



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

Influencia de parámetros de diseño y operación de atomizadores Venturi-vórtice en la granulometría del aerosol producido

Autor

Javier Alconchel de Mingo

Directores

Juan Antonio García Rodríguez

Antonio Lozano Fantoba

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Grado Ingeniería Mecánica

2016



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Javier Alconchel de Mingo,

con nº de DNI 17771418-P en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Ingeniería Mecánica, (Título del Trabajo)
Influencia de parámetros de diseño y operación de atomizadores
Venturi-vórtice en la granulometría del aerosol producido.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 22 de Junio de 2016

Fdo:

Javier Alconchel

RESUMEN

En procesos industriales para la obtención de biodiesel se generan subproductos como la glicerina, con una densidad similar a la del agua (1260 kg/m^3) pero con una viscosidad unas mil veces superior. Un posible aprