principales.
- Establecer las variables a medir para poder caracterizar la separación de gotas en la torre de refrigeración.
- Una vez adquiridos los elementos necesarios para completar la instalación y fijadas las variables a medir, desarrollar un sistema de adquisición de datos para poder llevar a cabo los ensayos.
- Planificar los ensayos necesarios para poder desarrollar el estudio.
- Poner en marcha la instalación y proceder a la toma de medidas.
- Establecer las conclusiones del estudio.

Capítulo 3.

Descripción de la instalación.

3.1. Instalación original.

3.2. Propuestas de mejora.

3.3. Instalación mejorada.

3. Descripción de la instalación.

3.1. Instalación original.

La instalación debe asemejarse lo máximo posible a un separador real de una torre de refrigeración. Por ello, se sugiere el empleo de una sección de ensayo en la que se sitúen dos placas aisladas de características semejantes a las que se pueden montar en el separador de gotas de una torre de refrigeración comercial, formando un canal a través del cual se hará circular una corriente de aire.

Sobre la superficie de una de las placas se generará una película de agua, cuyo comportamiento es el objeto de estudio principal de la instalación experimental. Para que las características de funcionamiento sean lo más parecido posible a las que se dan en una torre de refrigeración real, parece razonable pensar que la instalación experimental debe parecerse lo máximo posible a una torre de refrigeración real. Además, como se necesitan gran parte de los sistemas que se encuentran en una torre de refrigeración, se partirá de la base de una instalación comercial para la instalación experimental.

A continuación se describen los elementos que conforman la instalación experimental.

3.1.1. Estructura de la torre experimental.

Es una estructura prismática rectangular, semejante a una torre de refrigeración comercial, realizada en tubo cuadrangular de 25 mm de acero galvanizado, con canalización para evacuar el agua fabricada en chapa de 2 mm de espesor.

En las siguientes imágenes se muestran las dimensiones tanto de la estructura como de la canalización.



Ilustración 1: Dimensiones de la estructura.

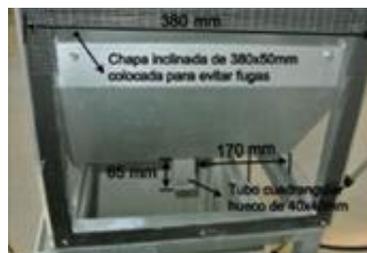
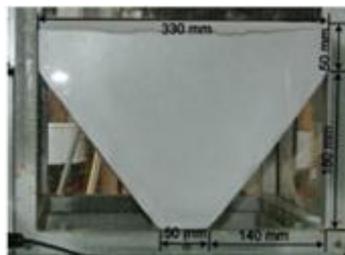


Ilustración 2: Canalización (vista lateral y vista frontal).

Dicha estructura queda cerrada lateralmente por cuatro caras laterales con forma rectangular fabricadas en metacrilato de metilo de 5 mm de espesor atornilladas a la estructura. Tres de ellas tienen unas dimensiones de 380x1400mm, y la más pequeña, la que queda justo encima del ventilador, tiene unas dimensiones de 380x880mm.

La elección de este material es debido a que es un material resistente y sobre todo debido a que es transparente, lo que nos permitirá la observación del interior de la torre experimental.

Las bases de dicha estructura serán abiertas ya que la base inferior se apoyará contra el suelo y la parte superior será por donde se expulse la corriente de aire generada en el interior de la torre.

3.1.2. Sección de ensayo. Separador de gotas.

El elemento principal de la instalación es el separador de gotas, incluido dentro de lo que llamamos sección de ensayo.

a) Separador de gotas.

El separador de gotas está formado por dos placas que generan un canal en su interior y sólo se hará discurrir agua por la superficie de una única placa en cada ensayo.

Las placas están formadas por dos tramos largos en ángulo recto y otros dos tramos más cortos en los extremos, localizados éstos a la entrada y a la salida del canal, que estarán alineados con la dirección principal del flujo. Este sistema de canal es el típicamente empleado en las torres de refrigeración comerciales.

En las siguientes imágenes se detallan las medidas de las placas:

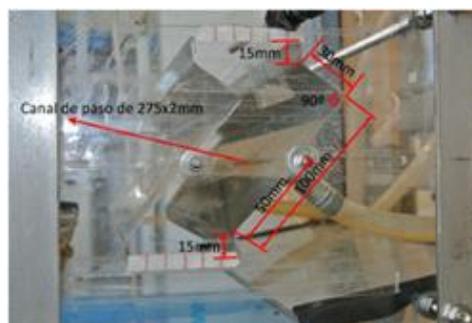


Ilustración 3: Dimensiones de la placa que forman el separador de gotas (vista lateral).

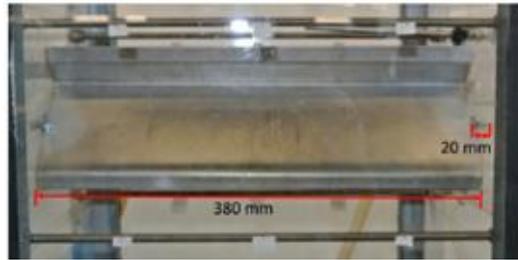


Ilustración 4: Dimensiones de la placa que forman el separador de gotas (vista frontal).

La posición de las placas (ángulo formado por éstas) va a ser modificable, al igual que la distancia entre ellas, fijándose la misma en un máximo de unos 100 mm

Las placas están fabricadas en acero galvanizado y tienen un espesor de 2 mm, de esta manera se asegura la no deformación de éstas frente a flexión producida por las fuerzas hidrodinámicas

El sistema de placas está diseñado para permitir la inyección de agua en varios puntos a lo largo de la placa, se consideran suficientes las inyecciones en los extremos de la zona central de la placa.

b) Fijación de las placas.

En los laterales de las placas, en la zona central (véase ilustración 3), se sueldan unas varillas roscadas de métrica 5, con una longitud de 20 mm, que son las que, junto con arandelas y tuercas, formarán el sistema de sujeción de las placas.

De esta manera, las placas se pueden mover sobre las guías de la sección de ensayo, variando así la distancia entre ellas y, por tanto, la anchura del canal de paso de aire.

La forma de instalar las placas será encajando éstas en la posición deseada y apretando las tuercas hasta conseguir que queden fijadas.

c) **Estructura de la sección de ensayo.**

Para albergar el sistema compuesto por las placas del separador de gotas se emplean dos superficies paralelas del mismo material que la carcasa exterior de la torre, unidas entre sí por unas varillas de acero galvanizado (véase ilustración 4).

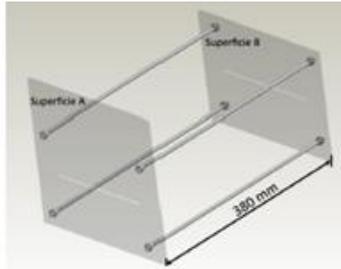


Ilustración 5: Vista de la sección de ensayo sin las partes que forman el separador.

Aproximadamente en el centro de ambas superficies hay unos huecos horizontales de 5 mm de alto y una longitud de 200 mm que servirán de guías para las placas. Como se ha dicho anteriormente, las placas se fijan a través de las guías practicadas en estas superficies mediante arandelas y tuercas, de forma que se podrá variar fácilmente la posición de los mismos. Además, en una de las caras, denominada superficie A, se realizan otros huecos que servirán de guías para poder medir con el anemómetro de hilo caliente. Todo esto se puede ver representado en la ilustración 6.

Dos de las caras laterales de la torre, que son dos caras paralelas, contienen sendos huecos para albergar las citadas superficies, de forma que una vez introducidas las superficies en ellos formen un plano con la correspondiente cara lateral de la torre. De esta forma, la sección del separador de gotas se podrá extraer fácilmente de la torre para su modificación. Para su fácil identificación y maniobrabilidad, una de las superficies y uno de los huecos (Superficie B) es de dimensiones sensiblemente inferiores a la otra superficie y al otro hueco (Superficie A).

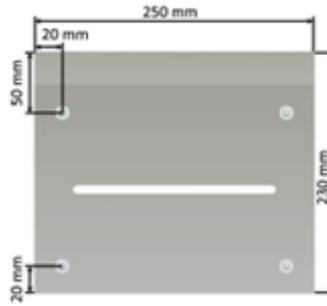


Ilustración 6: Superficie A de la sección de ensayo (donde se sitúan las agarraderas).

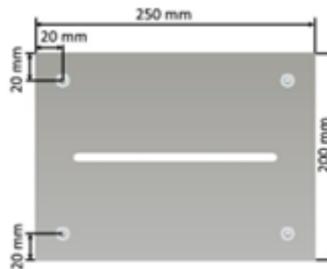


Ilustración 7: Superficie B de la sección de ensayo.

Las varillas que unen las superficies que conforman la sección de ensayo, para facilitar el montaje, son varillas roscadas, fabricadas en acero galvanizado, de métrica 10 mm con una longitud de 450 mm. También se colocan para mejorar la maniobrabilidad, unas agarraderas de dimensiones 195x25mm y 3 mm de espesor, fabricadas en el mismo material que las varillas.

En el hueco de la torre donde va colocada la superficie B, se dispone de un sistema de tope que permite asegurar que la sección de ensayo encaja correctamente y que siempre permanezca en el mismo plano que los laterales de la torre. Este sistema de tope es un marco de 20 mm atornillado a la torre, realizado con el mismo material que ésta, colocado de manera que cubre parcialmente el hueco por la cara exterior del lateral de la torre, de forma que la superficie de la sección de ensayo apoya totalmente contra este marco. En la ilustración 7 puede verse la sección de ensayo montada.



Ilustración 8: Sección de ensayo real colocada en la torre.

d) Sistema de inyección de agua.

Sobre una de las placas se debe conseguir generar una película de agua, lo que se hará mediante el empleo de una inyección de agua directamente sobre la superficie de la misma.

Para evitar efectos de crecimiento de la película fluida a lo largo de la anchura del canal, el sistema de inyección deberá proveer de agua a toda esta anchura de la forma más uniforme posible. Por ello, la inyección se realizará a través de un orificio lineal, de 2 mm de altura y 275 mm de longitud (véase ilustración 3).

Para que no altere la superficie interior del canal de paso de aire, la pared lateral del inyector que va colocada de cara a la citada zona es plana, descartándose en un primer momento sistemas simples como una tubería con un orificio lineal, por ejemplo. Por tanto, el elemento que se emplea como inyector de agua se define como un prisma rectangular hueco de base cuadrada de 10x10mm y una altura de 340 mm (se colocará de forma horizontal). El prisma, además, en una de sus caras, junto a la unión con la placa del separador, tiene un hueco de 5 mm que abarca toda la altura de dicho prisma. En la cara opuesta donde está el citado hueco, dispone de dos entradas de agua que, por simplicidad, serán tubulares de 10 mm de diámetro. Se consideran suficientes dos entradas de agua, una en cada extremo de la cara posterior del sistema de inyección, para que el caudal aportado sea lo más uniforme posible a lo largo de todo el sistema.

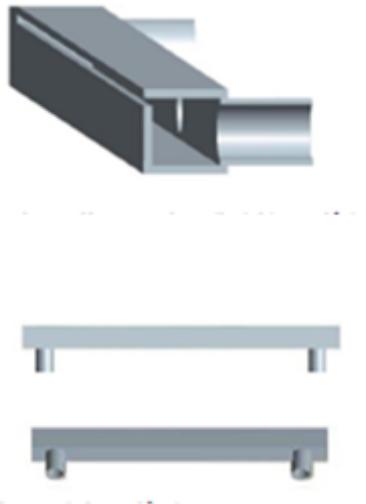


Ilustración 9: Sistema de inyección de agua.

El sistema de inyección se unirá a la placa del separador de gotas mediante soldadura. En la siguiente imagen podemos ver el sistema de inyección de agua ya instalado.



Ilustración 10: Sistema de inyección en la instalación experimental.

3.1.3. *Relleno.*

En una torre de refrigeración real, el elemento llamado relleno se emplea para que las gotas se depositen sobre él y aumenten la superficie de intercambio de calor agua-aire y el tiempo que ambas fases permanecen en contacto. De esa forma se aumenta la eficiencia de la torre de refrigeración, puesto que se permite la transferencia de una mayor cantidad de calor añadiendo únicamente una pequeña pérdida de carga.

3.1.4. *Sistema completo de la torre de refrigeración. Consideraciones adicionales.*

En la ilustración 10 se muestra un esquema de lo que podría ser la parte principal de la instalación experimental en cuestión. Como se pretende que dicha instalación se asemeje lo máximo posible a una torre de refrigeración de una instalación real, ésta consta de una estructura similar a la de una torre de refrigeración, con 4 zonas diferenciadas:

- **Sección del separador de gotas.**
- **Relleno.**
- **Sistema de impulsión de aire.**
- **Sección de recogida y evacuación del agua.**

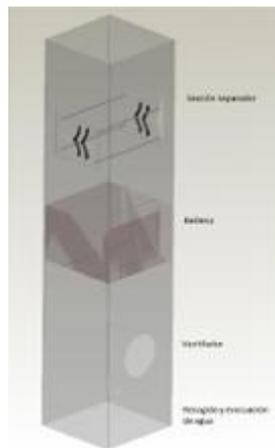


Ilustración 11: Esquema de la instalación experimental.

3.1.5. *Elementos auxiliares.*

3.1.6. *Sistema de aporte de agua.*

a) **Sistema de depósito.**

El depósito necesario en nuestra instalación servirá para recolectar el agua que llega al fondo de la torre de refrigeración y posteriormente se bombeará para su uso en la instalación.

En este caso la consideración primordial de diseño es que tenga una altura reducida. En el diseño se llegó a la conclusión de elevar la instalación de la torre en una estructura unos 65 cm del suelo, para así colocar este tercer depósito bajo la misma.

Con todo lo anteriormente dicho, el depósito utilizado finalmente es un depósito de base cuadrada de 355x355 mm, con una altura de 370 mm. Tenemos por tanto un depósito de 46 litros de capacidad.

$$V_{DEPÓSITO} = A_{BASE} \cdot h = 0,355^2 \cdot 0,37 = 0,04663 \text{ m}^3 = 46,63 \text{ L}$$

b) Sistema de bombeo.

Es necesario un sistema de bombeo, desde el depósito colocado bajo la instalación experimental hasta el sistema de inyección situado en el separador de gotas.

La característica de altura máxima de la bomba hidráulica puede fijarse en unos 3-4 m.c.a, lo que incluiría la diferencia de cotas en la instalación y las pérdidas en conductos y otros elementos del sistema de distribución del agua.

El caudal de la bomba será tal que permita realizar la operación completa de vaciado de ese depósito en un tiempo inferior a 1 minuto. Como mínimo deberá ser capaz de suministrar 46 L/min.

La bomba seleccionada para nuestra instalación tiene las siguientes especificaciones técnicas:



EMERA		CE	PC
MADE IN ITALY			
TYPE 2CDX/A/70/12		C Y4 00109	
Q 20-80	l/min	H 44.5-29	m Hmax 48 m
V~ 230-240	Δ /400-415	Υ	Hmin 29 m
KW 0.9	HP 1.2	Hz 50	A 5.0/2.9
KWabs 1.5	Phase 3	RPM 2800	
uF	Uc	IP 55	
Ins.C. F S1	Kg 13	P/N 1611120004	

Ilustración 12: Especificaciones técnicas de la bomba.

3.1.7. Sistema de generación del flujo de aire.

El elemento que proporcionará la corriente de aire que circulará por el interior de la instalación descrita será un ventilador de tipo axial. Para la variación del caudal de aire y, por tanto, de la velocidad del aire en la sección de ensayo se empleará un variador de frecuencia para la alimentación del ventilador.

Si el aire se pretende que circule a un máximo de 10 m/s, el gradiente de presión que deberá ser capaz de aportar el ventilador será igual a la diferencia de presión dinámica del aire más las pérdidas que se produzcan en la instalación, las cuales se estimarán en la misma magnitud que dicha diferencia de presión dinámica, la cual será:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^2 = 60 \text{ Pa}$$

Por lo que el gradiente de presión total que deberá aportar el ventilador se estima entorno a los 120 Pa. El caudal máximo que circulará por la instalación será aproximadamente de 1,44 m³/s (conducto de 0,38 m de lado con una velocidad de 10 m/s).

Con estas características, la potencia necesaria, definida como el producto del gasto másico por el gradiente de presión, será del entorno de los 150 W.

Se seleccionará un ventilador que tenga unas características inmediatamente por encima de las aquí descritas multiplicadas por un factor de seguridad de, al menos, 1,5. Este sobredimensionamiento no supondrá un sobre coste muy elevado y permitirá asegurar que se cumplen las condiciones de funcionamiento diseñadas para la instalación.

Las características necesarias para el ventilador se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1: Características necesarias para el ventilador.

	Requerido	Factor de aumento	Final
Caudal (m³/s)	1,44	1	1,44
ΔP (Pa)	120	1,5	180
Potencia (W)	150	1,5	225

Se empleará un ventilador del tipo centrífugo, capaz de suministrar los niveles de caudal y presión fijados con esas dimensiones.



Ilustración 13: Ventilador centrífugo.

3.2. *Propuestas de mejora.*

Como principales propuestas de mejora de la instalación cabe destacar:

- Estudio de la altura.
- Caudalímetro.
- Variadores de frecuencia.
- Cámara de alta definición.
- Generador de gotas.
- Tarjeta de adquisición de datos My Rio 1900, para realizar un sistema de control y adquisición de datos mediante el uso de LabVIEW.

A continuación, se exponen estas mejoras.

3.2.1. Altura.

El objetivo en este caso es, una vez colocados los separadores de gotas, medir la velocidad del aire directamente en la sección de las placas (entre la altura h_1 y h_2) y obtener una configuración en la que se consigan las velocidades deseadas (1,5-10 m/s) y una homogeneidad en los puntos 2, 5 y 8 (figura 14). Para conseguir este objetivo se realizan medidas a 3 alturas, que se reflejan en la figura 15.

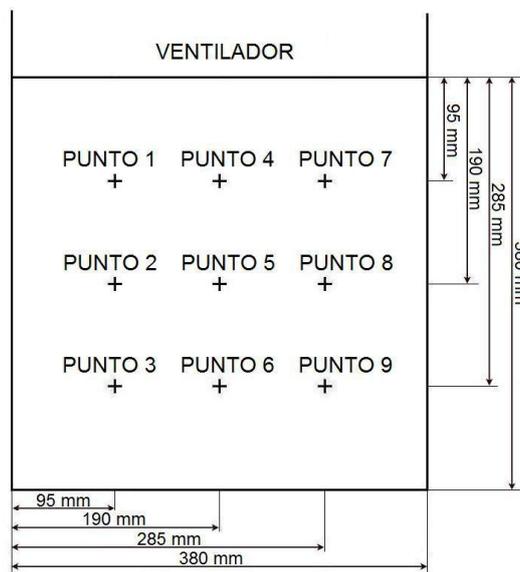


Ilustración 14: Distribución y denominación de los puntos en la sección de la torre.

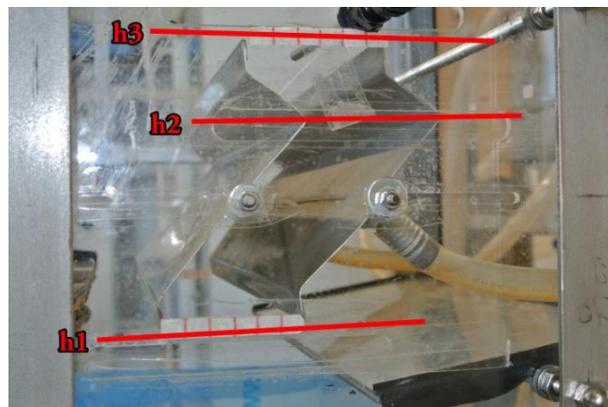


Ilustración 15: Alturas h_1 , h_2 y h_3 en el separador de gotas.

Se consigue homogeneidad en los puntos 2, 5 y 8, prácticamente en todos los casos. Se alcanza el objetivo de homogeneidad, ya que a esta altura se sitúan las placas del separador de gotas.

En la altura h3 se obtienen mayores diferencias de velocidades, pero en general el comportamiento es bueno. Lo que ocurre en este caso es que la velocidad mínima es demasiado alta.

3.2.2. *Caudalímetro.*

Un caudalímetro es un dispositivo que se utiliza para medir el caudal o la cantidad de un gas o líquido. Las aplicaciones de medición de caudal son muy diversas. Considere los siguientes ejemplos: flujo de agua a través de un canal abierto, pérdida de válvula hidráulica, y medición de combustible a través de un inyector de combustible.

El corazón del medidor es una turbina de precisión que gira libremente sobre rodamientos de zafiro robustos. Esta rotación es detectada por un detector de efecto Hall. La salida resultante es un pulso NPN que se interconecta fácilmente con la mayoría de los dispositivos de visualización o grabación electrónica. Esta combinación de materiales y la tecnología asegura un producto de larga vida con un funcionamiento fiable a lo largo.

Debido a que el medidor de flujo es tan versátil con respecto al flujo de gama y accesorios de cada combinación de rango y de ajuste no está disponible. La tabla a continuación muestra el caudal máximo/accesorio estándar que se lo recomendaría a alcanzar nuestras cifras de rendimiento. Son posibles las alternativas pero no serían la degradación en el rendimiento metros.

Tabla 2: Tabla de caudales máximos para el caudalímetro.

Fitting	Recomended Max flow L/min	PVC	PVDF	Brass	3 16 St St
8 mm hose	4.5	*			
13 mm hose	10	*			
1/4" BSP female	4.5			*	*
1/2" BSP male	30		*	*	*
3/4" BSP male	100	*	*	*	*
1" BSP male	100	*	*	*	*

Un diagrama de bloques que podría explicar el funcionamiento del caudalímetro sería el siguiente:

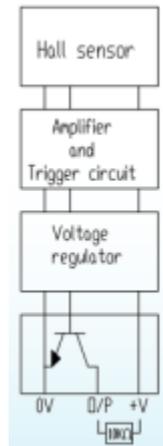


Ilustración 16: Diagrama de bloques del caudalímetro.

Como ilustración de este tipo de instrumentos de media, pueden observarse que es como se muestra en la imagen:



Ilustración 17: Caudalímetro.

3.2.3. Variadores de frecuencia.

Se han empleado los variadores de frecuencia Siemens MICROMASTER 420.

- **Campo de aplicación:**

El convertidor MICROMASTER 420 se puede usar en numerosas aplicaciones de accionamiento con velocidades variables. Es especialmente idóneo para aplicaciones con bombas, ventiladores y en la tecnología de movimiento de materiales y transporte.

Constituye la solución más rentable e idónea entre los convertidores de frecuencia. Se caracteriza particularmente por su gran funcionalidad, ajustada a los deseos del cliente, y su gran facilidad en el manejo. El gran margen de las tensiones de alimentación permite su aplicación en todo el mundo.

- **Características principales:**

- Puesta en servicio simple, mediante menús rápidos.
- Configuración particularmente flexible gracias a la estructura modular.
- Tres entradas digitales libremente parametrizables. y aisladas galvánicamente.
- Una entrada analógica (0 V a 10 V, escalable); a elección utilizable como cuarta entrada digital.
- Una salida analógica parametrizable (0 mA a 20 mA).
- Una salida a relé parametrizable (DC 30 V/5 A de carga óhmica; AC 250 V/ 2 A de carga inductiva).
- Funcionamiento silencioso del motor gracias a las frecuencias de pulsación elevadas, ajustable (obsérvese en su caso la reducción de potencia (derating)).
- Protección para motor y convertidor.

- **Datos mecánicos:**

- Ejecución modular.
- Temperatura de funcionamiento de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (de $+14\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $+122\text{ }^{\circ}\text{F}$).
- Caja compacta gracias a la gran densidad de potencia.
- Simple conexión por cable; conexiones de red y motor separadas para una óptima compatibilidad electromagnética.
- Paneles de operador enchufables.
- Regletero de mando con bornes sin tornillos.

A continuación se muestra una imagen del variador que se ha utilizado en la instalación experimental:



Ilustración 18: Variador de frecuencia de la instalación.

3.2.4. Cámara de alta definición.

Las mini cámaras de grabación de alta velocidad MotionBLITZ EoSens fueron desarrolladas para registrar los procesos más rápidos en espacios de tiempo extremadamente reducidos. Tiene unas dimensiones reducidas (63x63x64,5 mm).

El uso de la cámara de grabación de alta velocidad sin conexión a cualquier ordenador portátil o PC es posible debido a la memoria interna disponible (6,5 segundos a máxima resolución y velocidad).

Con su alta velocidad de grabación de hasta 523 frames por segundo, la cámara garantiza un control fiable incluso de los procesos más rápidos.

Debido a su muy alta resolución de 1.696 x 1.710 píxeles de la cámara de alta velocidad, incluso captura los detalles de los objetos más pequeños.

La foto sensibilidad de la cámara es extremadamente alta (2.500 ASA blanco y negro y 2.000 en color ASA) y facilita su uso en condiciones de iluminación difíciles.



Ilustración 19: Cámara de alta definición.

3.2.5. *Generador de gotas.*

Se ha empleado el generador MDG100.

- **Detalles del producto:**

El generador produce una corriente de gotas de tamaño uniforme en el intervalo de 50 micras a 300 micras. Se basa en el principio de la aplicación de una excitación periódica constante a un chorro laminar de líquido, lo que hace que las ondas de superficie para formar y crecen como el chorro se ralentiza. Ruptura en una sola gota por cada periodo de la ola superficie así ocurre. Se trata de una técnica establecida de la generación de gotas mono de tamaño y se utiliza comúnmente para estudios de gotitas fundamentales como la vaporización, la combustión, la levitación, y la interacción de la superficie. También es útil para comprobaciones de verificación y calibración para diversos instrumentos.

- **Características y beneficios:**
 - Puntos estables múltiples para cada orificio y la frecuencia
 - Etapa de dos componentes que se incluye para el posicionamiento preciso del chorro de gotitas.
 - Jeringa fácilmente reemplazable reduce al mínimo la contaminación cruzada
- **Aplicaciones:**
 - Estudios fundamentales de vaporización de gotas.
 - Estudios fundamentales de combustión de gotas.
 - Estudios fundamentales de interacción de gotas en la superficie.
 - Revisiones de verificación.

A continuación se muestra una imagen del generador de gotas que se ha utilizado en la instalación experimental:



Ilustración 20: Generador de gotas.

3.2.6. Tarjeta de adquisición de datos.

Se ha empleado una tarjeta de adquisición de datos de NI (National Instruments), más concretamente la tarjeta NI myRIO 1900.

- **Características generales:**
 - Herramienta rentable para enseñar e implementar múltiples conceptos de diseño con un dispositivo.

- 10 entradas analógicas, 6 salidas analógicas; 40 líneas E/S digital.
 - Inalámbricos, LEDs, push-button, acelerómetro interno.
 - Xilinx FPGA y procesador dual-core ARM Cortex-A9.
 - Programable con NI LabVIEW o C; adaptable para diferentes niveles de programación.
- **Información general:**

Con tecnología de E/S reconfigurables (RIO) estándar en la industria, la versión incluida de NI myRIO (NI myRIO-1900) dispone de tres conectores de E/S, habilidades inalámbricas, un procesador ARM en tiempo real dual-core y un FPGA Xilinx personalizado. Por medio de sus componentes internos, acceso a software y una biblioteca con recursos y tutoriales, NI myRIO ofrece una herramienta accesible en proyectos de ingeniería en sistemas reales.



Ilustración 21: Tarjeta de adquisición de datos.

3.2.7. Placa de relés.

La utilización de esta placa es para activar o desactivar dispositivos de alta potencia o voltaje, ya que el relé es como un interruptor de potencia cuya apertura o cierre está controlada por el ordenador.

En el caso del Trabajo Fin de Máster, se utilizó esta mencionada placa para conectarla a los variadores y a la tarjeta de adquisición de datos para poder activar o desactivar los variadores, que encienden tanto la bomba como el ventilador, cuando se ejecute el programa de LabVIEW desde el ordenador.

De forma más genérica, cabe destacar que su uso es muy diverso. Como ejemplo de dichas utilidades podemos citar algunas como son:

- Control de alimentación (monitores, ordenadores o sistemas de alumbrado).
- Arranque de sistemas de ventilación o aire acondicionado.
- Control de motores de potencia.



Ilustración 22: Placa de relés instalada.

3.3. Instalación mejorada.

La instalación mejorada se puede observar en la siguiente imagen donde ya podemos ver la cámara de alta definición junto con su trípode y un zoom óptico. Para el correcto funcionamiento de dicha cámara, se tuvo que utilizar un foco para de este modo que se viesen las imágenes con mayor nitidez:

Estudio de la emisión de gotas generadas en separadores de gotas en torres de refrigeración



Ilustración 23: Imágenes de la instalación ya equipada con las mejoras.

En la siguiente imagen se ve la tarjeta de adquisición de datos que se implantó en la instalación con la placa de relés para poder conectarla a los variadores de frecuencia:

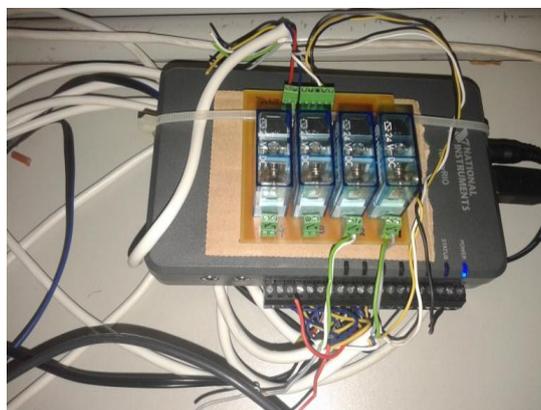


Ilustración 24: Tarjeta de adquisición de datos con la placa de relés instalada.

Estudio de la emisión de gotas generadas en separadores de gotas en torres de refrigeración

Y en la ilustración 19 se ven los mencionados variadores que se adquirieron para la instalación:



Ilustración 25: Variadores de frecuencia instalados.

En la imagen que se muestra a continuación podemos observar el depósito anteriormente descrito y la bomba utilizada en nuestra instalación experimental:



Ilustración 26: Depósito y bomba instalados.

A continuación podemos observar el ventilador que se ha empleado en la instalación para generar la corriente de aire:



Ilustración 27: Ventilador instalado.

En la imagen 28 se puede observar el caudalímetro que se usó en la instalación:

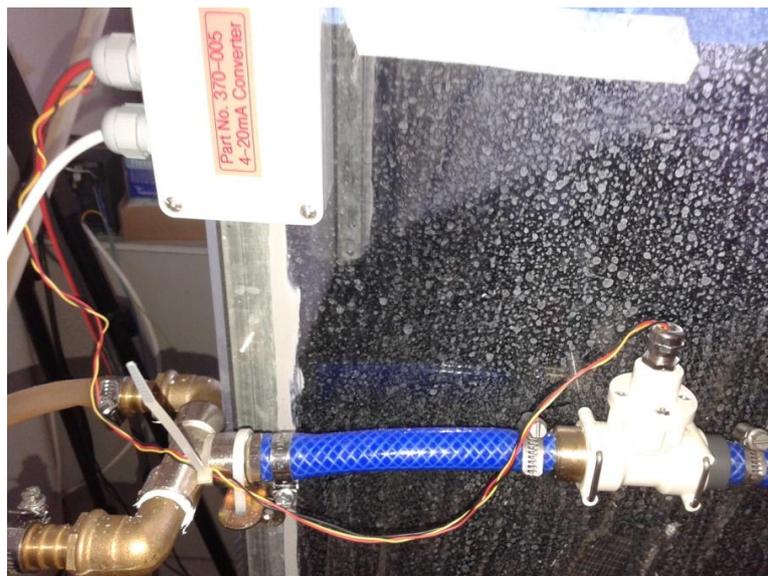


Ilustración 28: Caudalímetro instalado.

3.4. Cálculo de la incertidumbre.

Se denomina incertidumbre típica a la desviación típica de la estimación del resultado de una medida, representándose por "u(y)". Normalmente la magnitud buscada en una medida no se obtiene de forma directa, sino que se deriva a partir de un procedimiento de medida en el que se miden diversas magnitudes primarias o de entrada. Este es el caso de la medida del caudal o de la medida de la velocidad del aire a través del tubo de Pitot que se realizarán en la instalación. Dicho procedimiento de medida establece una relación funcional entre el resultado de la medida "Y" y las magnitudes primarias "Xi" de la siguiente forma:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$$

Cada una de las magnitudes primarias "Xi" requerirá de una estimación "xi" y de una incertidumbre típica "u(xi)". Estas incertidumbres típicas se combinan entre sí para formar la incertidumbre típica combinada de la magnitud "Y", designada como "uC(Y)". Finalmente, a partir de ésta se obtiene la incertidumbre expandida "U" que representa el intervalo de confianza dentro del que se encuentra el valor verdadero de la magnitud con una cierta probabilidad.

Para evaluar la incertidumbre típica de una medida hay dos procedimientos.

La evaluación tipo A de la incertidumbre se basa en procedimientos estadísticos, siendo necesaria la obtención de una muestra de la magnitud. La mejor estimación, "xi", de una magnitud "Xi", de la que se ha obtenido una muestra de tamaño N es la media muestral:

$$x_i = \bar{X}_l = \frac{\sum_{k=1}^N X_{i,k}}{N}$$

La varianza experimental de la muestra, que estima la varianza de la población viene dada por:

$$s^2(X_i) = \frac{\sum_{k=1}^N (X_{i,k} - \bar{X}_l)^2}{N - 1}$$

La mejor estimación de la varianza de la media viene dada por la varianza experimental de la muestra:

$$s^2(\bar{X}_l) = \frac{s^2(X_i)}{N}$$

La desviación típica experimental de la media, igual a la raíz cuadrada de $s^2(\bar{X}_l)$, cuantifica la bondad de la estimación "xi" y se denomina incertidumbre típica.

Así pues, para una magnitud de entrada "Xi" determinada a partir de N observaciones independientes $\{X_{i,k}\}$ la incertidumbre típica de su estimación, "xi" = \bar{X}_l , es $u(x_i) = s(\bar{X}_l)$.

La evaluación tipo B de la incertidumbre se basa en el conocimiento adquirido por la experiencia, información de referencias, catálogos, certificados, etc. En resumen, procedimientos no estadísticos, aunque lo que determinan si es un valor estadístico. Así, denominando s_p^2 a la estimación de la varianza de la población, se tendrá que la mejor estimación de la varianza de la media es s_p^2/N y que la incertidumbre típica de la media es $u(x_i) = s_p/\sqrt{N}$.

En los catálogos de los instrumentos de medida es frecuente que el valor de s_p aparezca como "repetibilidad", que expresa s_p como un porcentaje del fondo de escala del equipo.

La incertidumbre típica de una magnitud se puede expresar como un múltiplo de la desviación típica, como un intervalo de confianza (para distribución normal o rectangular) o a partir de la unidad de la última cifra significativa de la medida.

3.4.1. Incertidumbre típica combinada.

Si se asume que las variables de entrada en la relación funcional que determina la magnitud objeto de la medida son independientes, es decir, no están correlacionadas, las incertidumbres típicas de todas ellas se combinarán mediante la expresión:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)$$

donde $u_c^2(y)$ representa la varianza combinada. Estas derivadas parciales se denominan a menudo coeficientes de sensibilidad

3.4.2. Incertidumbre expandida.

Para poder expresar de forma más clara la incertidumbre, es típico hacerlo en forma de un intervalo, es decir:

$$Y = y \mp U$$

siendo U el semi-intervalo conocido como incertidumbre expandida, el cual se obtiene aplicando un factor de cobertura k a la incertidumbre típica combinada, es decir:

$$U = k \cdot u_c(y)$$

La idea de la incertidumbre expandida radica en los intervalos de confianza, aunque estadísticamente no es correcto, pues pueden intervenir varias variables con distribuciones distintas (normales y rectangulares). Si no existiese este problema, se podría identificar unívocamente el factor de cobertura con un cierto nivel de confianza.

El factor de cobertura suele tomarse entre 2 y 3, asumiendo 2 como el correspondiente a un nivel de confianza del 95% y 3 con uno del 99%.

3.4.3. Cálculo de incertidumbre del hilo caliente.

Este instrumento proporciona valores directamente en velocidad. Sus especificaciones muestran que el rango de medida de este termoanemómetro de sensor caliente va desde 0,125 m/s hasta 50 m/s, siendo además el rango máximo ajustable, desde 1 m/s. De esa forma, la exactitud en la medida se eleva mucho si se selecciona de

forma adecuada dicho rango, ya que ésta se expresa como el $\pm 2\%$ de la lectura pero además el $\pm 0,5\%$ del fondo de escala. Si se mide, por ejemplo, una velocidad de 1 m/s con un rango 0 - 50 m/s la exactitud se expresará como $\pm (0,02 + 0,25)$, mientras que si el rango es 0 - 1,5 m/s la exactitud será $\pm (0,02 + 0,0075)$.

Para las mediciones se van a utilizar tres rangos de escala, 12,5, 20 y 30 m/s por lo que tendremos tres valores de incertidumbre. Esos valores serán para la medida de 1 m/s.

Para una escala hasta 12,5 m/s, tendremos la corrección e incertidumbre típica calculada a continuación:

$$\Delta V = \pm \left(\frac{2}{100} * 1 + \frac{0,5}{100} * 12,5 \right) = 0,0825 \frac{m}{s}$$

$$U(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{3}} = 0,047 m/s$$

Para una escala hasta 20 m/s:

$$\Delta V = \pm \left(\frac{2}{100} * 1 + \frac{0,5}{100} * 20 \right) = 0,12 \frac{m}{s}$$

$$U(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{3}} = 0,069 m/s$$

Para una escala hasta 30 m/s, tendremos:

$$\Delta V = \pm \left(\frac{2}{100} * 1 + \frac{0,5}{100} * 30 \right) = 0,17 \frac{m}{s}$$

$$U(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{3}} = 0,098 m/s$$

Para obtener las incertidumbres en un intervalo de confianza del 95% tendremos:

- Para una escala hasta 12,5 m/s:

$$U(V) = u(V) * k = 0,047 * 2 = 0,095 \frac{m}{s}$$

- Para una escala hasta 20 m/s:

$$U(V) = u(V) * k = 0,069 * 2 = 0,138 \frac{m}{s}$$

- Para una escala hasta 30 m/s:

$$U(V) = u(V) * k = 0,098 * 2 = 0,196 \frac{m}{s}$$

3.4.4. Cálculo de incertidumbre del caudalímetro.

Para el cálculo de la incertidumbre del caudalímetro se procede del mismo modo que para el hilo caliente.

Este dispositivo también proporciona valores directamente en caudal. Sus especificaciones muestran que el rango de medida del mismo va desde 0,13 L/min hasta 4,5 L/min, siendo además el rango máximo ajustable, desde 0,1 L/min. De esa forma, la exactitud en la medida se eleva mucho si se selecciona de forma adecuada dicho rango, ya que ésta se expresa como el $\pm 1,5\%$ de la lectura pero además el $\pm 0,75\%$ del fondo de escala.

Para las mediciones se van a utilizar tres rangos de escala, 0,15, 2 y 4 L/min por lo que tendremos tres valores de incertidumbre. Esos valores serán para la medida de 0,1 L/min.

Para una escala hasta 0,15 L/min, tendremos la corrección e incertidumbre típica calculada a continuación:

$$\Delta V = \pm \left(\frac{1,5}{100} * 0,1 + \frac{0,75}{100} * 0,15 \right) = 0,0026 \frac{l}{min}$$

$$U(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{3}} = 0,0015 \text{ l/min}$$

Para una escala hasta 2 m/s:

$$\Delta V = \pm \left(\frac{1,5}{100} * 0,1 + \frac{0,75}{100} * 2 \right) = 0,0165 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$U(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{3}} = 0,0095 \text{ l/min}$$

Para una escala hasta 4 m/s, tendremos:

$$\Delta V = \pm \left(\frac{1,5}{100} * 0,1 + \frac{0,75}{100} * 4 \right) = 0,0315 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$U(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{3}} = 0,0182 \text{ l/min}$$

Para obtener las incertidumbres en un intervalo de confianza del 95% tendremos:

- Para una escala hasta 0,15 l/min:

$$U(V) = u(V) * k = 0,0015 * 2 = 0,003 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Para una escala hasta 2 l/min:

$$U(V) = u(V) * k = 0,0095 * 2 = 0,019 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Para una escala hasta 4 l/min:

$$U(V) = u(V) * k = 0,0182 * 2 = 0,0364 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Capítulo 4.

Diseño del sistema de control y adquisición de datos.

4.1. Descripción del proceso.

4.2. Descripción del software de adquisición de datos.

4. Diseño del sistema de adquisición de datos.

4.1. Descripción del proceso.

El proceso que se va a llevar a cabo es, mediante el uso de un programa informático como LabVIEW, controlar las variables de caudal y velocidad del viento. Como ya se ha mencionado, el programa utilizado es:



Ilustración 29: Programa LabVIEW.

El control de estas variables los vamos a llevar mediante la acción sobre la bomba y el ventilador, haciendo la conversión desde frecuencia hasta los valores de caudal o velocidad, según sea el caso.

Para ver el correcto funcionamiento de este control se utilizan medidores para observar si el valor consigna que se le ha dado corresponde, en realidad, al valor de velocidad o caudal que está produciéndose.

Para poner en marcha el sistema de control que se ha realizado, lo primero que se debe hacer es abrir el “*LabVIEW Project*” y se nos abre la siguiente ventana:

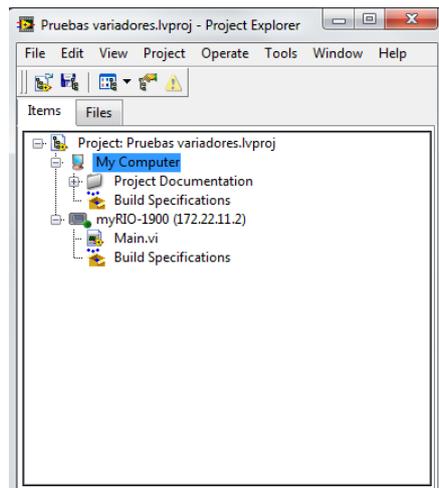


Ilustración 30: Ventana de LabVIEW Project.

Tras abrir esta ventana, podemos observar que está conectada la tarjeta de adquisición de datos porque en la pestaña myRIO-1900 tiene un círculo verde. En esta ventana, pinchamos en donde pone “Main.vi” que es el archivo donde se encuentra toda la programación que hemos llevado a cabo y se nos abre una ventana emergente donde se empieza a cargar la mencionada programación realizada:

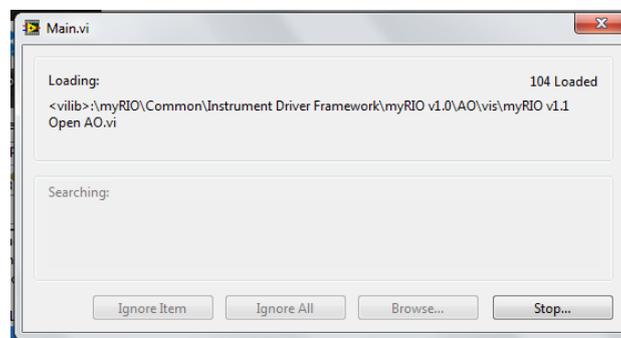


Ilustración 31: Ventana de “loading” del programa de control.

4.2. Descripción del software de adquisición de datos.

Para explicar el sistema de control y adquisición de datos que se ha llevado a cabo, vamos a proceder a explicar la estructura de la que se compone el mismo y, posteriormente, centrándonos en cada uno de las diferentes divisiones de la estructura en cuestión.

4.2.1. Diagrama de bloques.

Se procede a explicar cada una de las partes que componen el diagrama de bloques que se muestra a continuación:

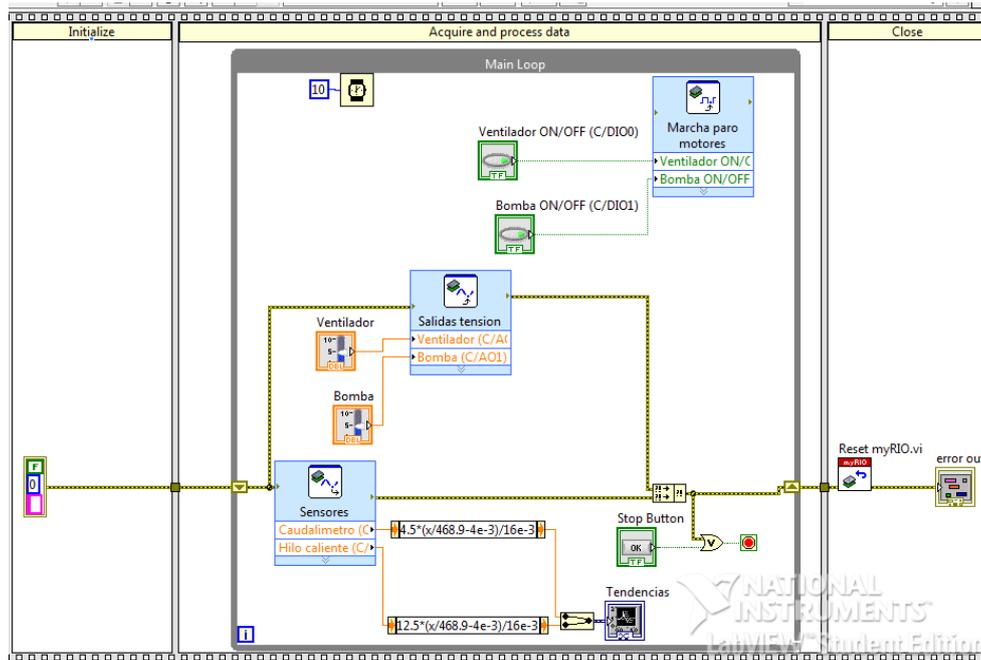


Ilustración 32: Diagrama de bloques.

Tras este diagrama procedemos a introducir cada uno de los bloques que aparecen en el mismo:

1.1. Flat Sequence Structure:

Se podría traducir como “estructura de secuencia plana” y consiste de uno o más subdiagramas que se ejecutan secuencialmente. Se utiliza la estructura de la secuencia plana, de modo que un subdiagrama se ejecute antes o después de otro subdiagrama.

El flujo de datos para las estructuras de secuencia plana difiere del flujo de datos para otras estructuras. Los marcos en una estructura de secuencia plana se ejecutan de izquierda a derecha y cuando todos los valores de datos conectados a un bastidor están disponibles.

Los datos dejan cada marco cuando el marco termina de ejecutarse. Esto significa que la entrada de un marco puede depender de la salida de otro marco.

En nuestro diagrama podemos observar tres zonas bien diferenciadas que es a lo que se le ha denominado “marcos”. Estos marcos son:

- Inicializar.
- Adquirir y procesar datos.
- Cerrar.

En la imagen se muestra un ejemplo de Flat Sequence Structure:

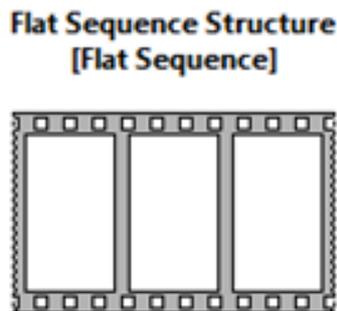


Ilustración 33: Flat Sequence Structure.

2.1. Inicializar:

Se compone de un grupo de tres elementos donde se puede observar los tipos de datos. En este grupo tenemos, de arriba hacia abajo secuencialmente:

- Una constante booleana (que indica falso en este caso).
- Una constante numérica.
- Una constante String (constante de cadena) que se utilizapara suministrar una cadena de texto constante para el diagrama de bloques.

En la imagen se muestra el grupo comentado con anterioridad:

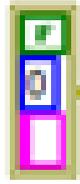


Ilustración 34: Constantes booleana, numérica y String.

3.1. Adquisición y procesado de datos:

a. **While loop:**

Se podría traducir como “bucle while” y repite el código dentro de su sub diagrama hasta que se produce una condición específica. Un bucle while ejecuta siempre al menos una vez. En la imagen se muestra un ejemplo de While Loop:

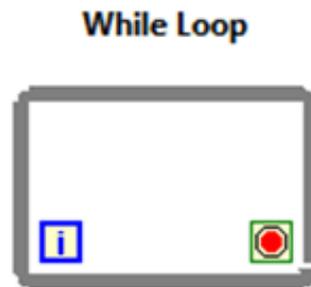


Ilustración 35: While Loop.

Donde el icono de la izquierda es el que nos indica el número de iteraciones completadas y el icono de la derecha indica la condición del bucle.

b. **Wait (ms):**

Espera el número especificado de milisegundos y devuelve el valor del temporizador de milisegundos.

Si se le cablea un valor de 0 a los milisegundos de espera de entrada obliga al subproceso a obtener el control de la CPU. En nuestro caso tenemos un valor especificado de 10 milisegundos. En la imagen se muestra un ejemplo de Wait:

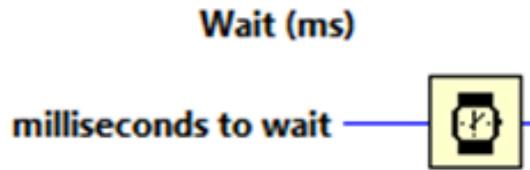


Ilustración 36: Wait (ms).

c. Marcha paro motores:

Escribe los valores de uno o más canales de salida digitales en el NI myRIO. En la imagen se muestra el subVI:

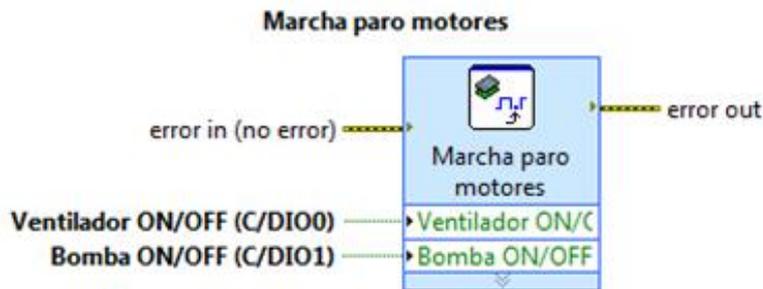


Ilustración 37: Marcha paro motores.

Se deben de configurar las salidas digitales, como se muestra en la imagen:

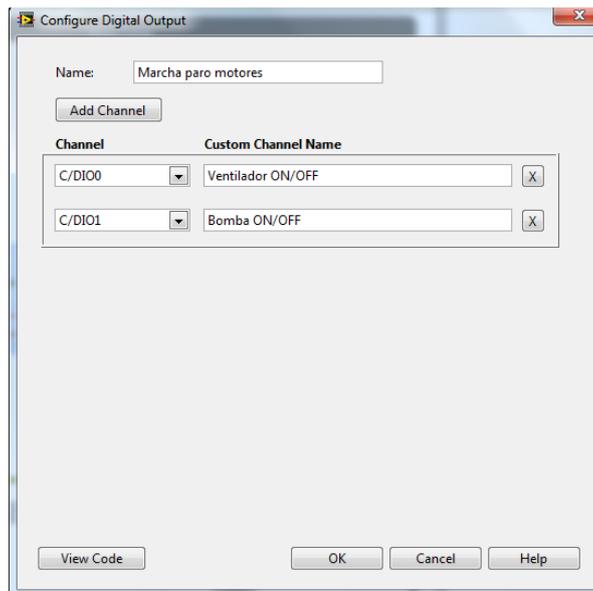


Ilustración 38: Configuración salidas digitales.

d. Controladores booleanos:

Tenemos un controlador booleano para el ventilador y otro para la bomba. Ambos se muestran en la ilustración 7 conectados a “Marcha paro motores” ya que nos son de utilidad para encender y apagar los dos equipos:

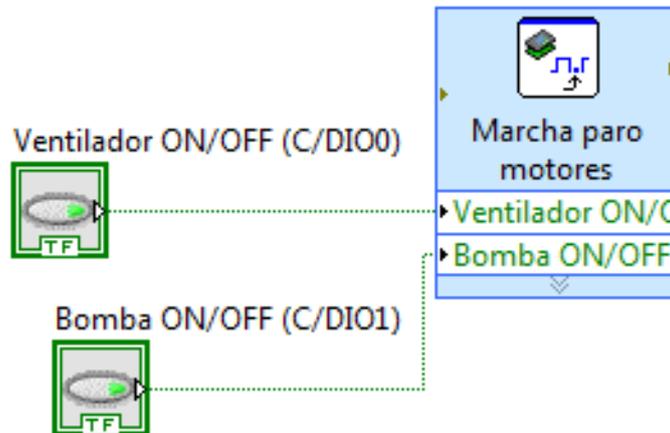


Ilustración 39: Controladores booleanos.

e. Salidas de tensión:

Escribe los valores de uno o más canales de salida analógica en la NI Myrio En la imagen se muestra el subVI:



Ilustración 40: Salidas de tensión.

En este caso, también se deben de configurar las salidas analógicas, como se muestra en la imagen:

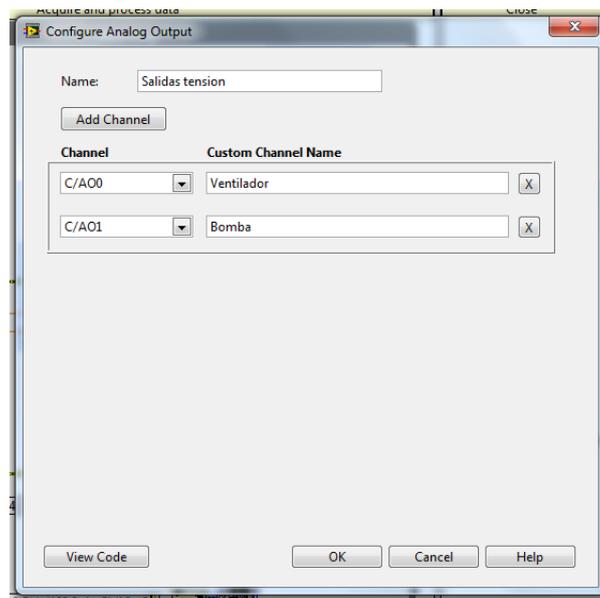


Ilustración 41: Configuración salidas analógicas.

f. Controladores numéricos:

Tenemos un controlador numérico para el ventilador y otro para la bomba. Ambos se muestran en la ilustración 10 conectados a “Salidas de tensión” ya que nos son de utilidad para darle un valor concreto a cada uno de los dos equipos:

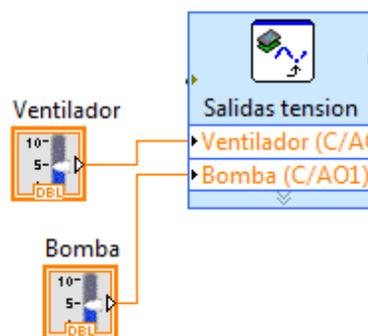


Ilustración 42: Controladores numéricos.

g. Sensores:

Lee los valores de uno o más canales de entrada analógica en la NI Myrio. En la imagen se muestra el subVI:

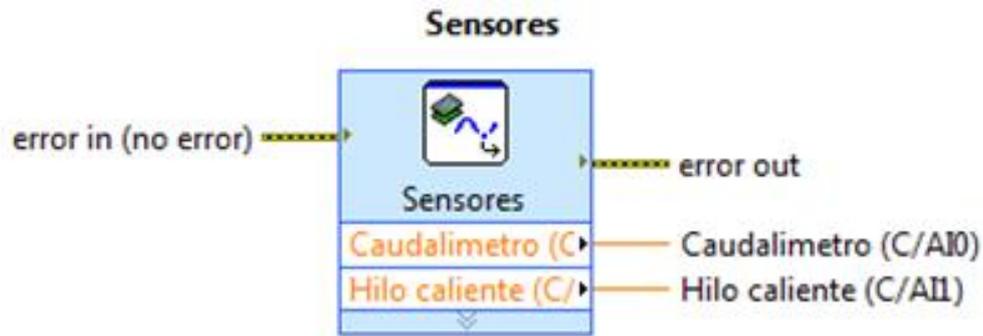


Ilustración 43: Sensores.

En este caso, también se deben de configurar las entradas analógicas, como se muestra en la imagen:

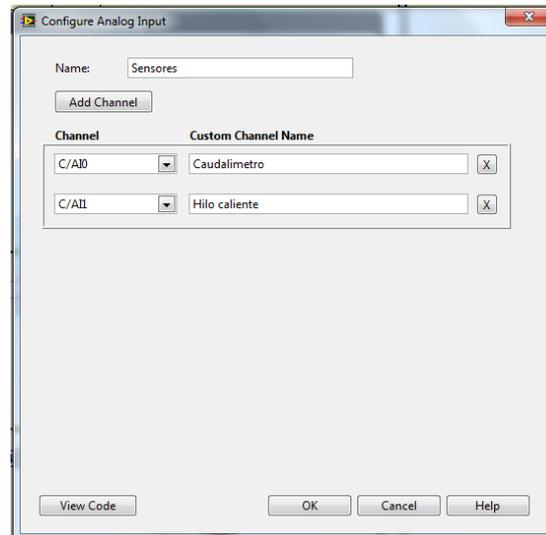


Ilustración 44: Configuración de las entradas analógicas.

h. Expression Node:

Se utiliza el "Nodo de Expresión" para calcular expresiones que contienen una sola variable. Las siguientes funciones integradas están permitidas en las fórmulas: abs, acos, acosh, asin, asinh, atan, atanh, ceil, cos, cosh, cot, csc, exp, expm1, floor, getexp, getman, int, intrz, ln, lnp1, log, log2, max, min, mod, rand, rem, sec, sign, sin, sinc, sinh, sizeofDim, sqrt, tan, tanh.

En nuestro caso tenemos dos expresiones:

$$\text{Caudalímetro} \rightarrow 4,5 \cdot \left(\frac{x}{468,9} - 4 \cdot 10^{-3} \right) / 16 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Hilo caliente} \rightarrow 12,5 \cdot \left(\frac{x}{468,9} - 4 \cdot 10^{-3} \right) / 16 \cdot 10^{-3}$$

i. Merge Signals:

Combina dos o más señales en una sola salida. Cambia el tamaño de la función de agregar entradas. Esta función aparece en el diagrama de bloques de forma automática cuando se conecta una señal de salida a la rama de cable de otra señal. En la imagen 13 se muestra:

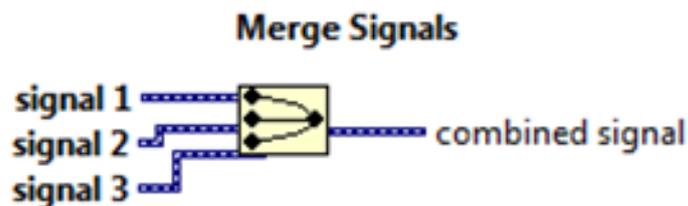


Ilustración 45: Merge Signals.

j. Tendencias:

Es un indicador del tipo Waveform Chart, que acepta los datos uno por uno y los va introduciendo así al gráfico, se lo puede considerar como que guarda un historial de los datos introducidos.



Ilustración 46: Tendencias.

k. Merge Errors:

Fusiona errores de I/O (Input – Output) de grupos de diferentes funciones.

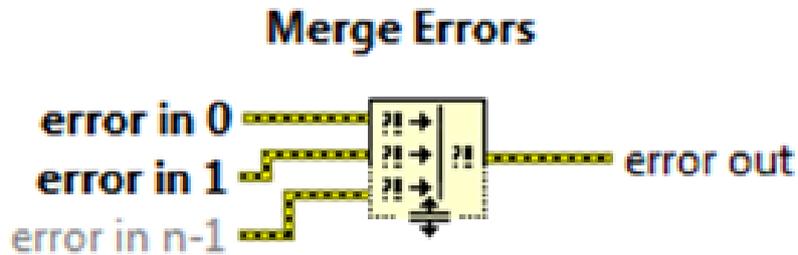


Ilustración 47: Merge Errors

l. Stop Button:

Es un controlador booleano que se utiliza para detener el experimento que se esté realizando en el momento.



Ilustración 48: Stop Button.

m. OR:

Calcula el OR lógico de las entradas. Ambas entradas deben ser valores booleanos, valores numéricos, o grupos de errores. Si ambas entradas son FALSAS, la función devuelve FALSO. De lo contrario, devuelve VERDADERO.

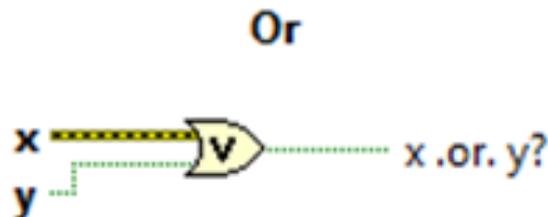


Ilustración 49: OR.

4.1. Cerrar:

a. Reset myRIO:

Restablece el objetivo FPGA y todos los canales de I/O en el NI Myrio. Este VI restablece la FPGA incluso cuando no hay código que se ejecuta en el objetivo FPGA y no importa si hay errores entrantes.

Este VI sólo se utiliza con el Myrio VI Express y sólo se debe ejecutar este VI una vez al final de una aplicación.

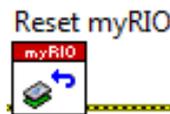


Ilustración 50: Reset myRIO.

b. Error out:

Este dispositivo nos indica si existe algún error o un aviso al ejecutar el programa.



Ilustración 51: Error out.

4.2.2. Panel frontal.

Este es el panel que se utiliza para poner en marcha la instalación, ya que desde aquí es donde se encienden o apagan los equipos y desde donde se les da un valor de consigna a las diferentes variables para que trabajen en el punto que más nos pueda interesar.

Se procede a explicar cada una de las partes que componen el panel frontal que se muestra a continuación:

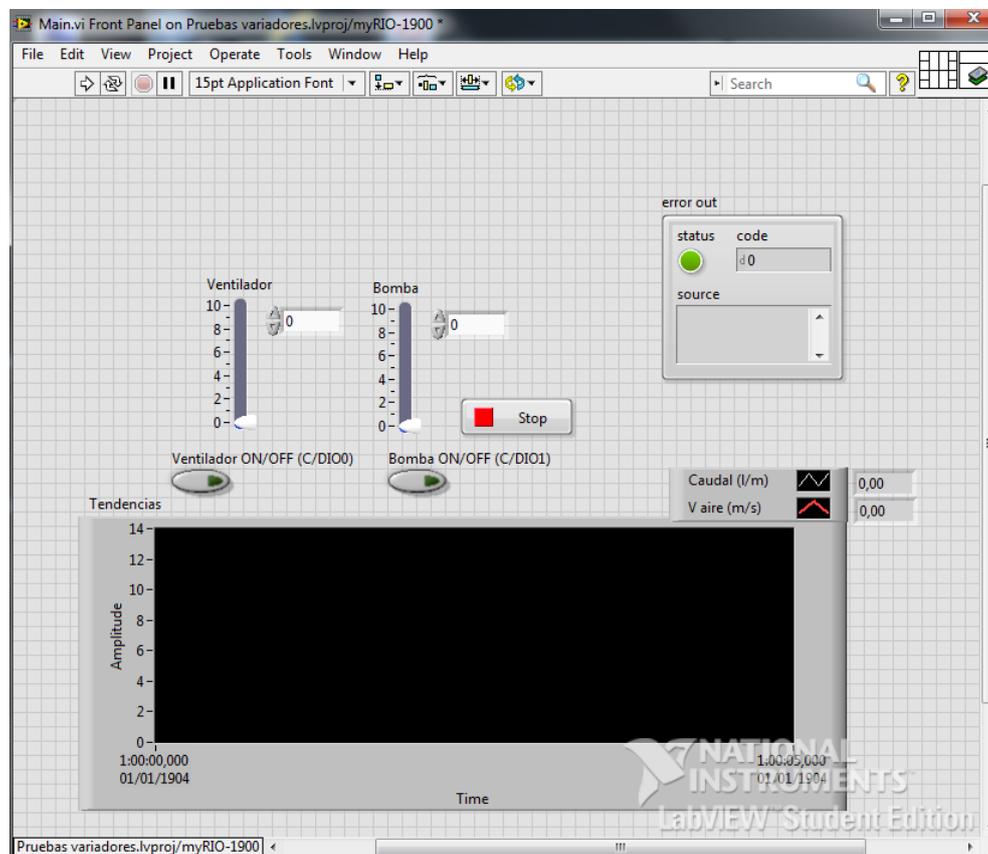


Ilustración 52: Panel frontal.

Después de observar el panel frontal, vamos a explicar los distintos elementos que lo constituyen y a que equivalen en el diagrama de bloques (son la representación de los bloques del diagrama en la ventana del panel):

a. **Error out:**

Es el equivalente al diagrama de bloques y, si la luz está verde, nos indica que está funcionando correctamente. En el caso contrario, la luz se pondría de color rojo.

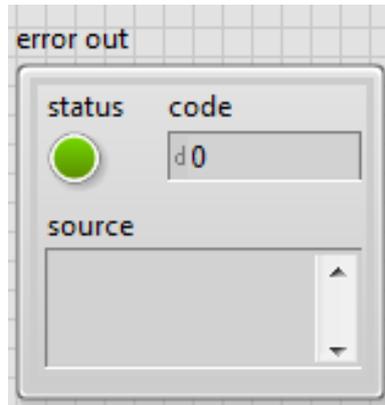


Ilustración 53: Error out en el panel frontal.

b. **Controladores booleanos de arranque:**

Son la representación de los controladores booleanos que hay en el diagrama de bloques. En este caso, cuando se enciende uno de los equipos, ya sea el ventilador o la bomba, la luz se pone de color verde para indicarnos que está en funcionamiento.

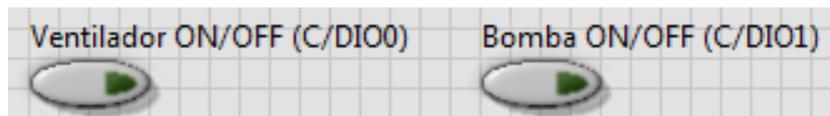


Ilustración 54: Controladores Booleanos en el panel frontal.

c. **Stop button:**

Es el botón para parar la ejecución del programa de LabVIEW.



Ilustración 55: Stop Button en el panel frontal.

d. Controladores numéricos:

Es desde donde se le asigna el valor de velocidad de aire o de caudal con el que queremos realizar el ensayo. Están acotados porque para nuestros ensayos no necesitábamos valores superiores a los que se muestran en la ilustración.

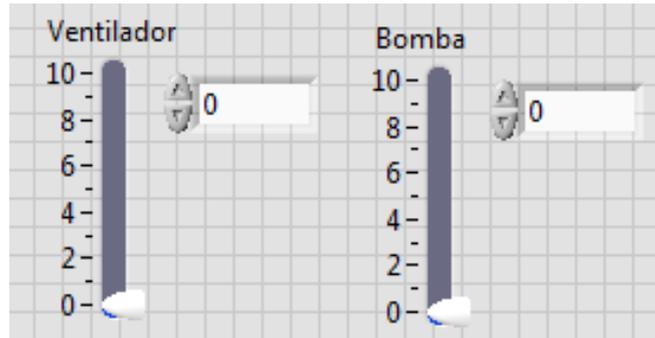


Ilustración 56: Controladores numéricos en el panel frontal.

e. Tendencias:

Es la representación gráfica de los datos de los aparatos de medida que se están leyendo. Cada valor de velocidad (color rojo) o caudal (color blanco) se va leyendo instantáneamente en los valores que aparecen a la derecha.

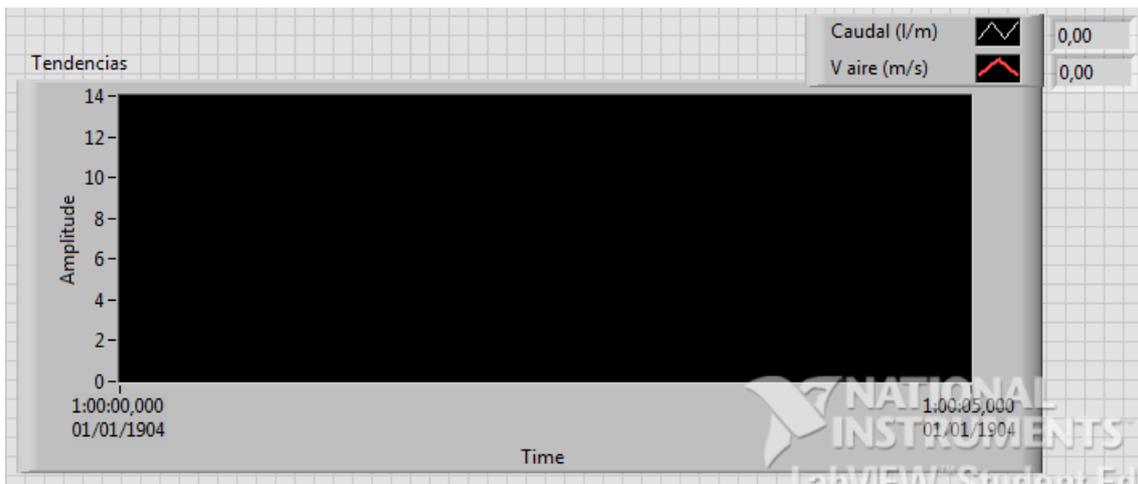


Ilustración 57: Tendencias en el panel frontal.

Capítulo 5.

Montaje y puesta en marcha de la instalación.

5. Montaje y puesta en marcha de la instalación.

Como la descripción detallada de los elementos y equipos que componen la instalación se realizó en capítulos anteriores, a continuación se van a enumerar dichos equipos y todo el material utilizado a modo de resumen para después describir el proceso de montaje y puesta en marcha.

Los elementos y equipos que forman la instalación experimental son:

- Estructura de la torre: una estructura prismática rectangular de 1,875m de altura, realizada en tubo cuadrangular de 25 mm de acero galvanizado, con canalización para evacuar el agua. Cerrada lateralmente con cuatro caras rectangulares fabricadas en metacrilato de metilo de 5 mm de espesor atornilladas a la estructura.
- Sección de ensayo: una estructura formada por dos superficies unidas entre sí por varillas, en las que se fijarán las dos placas que actuarán de separador de gotas. En una de las placas estará el canal donde se producirá la inyección de agua.
- Placas realizadas en metacrilato de 4 mm para reducir la sección del canal.
- Relleno.
- Sistema de depósito: donde se recoge el agua que llega al fondo de la torre y desde el que se alimenta al sistema de inyección.
- Sistema de bombeo: compuesto por una electrobomba centrífuga, de la marca CALPEDA, modelo NMM 1/AE.
- Para las conexiones del depósito, bomba... se utilizarán mangueras.
- Sistema de generación del flujo de aire:
 - Ventilador de tipo axial, Casals BDE 10/10 M4 0,55 kW.
 - Variadores de frecuencia Siemens MICROMASTER 420.
- Termoanemómetro de hilo caliente TSI AVT 8465-300-1.
- Foco de luz, KFB con potencia de 1000W.
- 2 trípodes, uno para el foco y otro para la cámara.

- 1 ordenador.

Debido a que la instalación experimental objeto del estudio es una instalación que servirá para el desarrollo de una de las tareas programadas dentro del proyecto de investigación “Análisis energético de instalaciones de climatización asociado a la variación del diseño de torres de refrigeración. Control de emisiones y su impacto en áreas urbanas (ENE2010-21679-C02-01/CON)” que el grupo de investigación de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena se encuentra desarrollando, partimos de una instalación que ya se encontraba montada y nuestro trabajo fue mejorarla.

Dentro de las mejoras que se realizaron, la secuencia de montaje que se realizó sigue el orden que se muestra a continuación:

Lo primero que se recibió fue el caudalímetro y se procedió a su montaje.

A continuación, se recibió la cámara de alta definición. En este momento procedimos a probar tanto el enfoque como la distancia óptima a la que se deberían hacer las grabaciones.

Tras esto, recibimos el generador de gotas.

Posteriormente, se instaló la tarjeta NI myRIO-1900 para que con el programa realizado con LabVIEW se pudiera llevar a cabo el control y la adquisición de datos de los experimentos.

Finalmente, al ver que para poder controlar con la tarjeta de *National Instruments*, necesitábamos el uso de los variadores de frecuencia, se instalaron.

Una vez ya montados todas las mejoras que se realizaron, la instalación estaba preparada para la realización de todos y cada uno de los ensayos.

Capítulo 6.

Toma de datos. Medidas.

6.1. Planificación de ensayos. Temporalización.

6.2. Presentación de resultados.

6. Toma de datos. Medidas.

6.1. *Planificación de ensayos. Temporalización.*

Se llevaron a cabo la calibración de cada uno de los equipos de medida que se utilizaron en la instalación experimental:

- Bomba.
- Ventilador.
- Caudalímetro.
- Hilo caliente.

Tras esto, teniendo los equipos calibrados, se procedió al estudio de los diferentes ensayos que se resumen a continuación:

- a. Primero, se procedió al estudio de la velocidad del aire en el desprendimiento de las gotas en el separador.
- b. Segundo, se estudió en impacto de las gotas producidas en el separador con y sin película de agua en dicho separador.

Procedemos a ver los estudios realizados en cada caso para conseguir la calibración de los equipos mencionados.

6.1.1. *Calibración de la bomba.*

Para la calibración de la bomba se hicieron ensayos a diferentes frecuencias. En cada uno de los casos se tomaron más de 600 datos para que los resultados fuesen totalmente representativos. Cabe destacar que los primeros datos se despreciaron hasta conseguir que los resultados obtenidos se estabilizasen.

En la siguiente tabla resumen se puede observar los valores obtenidos en este apartado:

Tabla 3: Resultados de la calibración de la bomba.

Velocidad real (r/min)	Intensidad (A)	Tensión de salida real (V)	Frecuencia real (Hz)	Q _{medio} (L/min)	I _{media} (mA)
311	0,77	41	9,1	0,1172862	4,4170177
310	0,78	42	9,2	0,2130303	4,757441
309	0,78	42	9,3	0,2835489	5,008174
310	0,78	43	9,5	0,3847488	5,3679959
310	0,78	45	10	0,5811249	6,0662217
308	0,79	46	10,2	0,6660261	6,3680927
309	0,79	48	10,5	0,7585115	6,6969299
309	0,79	50	11	0,8950454	7,1823835
307	0,84	68	15	1,8037505	10,413335
304	0,92	91	20	2,7464471	13,765145
304	0,94	96	21	2,9274194	14,408602
305	0,99	105	23	3,2630887	15,602093
301	1,05	114	25	3,593589	16,777205
299	1,23	137	30	4,3883296	19,60295
295	1,38	160	35	5,1564506	22,334047

Si representamos los datos de caudal frente a frecuencia, obtenemos la siguiente ilustración donde, además de la representación de los datos anteriormente expuestos, podemos ver que se trata de una gráfica de tipo logarítmica o exponencial según como se representen los datos (se adjuntan las ecuaciones de las mismas y los coeficientes de correlación de ambas gráficas):

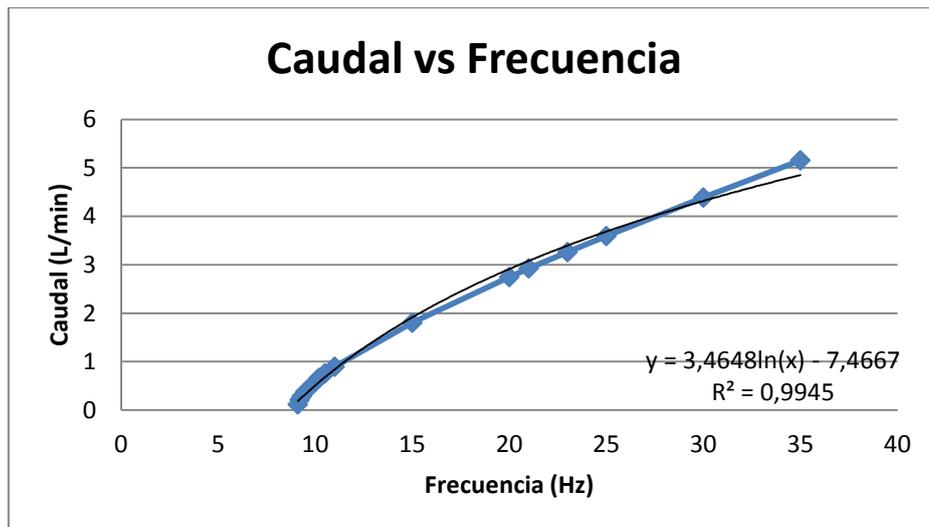


Ilustración 58: Caudal vs Frecuencia en la bomba.

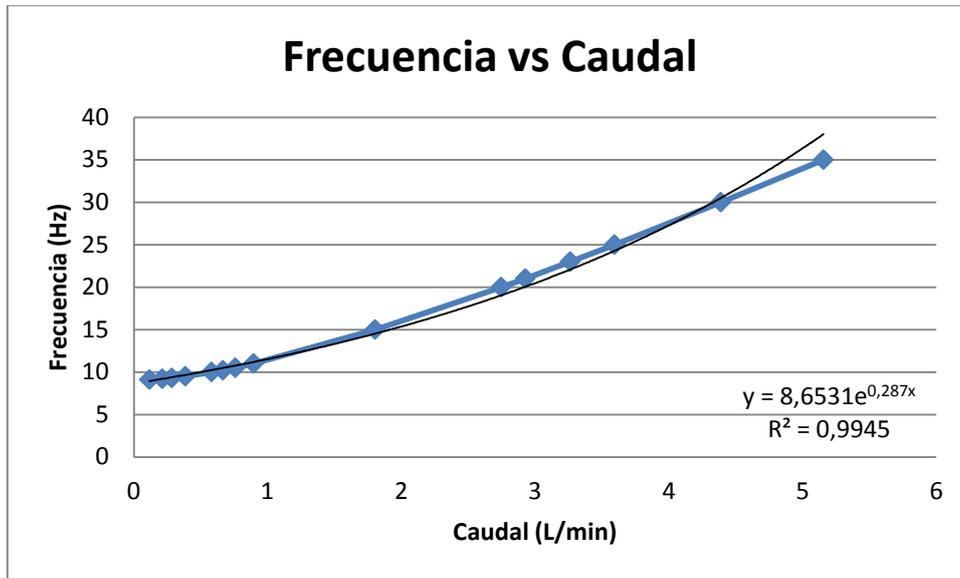
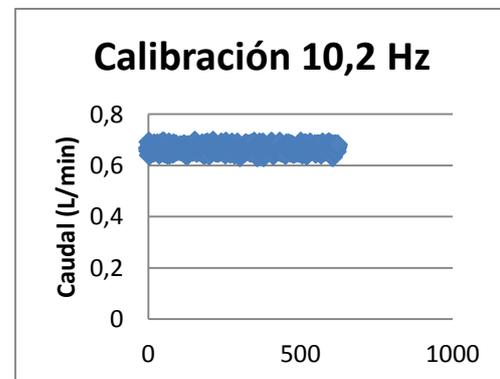
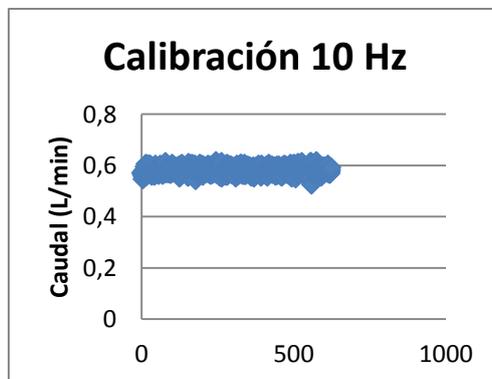
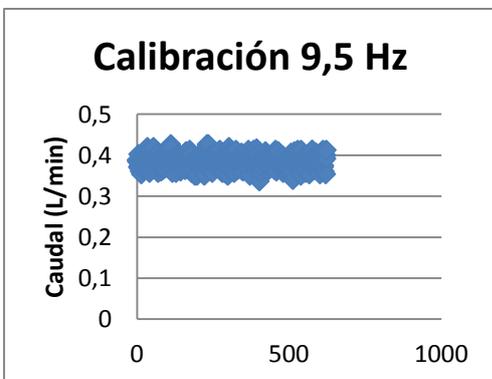
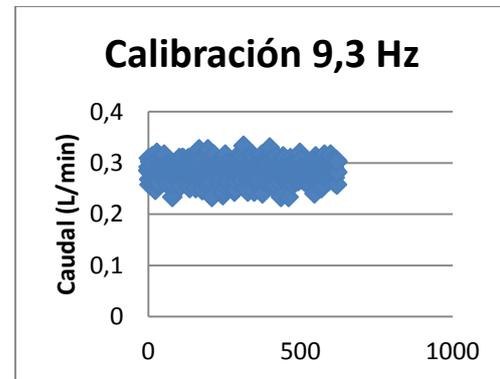
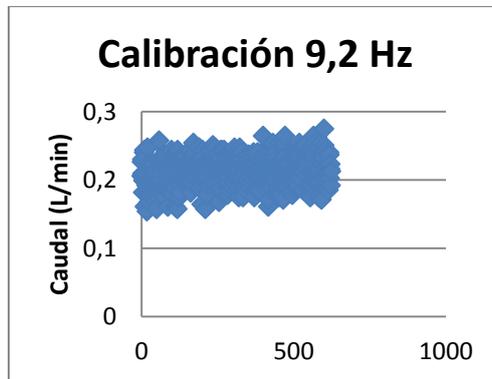
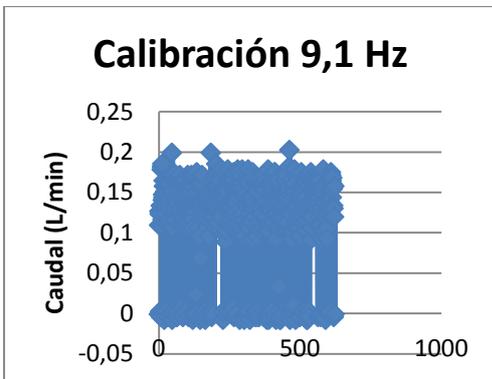


Ilustración 59: Frecuencia vs Caudal en la bomba.

Para la calibración de la bomba se realizaron los ensayos anteriormente descritos, obteniéndose:



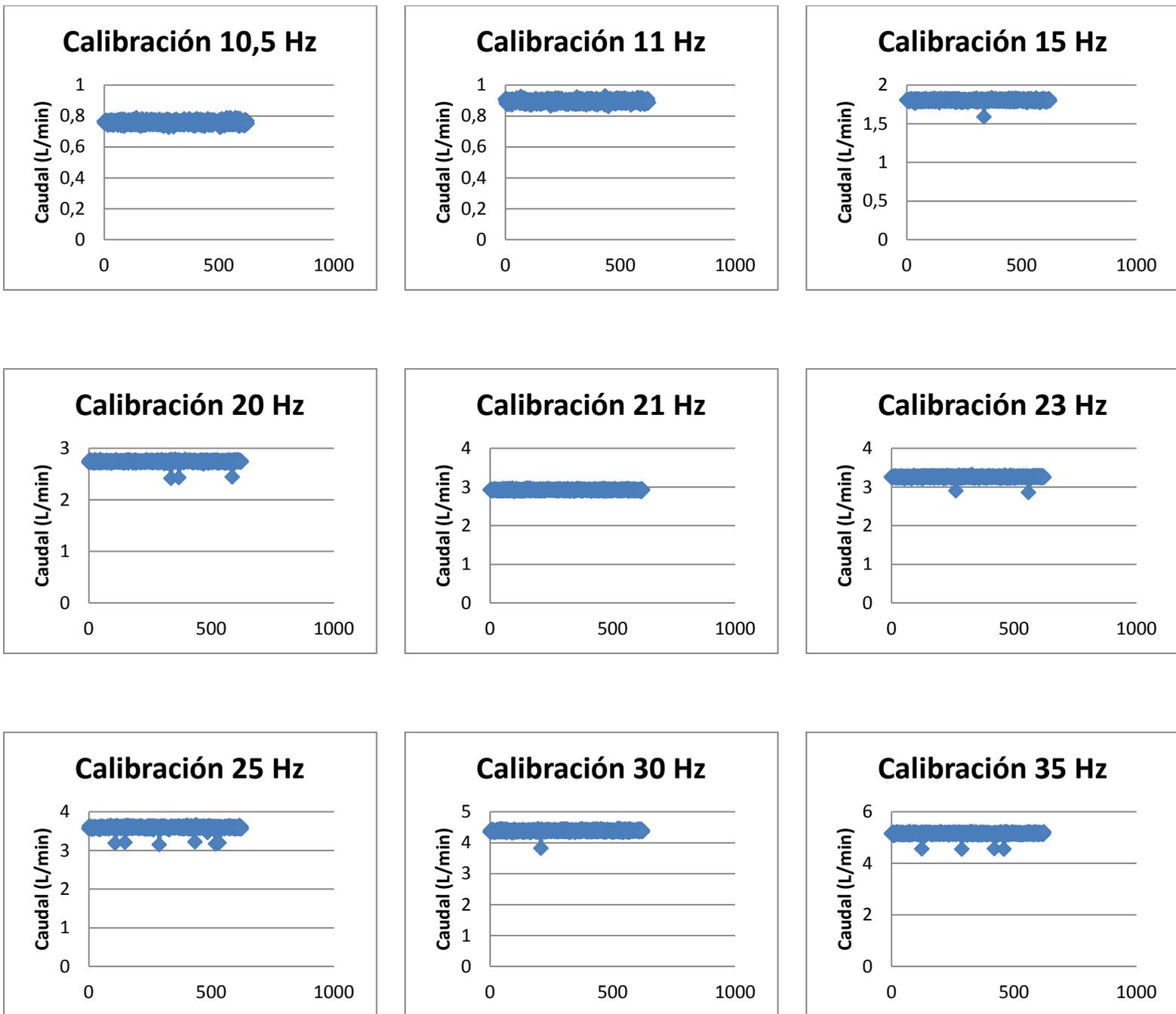


Ilustración 60: Resultados de los ensayos de calibración de la bomba.

6.1.2. Calibración del ventilador.

Para la calibración del ventilador también se realizaron numerosos ensayos a diferentes frecuencias. En la siguiente tabla, se muestran resumidamente los resultados obtenidos:

Tabla 4: Resultados de la calibración del ventilador.

Velocidad real (r/min)	Tensión de salida real (V)	Frecuencia real (Hz)	V _{medio} (m/s)	Ajuste hilo caliente
306	51	10	1,7165197	12,5
306	51	10,5	1,8774536	12,5
306	51	10,7	1,9534458	12,5
306	51	10,9	2,0010194	12,5
306	51	11	2,0341482	12,5
303	73	15	3,2106143	12,5
303	73	17,8	3,9728914	12,5
303	73	17,9	4,0127716	12,5
301	95	20	4,562145	12,5
298	117	25	5,9386401	12,5
298	117	25,3	6,0146323	12,5
298	117	25,5	6,0655031	12,5
298	117	26	6,1918951	12,5
298	117	26,7	6,3616215	12,5
298	140	30	7,1695881	12,5
298	140	33,3	7,99985	12,5
298	140	33,8	8,1265561	12,5
298	140	34	8,161883	12,5
295	162	35	8,414824	12,5
293	185	40	9,5116866	12,5
293	185	43	10,009875	12,5
293	185	44	10,17866	12,5
290	207	45	10,198286	12,5
278	210	50	10,860234	12,5

Para ver el tipo de relación que tienen, en este caso la velocidad y la frecuencia se realizó la representación gráfica y se pudo observar la siguiente ilustración:

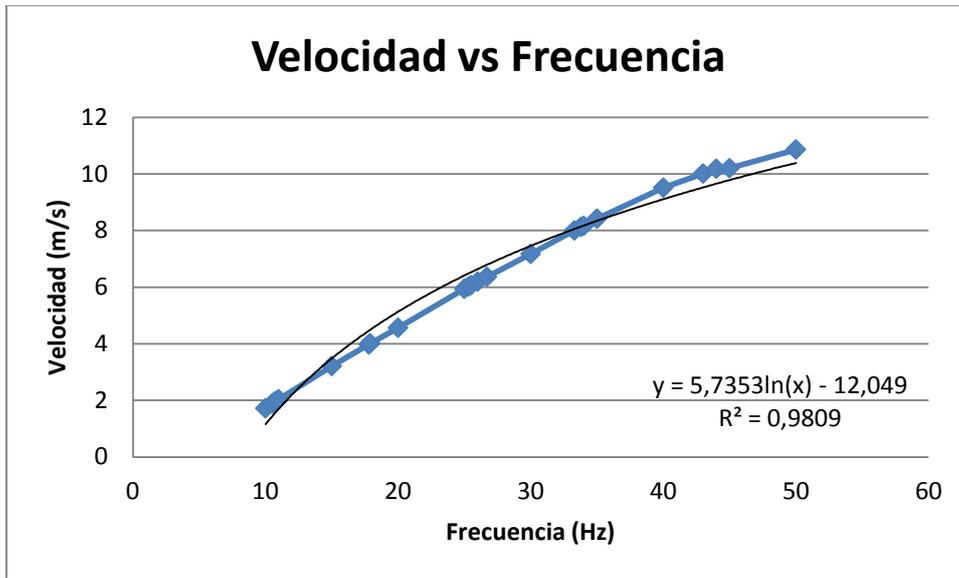


Ilustración 61: Velocidad vs Frecuencia en el ventilador.

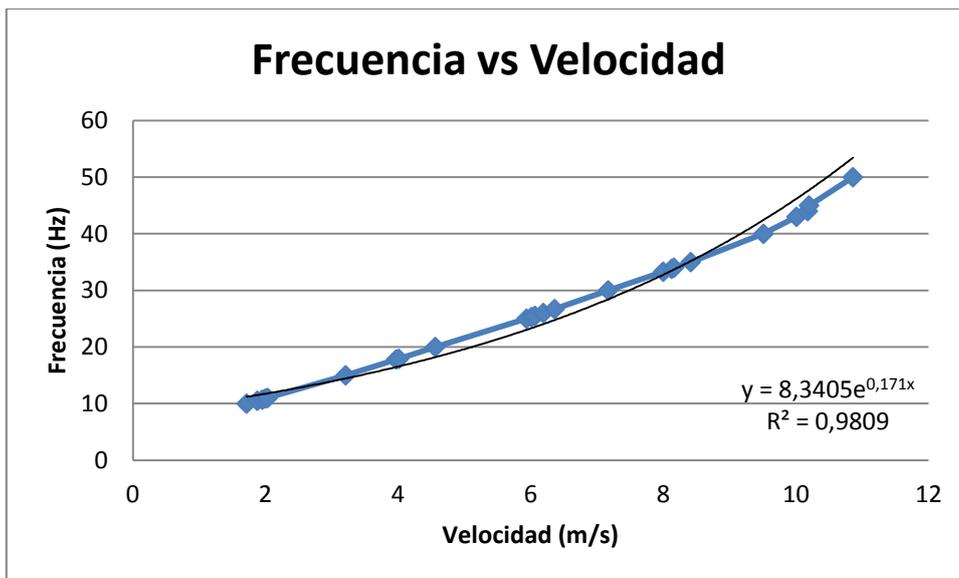
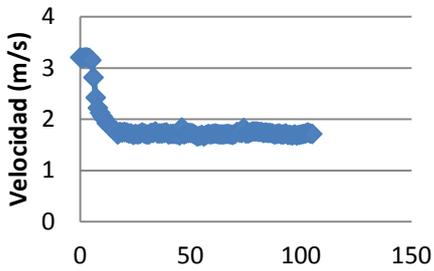


Ilustración 62: Frecuencia vs Velocidad en el ventilador.

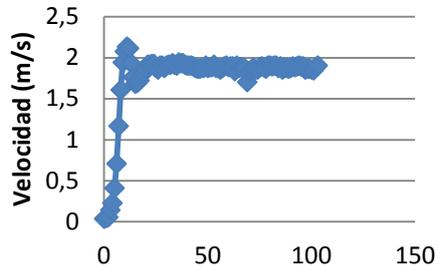
En estos casos, también se adjuntan las ecuaciones y los coeficientes de correlación de ambas representaciones.

Para la calibración de la bomba se realizaron los ensayos anteriormente descritos, obteniéndose:

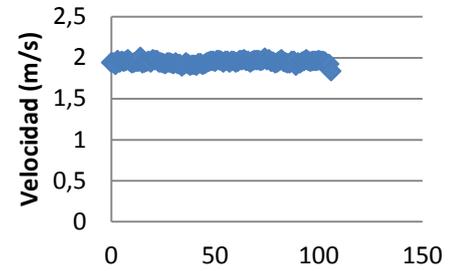
Calibración 10 Hz



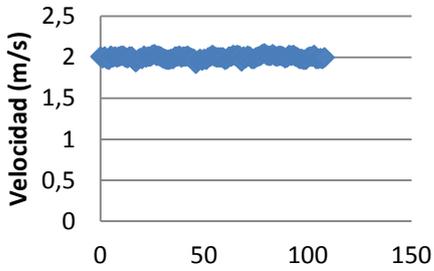
Calibración 10,5 Hz



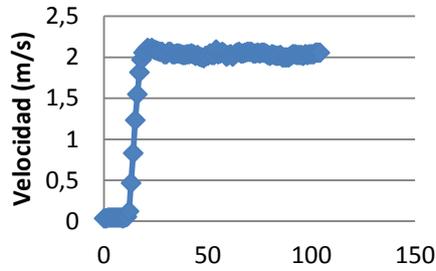
Calibración 10,7 Hz



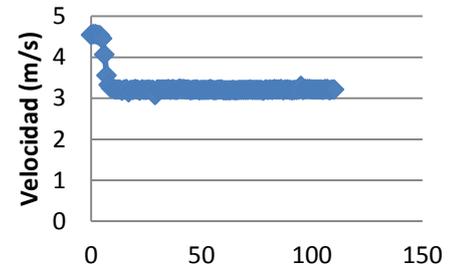
Calibración 10,9 Hz



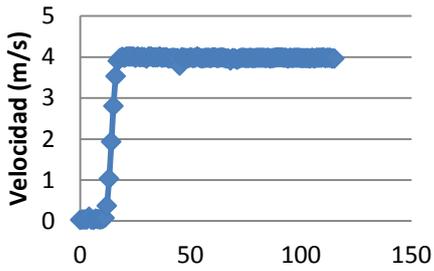
Calibración 11 Hz



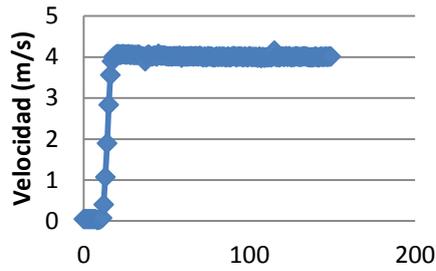
Calibración 15 Hz



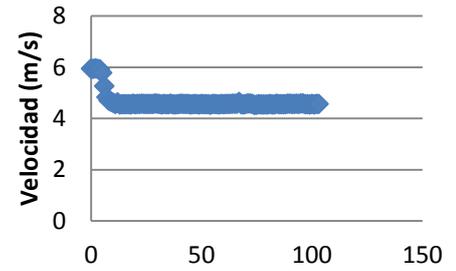
Calibración 17,8 Hz



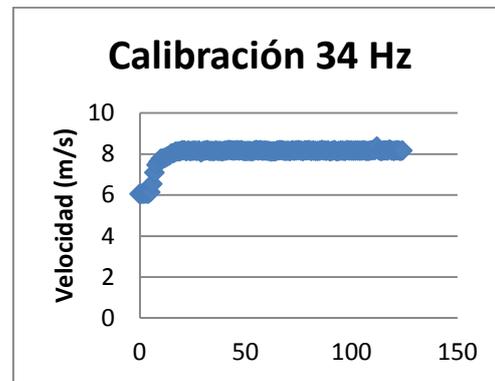
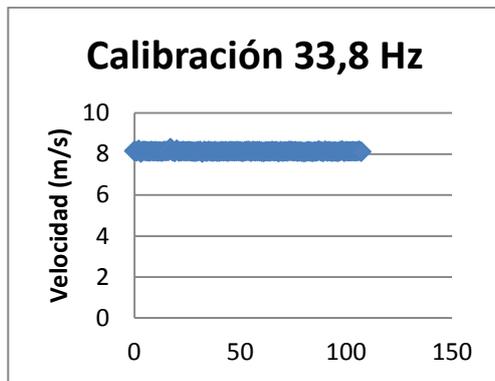
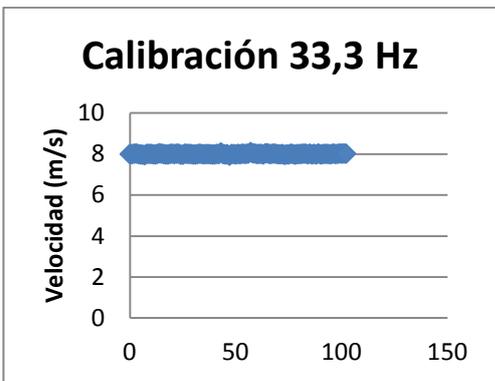
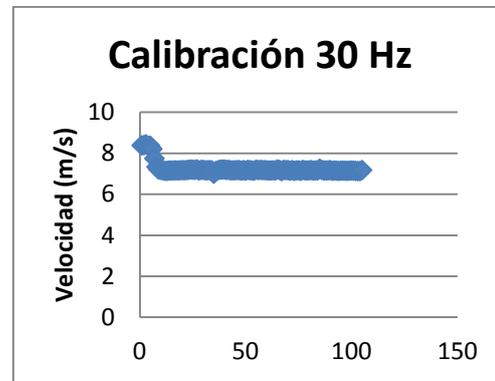
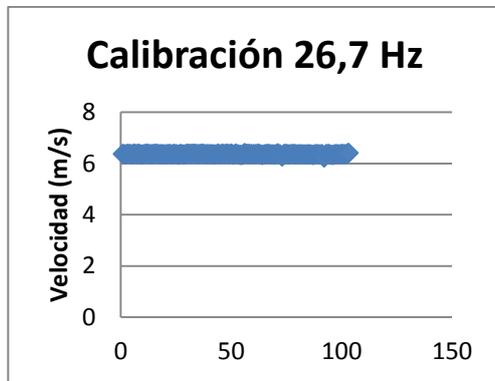
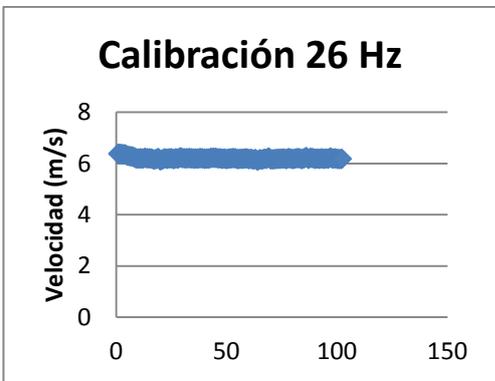
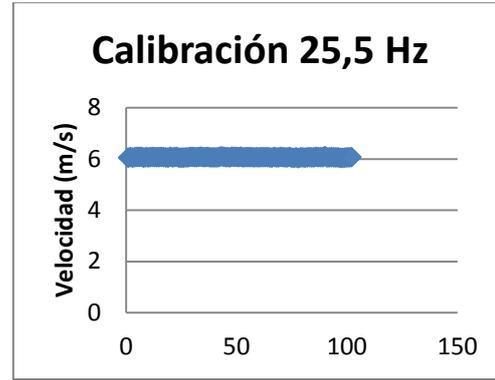
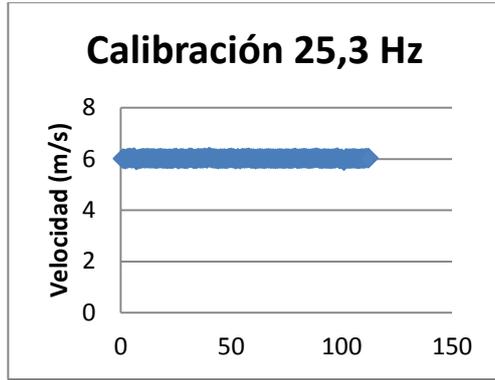
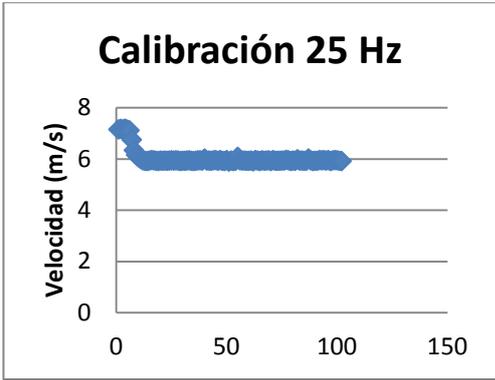
Calibración 17,9 Hz



Calibración 20 Hz



Estudio de la emisión de gotas generadas en separadores de gotas en torres de refrigeración



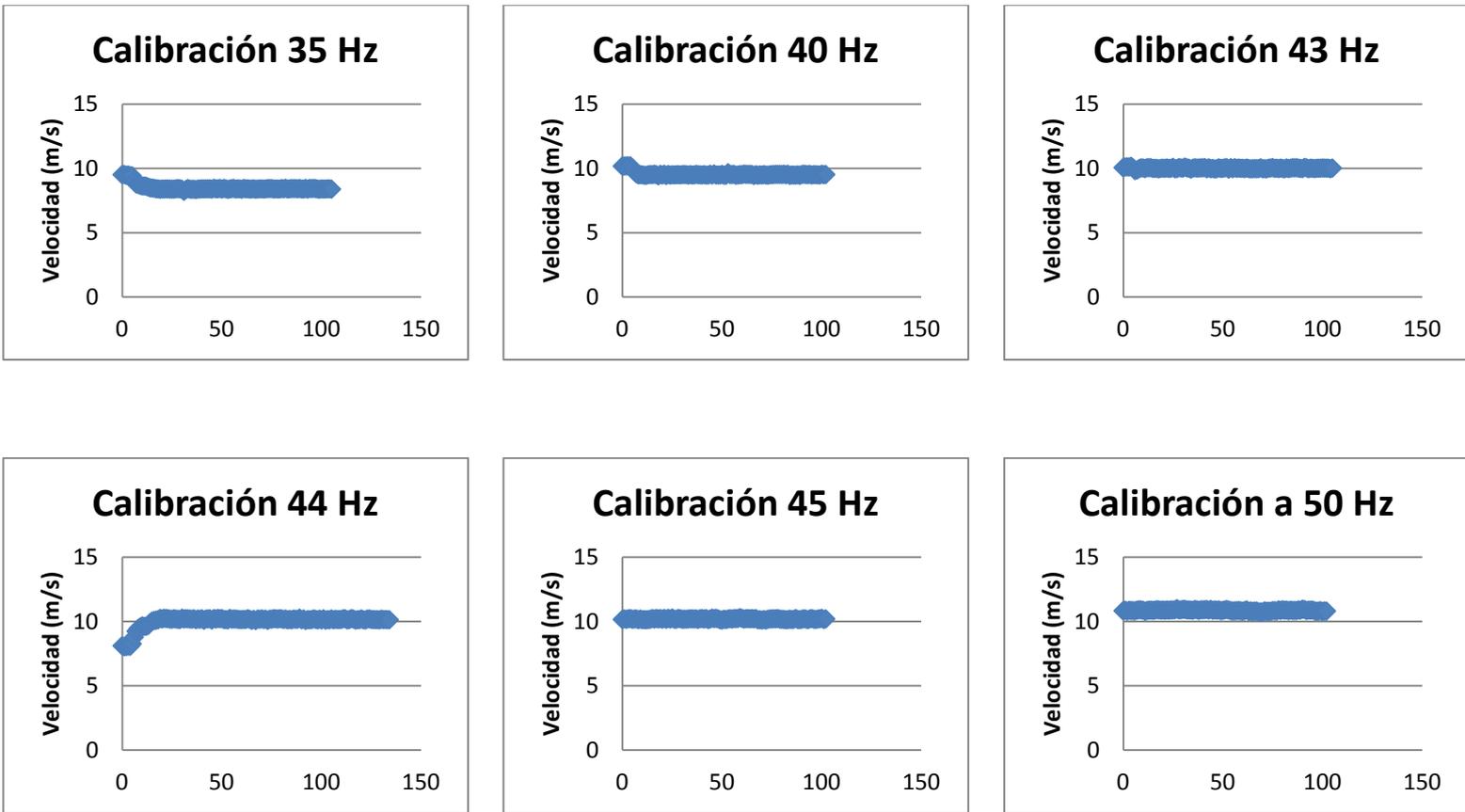


Ilustración 63: Resultados de los ensayos de calibración del ventilador.

6.1.3. Calibración del caudalímetro.

Para la calibración del caudalímetro se ha utilizado el “Factor K ” que es el número de impulsos que genera un sensor por cada unidad de líquido que pasa por el sensor.

En la siguiente tabla se recogen los valores de caudal y del factor K utilizados en esta calibración:

Tabla 5: Valores usados para la calibración del caudalímetro.

Caudales (L/min)	Factor K
0,1003	7545,39
0,7367	8841,82
1,3701	9079,32
1,9728	9141,17
2,5991	9251,47
3,2386	9207,19
3,8826	9247,09
4,4898	9211,51

Realizamos la representación:

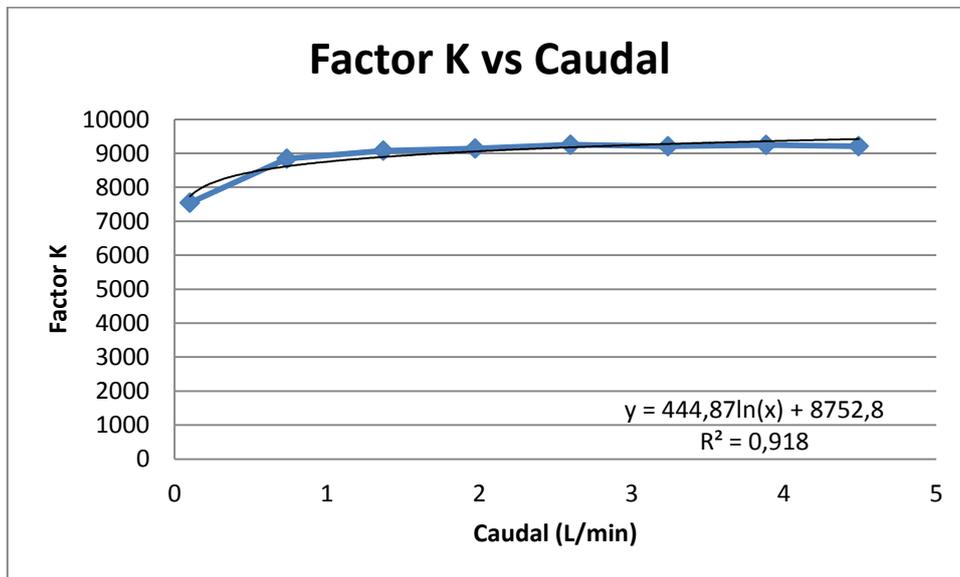


Ilustración 64: Factor K vs Caudal en el caudalímetro.

6.1.4. Calibración del hilo caliente.

Para la calibración del hilo caliente, se realizó una regresión para saber el comportamiento, obteniéndose la siguiente ilustración:



Ilustración 65: Regresión de ajuste del hilo caliente.

6.2. *Presentación de resultados.*

Para la planificación y presentación de los resultados, se subdividieron en dos los experimentos realizados. Esta división fue:

- Ensayos con el generador de gotas.
- Ensayos de desprendimiento de gotas en el separador.

En cada caso, se realizaron experimentos a distintos caudales y velocidades de aire. A continuación se exponen detalladamente los ensayos realizados.

6.2.1. *Ensayos de desprendimiento de gotas en el separador.*

6.2.1.1. *Introducción.*

El objetivo de estos ensayos es obtener imágenes y videos de las películas de agua que se forman y de las gotas que se desprenden en nuestro sistema, para después estudiar su comportamiento y obtener mediante programas informáticos los espesores de película y los tamaños de las gotas desprendidas para los distintos caudales de agua y

velocidades de viento estudiados. Además, otro objetivo es el de obtener para distintas posiciones, las velocidades límite a partir de las cuales comienzan a desprenderse gotas dependiendo del caudal de la película de agua.

6.2.1.2. Procedimiento.

Lo primero que haremos en cada ensayo es determinar las velocidades límite de desprendimiento de gotas para ese caudal en las tres zonas más críticas de separador, para ello se pone en marcha la instalación con la configuración y el caudal a estudiar y a continuación, una vez que se forma la película fluida, se obtiene la posición del variador de velocidad (frecuencia o r.p.m. del motor del ventilador) que nos indique cuando comienzan a desprenderse gotas, tanto a la entrada como a la salida del separador y en el codo de la placa anterior a la placa donde se produce la película de agua. A estas velocidades las denominaremos VLE (Velocidad límite a la entrada del separador), VLS (Velocidad límite a la salida del separador) y VLC (Velocidad límite en el codo de la placa anterior a la de estudio). Tendremos una VLE, una VLS y una VLC para cada caudal.

En la figura 66 podemos ver las zonas críticas para las que se han obtenido dichas velocidades de desprendimiento:

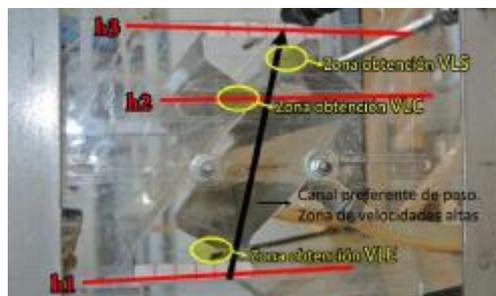


Ilustración 66: Localización de las posiciones para el cálculo de las velocidades VLE, VLC y VLS.

Una vez localizadas dichas velocidades se realizan los correspondientes ensayos, con ayuda del foco se toman las imágenes y videos de las seis posiciones descritas a

continuación (ilustraciones 67, 68 y 69) para cada una de las velocidades a ensayar; para V0 (ventilador apagado), para las cinco velocidades V1, V2, V3, V4 y V5 y para las velocidades VLE, VLS y VLC de cada caudal.

Todos los ensayos se repetirán para 5 caudales distintos: Q1, Q2, Q3, Q4 y Q5.

Las posiciones donde se toman imágenes y videos en las placas del separador de gotas son las siguientes:

- P1: Posición central de frente a la salida del separador.
- P2: Posición central de frente a la entrada del separador.
- P3: Perfil del separador de gotas para medir el espesor de la película fluida.
- P4: Vista general de la película fluida.
- P5: Vista de la salida del separador de gotas.
- P6: Vista de la entrada del separador de gotas.

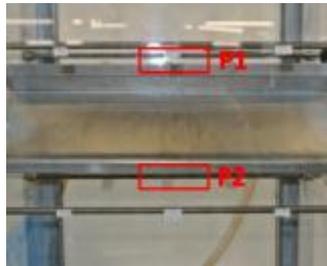


Ilustración 67: Localización de las posiciones P1 y P2.



Ilustración 68: Localización de la posición P3.

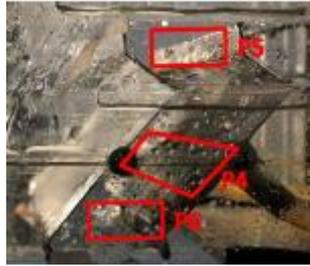


Ilustración 69: Localización de las posiciones P4, P5 y P6.

6.2.1.3. Resultados.

Todos los resultados obtenidos se encuentran en el ordenador del laboratorio en los ficheros con la siguiente dirección:

- Escritorio/Mis documentos/Torre experimental/2- ENSAYOS TORRE EXPERIMENTAL /1- ENSAYOS DE DESPRENDIMIENTO DE GOTAS

Siendo:

- Calibración Ventilador - Bomba.xlsx → Los valores de velocidad de viento y caudal obtenidos tanto en la calibración del ventilador como en la de la bomba. Los valores de viento se toman con la sección de paso de aire reducida al 33%, ya que en las pruebas se observa que con la nueva regulación del ventilador podemos conseguir todas las velocidades deseadas con ésta única configuración. Los valores de velocidad de viento son tomados en el punto 5.5, posición central de la placa a la altura h_1 y lo más próxima a la pared. Se han tomado valores también en la posición 2.5 a la misma altura para el cálculo de VLE, VLC y VLS.
- En las carpetas se encuentran los videos para las distintas posiciones, y para el cálculo de las velocidades VLE, VLC y VLS. Los archivos se nombran P-Q-V, siendo P la posición enfocada, Q el caudal de agua de la película y V la velocidad de aire, pudiéndose mostrar ésta última también como la frecuencia de funcionamiento del ventilador.

Los valores obtenidos para los caudales son:

- $Q_1 = 0,12 \text{ L/min.}$
- $Q_2 = 0,28 \text{ L/min.}$
- $Q_3 = 0,67 \text{ L/min.}$
- $Q_4 = 1,80 \text{ L/min.}$
- $Q_5 = 2,92 \text{ L/min.}$

En la obtención de los valores medios de las velocidades límite de desprendimiento de gotas para cada caudal se ha hecho reduciendo la longitud de la película a 5 cm, por tanto, si tomamos el valor de caudal por unidad de longitud tendremos para estos casos en particular;

- $Q_2' = 0,28 \text{ L/min} = 4,5 \text{ L/min}\cdot\text{m}$
- $Q_5' = 2,92 \text{ L/min} = 10,68 \text{ L/min}\cdot\text{m}$

Como se ha dicho antes, en el cálculo de las velocidades límite, primero se toma el valor de las frecuencias del ventilador y posteriormente se miden las velocidades con el anemómetro de hilo caliente.

Los rangos de frecuencias obtenidos son:

Tabla 6: Rango de frecuencia del ventilador para las velocidades límite de desprendimiento.

	Caudal	Rango frecuencia ventilador (Hz)	Velocidades (m/s)
VLE	Q_2'	10 – 12	1,58 – 2,15
	Q_5'	14 – 15	2,71 – 3,02
VLC	Q_2'	22 – 22,4	5,06 – 5,2
	Q_5'	21 – 22	4,78 – 5,06
VLS	Q_2'	22 – 23	5,06 – 5,34
	Q_5'	21 – 22	4,78 – 5,06

Para tener claro donde se localizan los puntos en los que se mide la velocidad se muestra la ilustración 70, los puntos definen el espacio que queda entre las placas del separador de gotas. Las alturas quedan también definidas con la figura 66.



Ilustración 70: Distribución y denominación de los puntos en las secciones de la torre.

Ahora tomamos como valor aproximado de velocidad la frecuencia en la que se han observado los primeros desprendimientos y tenemos la siguiente tabla:

Tabla 7: Velocidades límite tomadas en la entrada al separador a partir de las cuales comienza a observarse arrastre de gotas para distintas posiciones y caudales.

	Q2'	Q5'
VLE	2,15 m/s	3 m/s
VLC	5,2 m/s	5 m/s
VLS	5,3 m/s	5 m/s

Se observa que las velocidades límite en la salida y zona intermedia del separador se producen prácticamente para una misma velocidad en la zona baja del separador (5, 5,2 y 5,3 m/s). Además, en estas zonas tiene muy poca influencia el caudal de la película. Podemos decir que tendremos una velocidad límite de trabajo en la zona baja del separador para placas con esta geometría de unos 5 m/s.

Si traducimos los valores de frecuencia anteriores a velocidad y calculamos dicha velocidad con ayuda del perfil de velocidades en los puntos exactos del desprendimiento obtenemos la siguiente tabla de valores:

Tabla 8: Valores de velocidades límite de desprendimiento para los caudales Q2' y Q5'.

	Q2'	Q5'
*VLE	2,15 m/s	3 m/s
*VLC	9,9 m/s	9,5 m/s
*VLS	11 m/s	11,6 m/s

Siendo las velocidades límite calculadas para los siguientes puntos (ilustración número 5):

- VLE: Punto 2,5 para h1.
- VLC: Punto 2,1 para h2.
- VLS: Punto 2,5 para h3.

En las zonas más altas del separador, las velocidades límite aumentan hasta los 10-12 m/s y, al igual que antes, se observa poca influencia en las velocidades límite de desprendimiento con la variación del caudal de agua de la película.

Las velocidades con las que se realizan el resto de los ensayos son:

- $V_0 = 0$ m/s
- $V_1 = 2$ m/s
- $V_2 = 4$ m/s
- $V_3 = 6$ m/s
- $V_4 = 8$ m/s
- $V_5 = 10$ m/s

Para representar los valores medios de las velocidades límite de desprendimiento de gotas obtenidas para cada caudal:

- $Q_1 = 0,14$ L/min.
- $Q_2 = 0,28$ L/min.
- $Q_3 = 0,67$ L/min.
- $Q_4 = 2,92$ L/min.

Para la medición de estas velocidades, lo que se hizo fue tomar las posiciones del variador para cada una de ellas, y posteriormente, una vez que la torre no contiene agua, volver a colocar el anemómetro de hilo caliente y medir esas velocidades, puntos centrales de la placa a las alturas h1 y h3.

En realidad tenemos las velocidades para una determinada posición del variador por lo que vamos a tener valores de esas velocidades para la altura h1 y para la altura h2.

Las velocidades para la altura h1 son:

- VL1 del Q1 = 4,55 m/s.
- VL2 del Q1 = 5,92 m/s.
- VL1 del Q2 = 4,36 m/s.
- VL2 del Q2 = 5,62 m/s.
- VL1 del Q3 = 4,34 m/s.
- VL2 del Q3 = 5,00 m/s.
- VL1 del Q4 = 4,34 m/s.
- VL2 del Q4 = 5,48 m/s.

Representando estos valores tenemos:

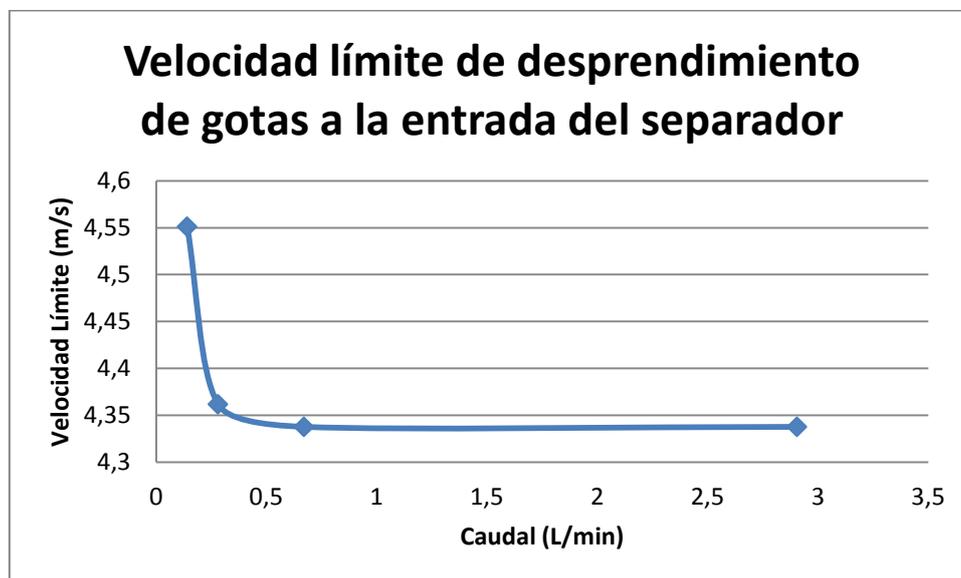


Ilustración 71: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la entrada del separador.

Mientras que las velocidades para la altura h_3 son:

- VL1 del Q1 = 10,00 m/s.
- VL2 del Q1 = 13,71 m/s.
- VL1 del Q2 = 9,69 m/s.
- VL2 del Q2 = 12,98 m/s.
- VL1 del Q3 = 9,58 m/s.
- VL2 del Q3 = 11,30 m/s.
- VL1 del Q4 = 9,58 m/s.
- VL2 del Q4 = 12,50 m/s.

Representando estos valores tenemos:

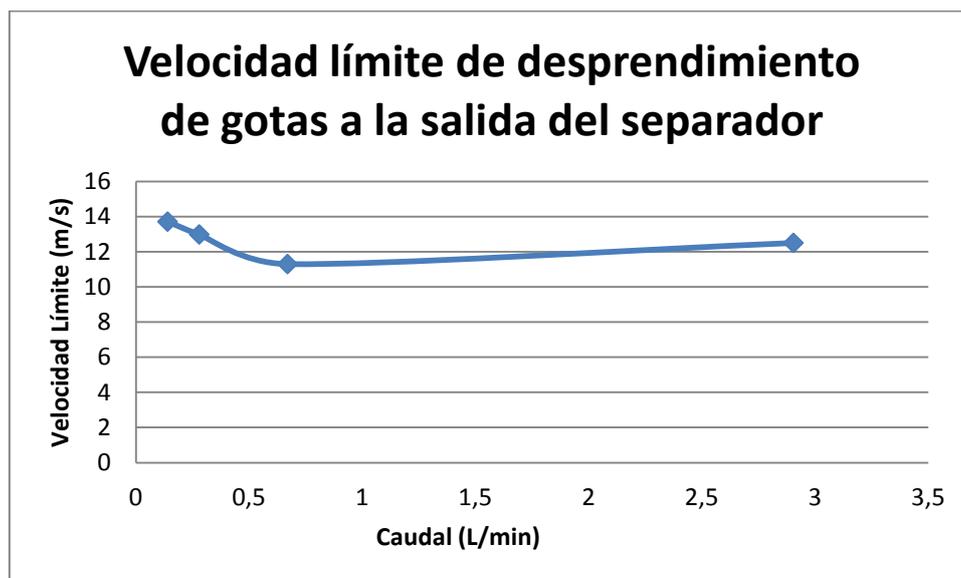


Ilustración 72: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la salida del separador.

6.2.1.4. Imágenes.

A continuación se muestra un ejemplo de las imágenes tomadas durante los ensayos en el cálculo de las velocidades límite de desprendimiento:

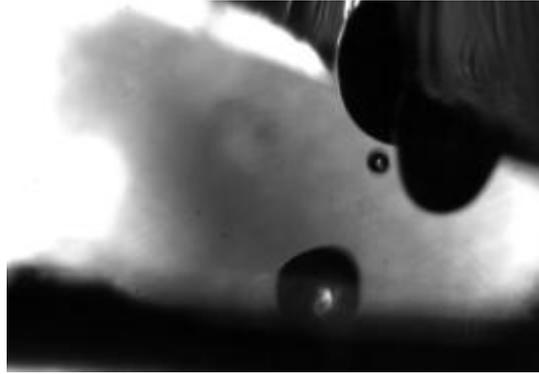


Ilustración 73: Arrastre en la entrada del separador para el caudal Q_2 de $4,5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m})$ ($VLE = 2,15 \text{ m/s}$).



Ilustración 74: Arrastre en la entrada del separador para el caudal Q_5 de $10,68 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m})$ ($VLE = 3 \text{ m/s}$).

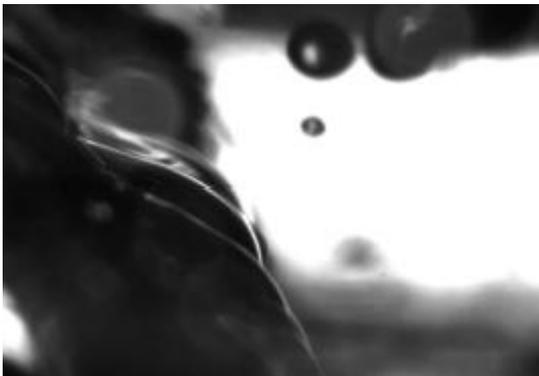


Ilustración 75: Arrastre en la zona intermedia del separador para el caudal Q_2 de $4,5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m})$ ($VLE = 9,9 \text{ m/s}$).

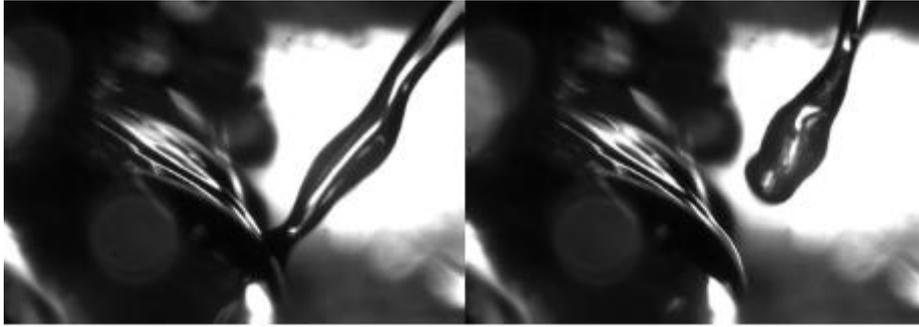


Ilustración 76: Arrastre en la zona intermedia del separador para el caudal Q5 de 10,68 L/(min·m) (VLE = 9,5 m/s).



Ilustración 77: Arrastre en la salida del separador para el caudal Q2 de 4,5 L/(min·m) (VLE = 11 m/s).



Ilustración 78: Arrastre en la salida del separador para el caudal Q5 de 10,68 L/(min·m) (VLE = 11,6 m/s).

6.2.2. *Ensayos con el generador de agua.*

6.2.2.1. *Introducción.*

El objetivo de estos ensayos es obtener imágenes y videos de cómo actúan gotas de agua generadas cuando impactan con la película de agua formada para los distintos caudales de agua y velocidades de viento estudiados.

6.2.2.2. *Resultados.*

En este caso, se realizaron diferentes ensayos en los que se utilizaron diferentes caudales de agua, obteniéndose diferentes velocidades y diámetros de las gotas que se generaron.

Para la medida de la velocidad se midieron el tiempo y la distancia media recorrida por las gotas, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 9: Velocidades obtenidas en los distintos ensayos.

Ensayo	Tiempo (s)	Distancia media (mm)	Velocidad (m/s)
50x20	0,000971683	1,18240514	1,216862791
60x20	0,00097168	1,5129132	1,557007657
70x20	0,00097168	1,62249328	1,669781492
80x20	0,00097168	2,60694732	2,682927836
90x20	0,00097168	2,7359689	2,815709802
100x20	0,00097168	3,57372684	3,67788453
110x20	0,00058301	2,66703982	4,5746039
130x20	0,00058301	2,80136347	4,80500072

Representado estos datos para ver cómo se comporta la velocidad en los distintos experimentos, obtenemos una ilustración como la que se muestra a continuación:

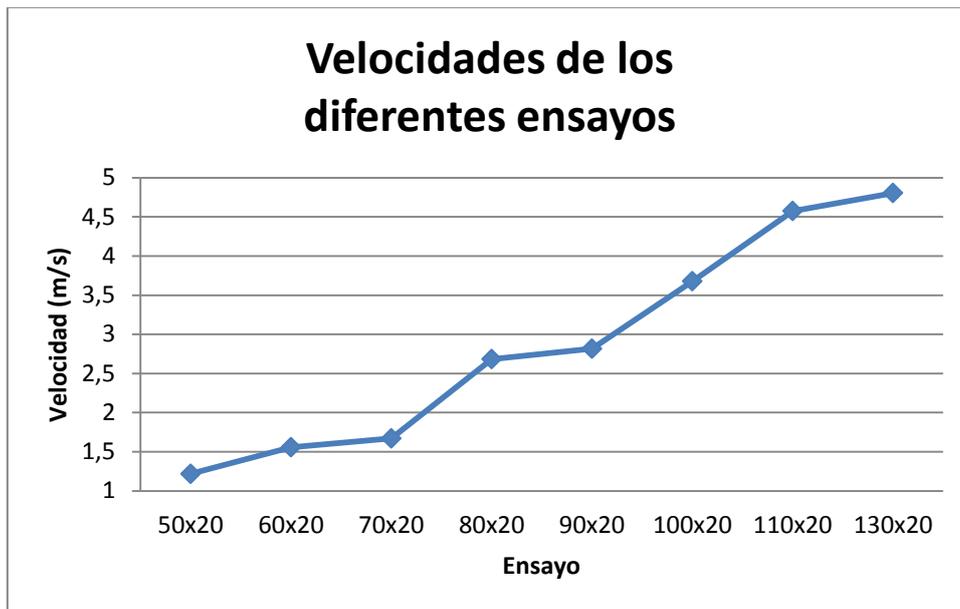


Ilustración 79: Velocidades de los diferentes ensayos.

Para el estudio del tamaño de gota, se midieron diferentes gotas en cada ensayo llegándose a ver que la diferencia entre los tamaños era mínima y, observándose que la estimación de la media de los diferentes tamaños era representativa de los ensayos realizados. En la siguiente tabla se muestran los tamaños de gotas obtenidos:

Tabla 10: Radio de las gotas de los diferentes ensayos.

Ensayo	Radio de las gotas (mm)	Radio de las gotas (μm)
50x20	0,1237195	123,7195000
60x20	0,15730056	157,3005600
70x20	0,1608354	160,8354000
80x20	0,15906798	159,0679800
90x20	0,14669602	146,6960200
100x20	0,1519983	151,9983000
110x20	0,14669602	146,6960200
130x20	0,13844803	138,4480300

Se realizó la representación de los ensayos para ver los tamaños de las gotas tal y como se muestra en la siguiente ilustración:

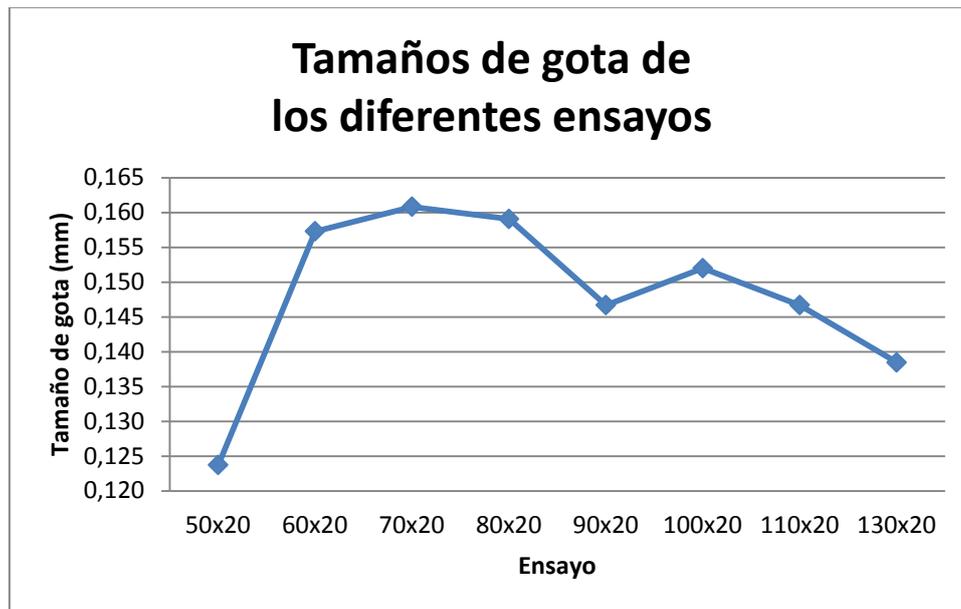


Ilustración 80: Tamaños de gota de los diferentes ensayos.

Tras esto, se exponen algunos resultados experimentales que se obtuvieron, utilizándose como valores de las distintas constantes:

$$\rho = 998 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\mu = 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\sigma = 0,0072 \text{ N}/\text{m}$$

A continuación se exponen los resultados obtenidos:

Estudio de la emisión de gotas generadas en separadores de gotas en torres de refrigeración

Tabla 11: Estudio de diferentes casos experimentales.

Caso	Q (ml/h)	Q (cm ³ /min)	f (kHz)	d ₀ (mm)	w ₀ (m/s)	D (mm)	Q* (l/min)	Re	Oh	K
1	133	2,22	20,1	152,02	4,70	100,00	0,22	713,65	0,03	111,60
2	110	1,83	20,1	142,69	3,89	100,00	0,22	669,88	0,03	106,43
3	100	1,67	20,1	138,23	3,54	100,00	0,22	648,93	0,03	103,92
4	90	1,50	20,1	133,46	3,18	100,00	0,22	626,54	0,03	101,22
5	80	1,33	20,1	128,32	2,83	100,00	0,22	602,42	0,03	98,28
6	70	1,17	20	122,94	2,48	100,00	0,22	577,15	0,03	95,18
7	60	1,00	20	116,78	2,12	100,00	0,22	548,24	0,03	91,58
8	50	0,83	20,1	109,72	1,77	100,00	0,22	515,06	0,04	87,39
9	40	0,67	20,1	101,85	1,41	100,00	0,22	478,14	0,04	82,65
10	50	0,83	5	174,45	1,77	100,00	0,22	818,96	0,03	123,74
11	63	1,05	20	118,70	2,23	100,00	0,22	557,23	0,03	92,70
12	64	1,07	20	119,32	2,26	100,00	0,22	560,16	0,03	93,07
13	65	1,08	20	119,94	2,30	100,00	0,22	563,07	0,03	93,43
14	75	1,25	20	125,80	2,65	100,00	0,22	590,58	0,03	96,83
15	70	1,17	5	195,16	2,48	100,00	0,22	916,17	0,03	134,60
16	65	1,08	5	190,40	2,30	100,00	0,22	893,81	0,03	132,13
17	60	1,00	5	185,38	2,12	100,00	0,22	870,28	0,03	129,51
18	55	0,92	5	180,08	1,95	100,00	0,22	845,40	0,03	126,72
19	50	0,83	5	174,45	1,77	100,00	0,22	818,96	0,03	123,74
20	45	0,75	5	168,43	1,59	100,00	0,22	790,70	0,03	120,52
21	45	0,75	20	106,11	1,59	100,00	0,22	498,11	0,04	85,22
22	90	1,5	20	133,68408	3,12	101,00	0	627,58056	0,0322648	101,34807
23	133	2,22	20	152,2706	4,52	102,00	0	714,83509	0,0302316	111,74234

Tras los resultados se exponen brevemente las conclusiones obtenidas de los ensayos expuestos anteriormente en la tabla 11:

Tabla 12: Observaciones a los resultados de los ensayos.

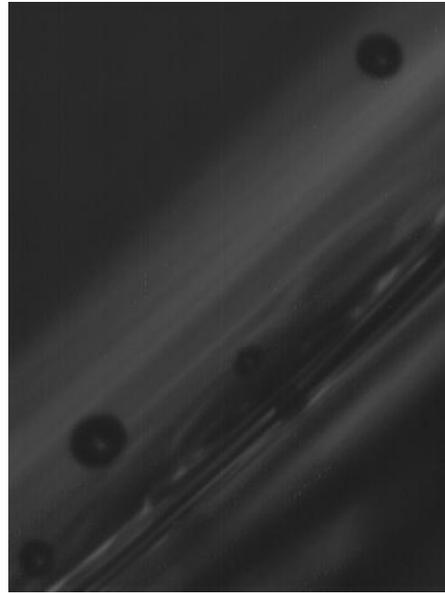
Caso	Observaciones
1	La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma
2	La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma
3	La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma
4	La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma
5	La gota se adhiere a la película. Ya no hay surco
6	Límite rebote
7	Rebote con pérdida de diámetro y deslizamiento
8	Rebote con pérdida de diámetro y deslizamiento
9	Ensayo no válido, inestable
10	Inestable, se corta el chorro
11	Poco rebote
12	Poco rebote
13	Rebota poco pero aún hay
14	La gota se adhiere a la película. Ya no hay surco
15	Parecido a 70-20. No se observan rebotes
16	Rebota visiblemente
17	Rebota visiblemente
18	Rebota visiblemente
19	Rebota visiblemente
20	Rebota visiblemente
21	Rebota visiblemente
22	No splash sobre seco
23	No splash sobre seco

6.2.3. *Imágenes.*

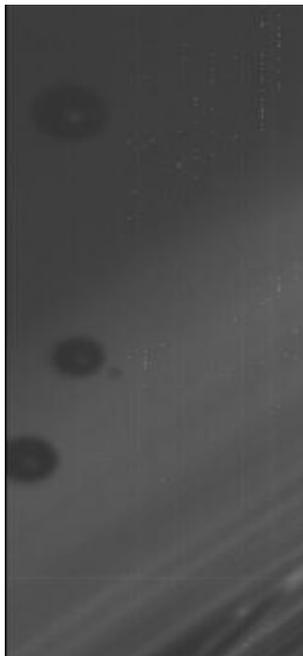
Sin película de agua:



Ensayo 50x20:



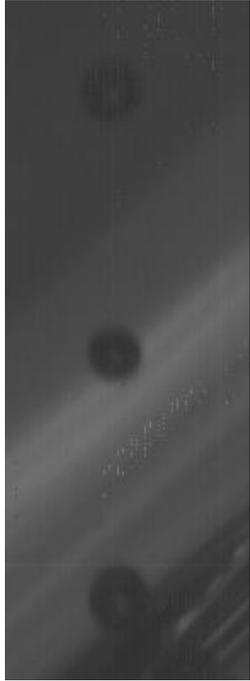
Ensayo 60x20:



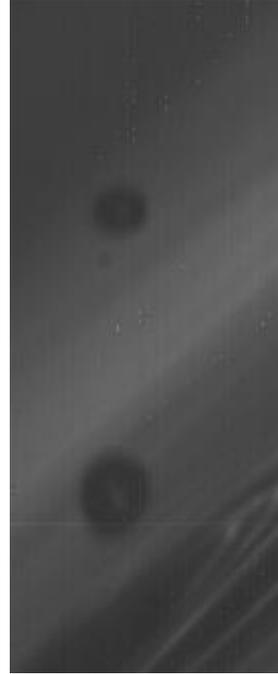
Ensayo 70x20:



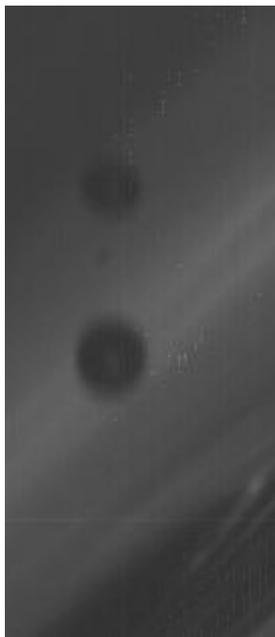
Ensayo 80x20:



Ensayo 90x20:



Ensayo 100x20:



Ensayo 110x20:



Ensayo 130x20:



Ilustración 81: Imágenes de los distintos experimentos realizados.

Capítulo 7.

Conclusiones.

7.1. Conclusiones del estudio del desprendimiento de gotas en el separador.

7.2. Conclusiones del estudio del generador de gotas.

7. Conclusiones.

7.1. Conclusiones del estudio del desprendimiento de gotas en el separador.

El objetivo de estos ensayos es obtener imágenes y videos de las películas de agua que se forman y de las gotas que se desprenden en nuestro sistema, para después estudiar su comportamiento y obtener mediante programas informáticos los espesores de película y los tamaños de las gotas desprendidas para los distintos caudales de agua y velocidades de viento estudiados. Además, otro objetivo es el de obtener para distintas posiciones, las velocidades límite a partir de las cuales comienzan a desprenderse gotas dependiendo del caudal de la película de agua.

En los resultados expuestos con anterioridad en el apartado 6.2.1. se han podido observar las velocidades límite para los distintos caudales que no podemos sobrepasar para evitar de este modo el desprendimiento de las gotas.

También cabe destacar que se realizaron los estudios en las diferentes secciones del separador de gotas, estudiándose las tres velocidades:

- VLE (Velocidad límite a la entrada del separador).
- VLS (Velocidad límite a la salida del separador).
- VLC (Velocidad límite en el codo de la placa).

Se pueden destacar como principales resultados que para los valores obtenidos para los caudales son:

- $Q1 = 0,12 \text{ L/min.}$
- $Q2 = 0,28 \text{ L/min.}$
- $Q3 = 0,67 \text{ L/min.}$
- $Q4 = 1,80 \text{ L/min.}$
- $Q5 = 2,92 \text{ L/min.}$

Pero como a longitud de la película es de 5 cm, hay dos casos en particular que se estudiaron:

- $Q2' = 0,28 \text{ L/min} = 4,5 \text{ L/min}\cdot\text{m}$
- $Q5' = 2,92 \text{ L/min} = 10,68 \text{ L/min}\cdot\text{m}$

En el cálculo de las velocidades límite, primero se toma el valor de las frecuencias del ventilador y posteriormente se miden las velocidades con el anemómetro de hilo caliente.

Por tanto, las velocidades límite de desprendimiento son:

Tabla 13: Rango de frecuencia del ventilador para las velocidades límite de desprendimiento.

	Caudal	Rango frecuencia ventilador (Hz)	Velocidades (m/s)
VLE	Q2'	10 – 12	1,58 – 2,15
	Q5'	14 – 15	2,71 – 3,02
VLC	Q2'	22 – 22,4	5,06 – 5,2
	Q5'	21 – 22	4,78 – 5,06
VLS	Q2'	22 – 23	5,06 – 5,34
	Q5'	21 – 22	4,78 – 5,06

Si medimos las velocidades a partir del momento en que empiezan a observarse el arrastre de las primeras gotas:

Tabla 14: Velocidades límite tomadas en la entrada al separador a partir de las cuales comienza a observarse arrastre de gotas para distintas posiciones y caudales.

	Q2'	Q5'
VLE	2,15 m/s	3 m/s
VLC	5,2 m/s	5 m/s
VLS	5,3 m/s	5 m/s

Se observa que las velocidades límite en la salida y zona intermedia del separador se producen prácticamente para una misma velocidad en la zona baja del separador (5, 5,2 y 5,3 m/s). Además, en estas zonas tiene muy poca influencia el caudal de la película. Podemos decir que tendremos una velocidad límite de trabajo en la zona baja del separador para placas con esta geometría de unos 5 m/s.

Representando los valores de velocidades de desprendimiento a la entrada y a la salida del separador, tenemos:

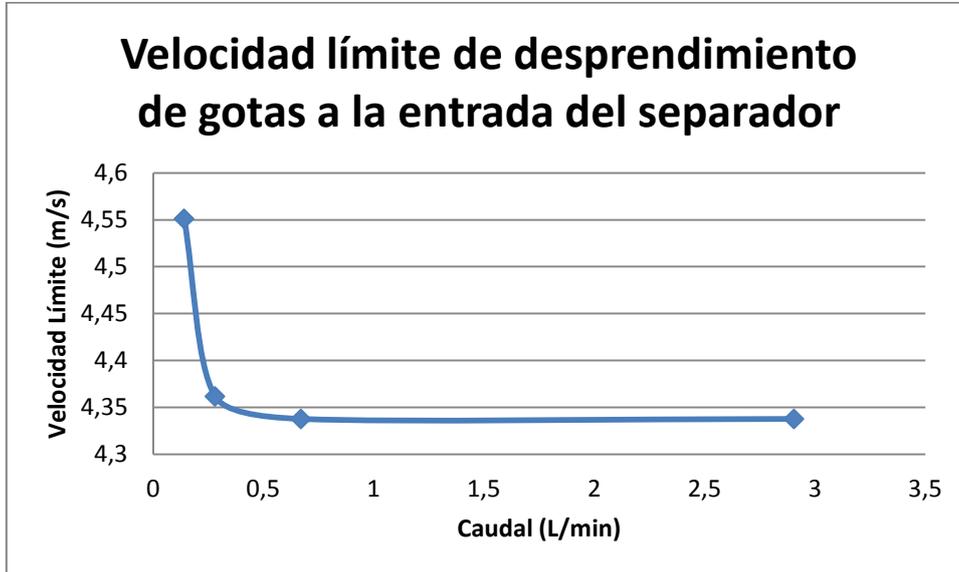


Ilustración 82: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la entrada del separador.

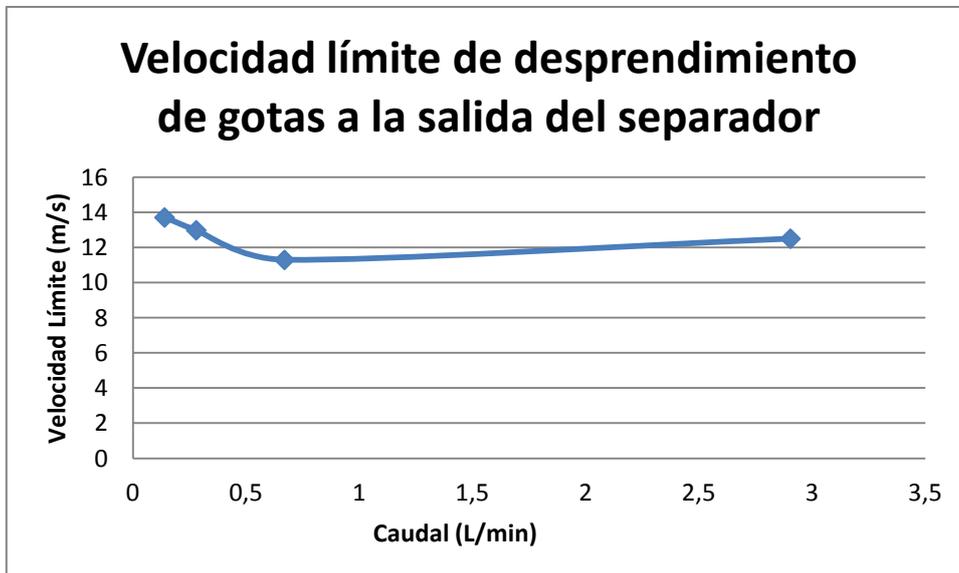


Ilustración 83: Velocidad límite de desprendimiento de gotas a la salida del separador.

7.2. Conclusiones del estudio del generador de gotas.

El objetivo de estos ensayos es obtener imágenes y videos de cómo actúan gotas de agua generadas cuando impactan con la película de agua formada para los distintos caudales de agua y velocidades de viento estudiados.

En los resultados expuestos con anterioridad en el apartado 6.2.2. se han podido observar las velocidades y tamaños de gotas para los diferentes caudales empleados en la realización de los ensayos.

Para la medición de la velocidad se midió el tiempo y la distancia media que recorrieron las gotas, obteniéndose:

Tabla 15: Velocidades de las gotas formadas en el generador.

Ensayo	Velocidad (m/s)
50x20	1,216862791
60x20	1,557007657
70x20	1,669781492
80x20	2,682927836
90x20	2,815709802
100x20	3,67788453
110x20	4,5746039
130x20	4,80500072

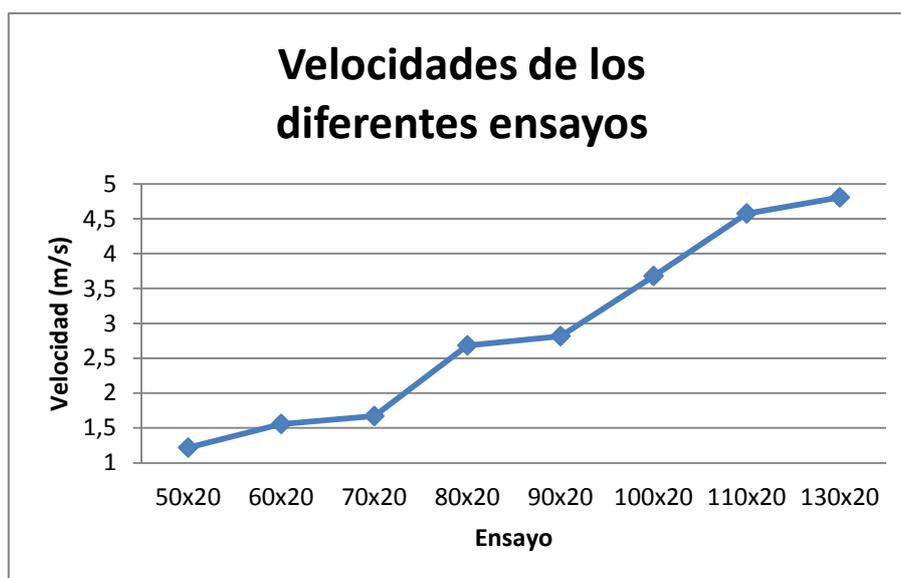


Ilustración 84: Velocidades de las gotas formadas en el generador.

Para el estudio del tamaño de gota, se midieron diferentes gotas en cada ensayo llegándose a ver que la diferencia entre los tamaños era mínima y, observándose que la estimación de la media de los diferentes tamaños era representativa de los ensayos realizados. En la siguiente tabla se muestran los tamaños de gotas obtenidos:

Tabla 16: Radio de las gotas formadas en el generador.

Ensayo	Radio de las gotas (mm)	Radio de las gotas (μm)
50x20	0,1237195	123,7195000
60x20	0,15730056	157,3005600
70x20	0,1608354	160,8354000
80x20	0,15906798	159,0679800
90x20	0,14669602	146,6960200
100x20	0,1519983	151,9983000
110x20	0,14669602	146,6960200
130x20	0,13844803	138,4480300

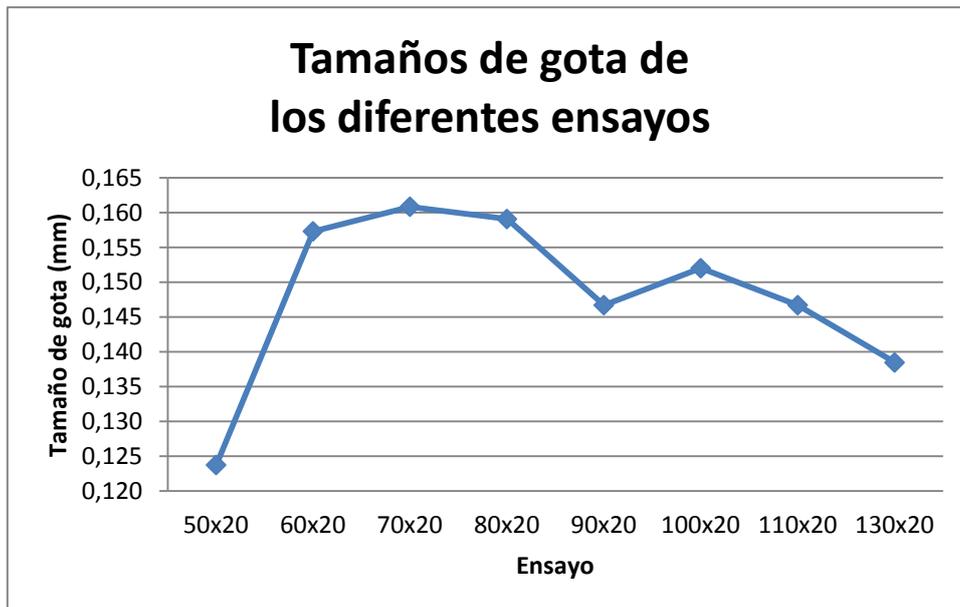


Ilustración 85: Tamaños de las gotas formadas en el generador.

Además, se realizó el estudio de diferentes casos experimentales que se resumen en la tabla 11 (expuesta en el apartado 6.2.2.2.). Como conclusiones a estos ensayos podemos destacar:

- Caso 1: La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma.
- Caso 2: La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma.
- Caso 3: La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma.
- Caso 4: La gota se adhiere a la película generando un surco al impactar con la misma.
- Caso 5: La gota se adhiere a la película. Ya no hay surco.
- Caso 6: Límite rebote.
- Caso 7: Rebote con pérdida de diámetro y deslizamiento.
- Caso 8: Rebote con pérdida de diámetro y deslizamiento.
- Caso 9: Ensayo no válido, inestable.
- Caso 10: Inestable, se corta el chorro.
- Caso 11: Poco rebote.
- Caso 12: Poco rebote.
- Caso 13: Rebota poco, pero aún hay rebote.
- Caso 14: La gota se adhiere a la película. Ya no hay surco.
- Caso 15: Parecido a 70-20. No se observan rebotes.
- Caso 16: Rebota visiblemente.
- Caso 17: Rebota visiblemente.
- Caso 18: Rebota visiblemente.
- Caso 19: Rebota visiblemente.
- Caso 20: Rebota visiblemente.
- Caso 21: Rebota visiblemente.
- Caso 22: No splash sobre seco.
- Caso 23: No splash sobre seco.

Capítulo 8.

Referencias.

8. Referencias.

Referencias utilizadas en el Trabajo Fin de Máster:

[1] Meroney, R. N. 2006. CFD prediction of cooling tower drift. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 94, pp. 463-490.

[2] Power Generation Technologies (PGT), An Introduction to Cooling Tower Drift, PGT-Power Generation Technologies Website at <http://www.pgt-online.com/services/driftbackground.shtml>, 2003, 1 p.

Aynsley, E. y Carson, J.E. (1973). Atmospheric effects of water cooling facilities. Cooling Tower Institute. (Technical Paper TP-107B).

Becker B., Burdik L., (1992). Effect of drift eliminator design on cooling tower performance. In: *Transactions of the ASME*. Vol. 114. pp. 632-632.

Brown C., Nuorti P., Breiman R., Hathcock A., Fields B., Lipman H., Llewellyn G., Hofmann J., Cetron M. (1999). A community outbreak of legionnaires' disease linked to hospital cooling towers: an epidemiological method to calculate dose of exposure. *Int J Epidemiol* 28 (2), 353-9.

Chan J, y Golay M.W., (1977), Comparative evaluation of cooling tower drift eliminator performance. Energy Laboratory Report MIT-El 77-004.

Cooper, A.J., Barnes, H.R. y Myers, E.R. (2004) Assessing risk of legionella. *Ashrae Journal* Vol, 46 n° 4. pp 22-27.

Foster P.M., Williams M.I., y Winter R.J., (1974). Droplet behavior and collection by counterflow cooling-tower eliminators. *Atmospheric environment*, Vol. 8 (4), pp 349-360.

Galletti C., Brunazzi E., Tognotti, L., (2008), A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels. *Chemical Engineering Science* 63 5639-5652.

Gardner B.R., y Lowe H.J., (1974). The research and development background to the environmental problems of natural draught cooling towers. *Atmospheric environment*, Vol. 8- 4, pp 313-320.

Hanna S.R., (1974), Fog and Drift Deposition from Evaporative Cooling Towers, *Nuclear Safety*, vol. 15, no. 2, March-April 1974 (also ATDL Contribution File No. 94), pp. 190-196.

Hernández P. (2003), Diseño y simulación de torres de enfriamiento por ordenador y su aplicación a centrales nucleares. Tesis Doctoral. Valencia.

Jain S., Kennedy J., Fordyce H., (1978). Modeling near-field behavior of mechanical draft cooling tower plumes. *Environmental Effects of Cooling Tower Plumes*, Symposium at University of Maryland 9, II13-II30.

James P.W., Wang Y., Azzopardi B.J., Hughes J.P., (2005), A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator. *Chemical Engineering Research and Design* 83 (A5), pp. 469–477.

Kennedy J., Fordyce H., (1974). Plume recirculation and interference in mechanical draft cooling towers. *Cooling Tower Environment-1974*, Symposium at University of Maryland 9.

Kloppers J., Kröger D. (2005). A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (3), 765-777.

Lewis, B.G. (1974). On the question of airborne transmission of pathogenic organisms in cooling tower drift. *Cooling Tower Institute*. (Technical Paper- T-124A).

Li J., Huang S., Wang X., (2007). Numerical study of steam-water separators with wave-type vanes. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 15 (4), 492-498.

Navarro, C. et al. (2001). Update on the outbreak of legionnaires' diseases in Murcia Spain. *Eurosurveillance Weekly*. 5(21).

Pedersen, G.C., Lamkin, V.K. y Seich, M., (1987), An economical solution to cooling tower drift. Cooling Tower Institute. (Technical Paper- T-87-08).

Petersen R., (2004). ISc3 and prime versus wind tunnel observations for a power plant with hyperbolic cooling towers. 13th Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology, Fifth Conference on Urban Environment Cited.

Policastro A.J., Dunn W.E., Berg M.L., Ziebarth J.P., (1978a). The chalk point dye tracer study Validation of models and analysis of field data. *Proceedings of Second Conference on Waste Heat Management and Utilization*, 686-719.

Policastro A.J., Dunn W.E., Berg M.L., Ziebarth J.P., (1978b). Comparison of ten drift deposition models to field data acquired in the chalk point dry tracer experiment, environmental effects of cooling tower plumes. *Symposium in University of Maryland*, 76-84.

Policastro A.J., Dunn W.E., Berg M.L., Ziebarth J.P., (1981), The chalk point dye tracer study: validation of models and analysis of field data. Lee, S. Sengupta (Eds.), *Proceedings of Second Conference on Waste Heat Management and Utilization*, Miami Beach, Florida, December 4-6 1978, pp. 686- 19.

Sumiyo, I., Miyamoto, H., Hori, H., Tanak, I. y Yoshida, S. (2001). Sampling and detection of legionella pneumophila aerosols generated from industrial cooling tower. *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 45, nº 6, pp. 421-42.

Wang Y., James P., (1999). Assessment of an Eddy-interaction model and its refinements using predictions of droplet deposition in a wave-plate demister. *Transactions of IChemE* 77,692-698.

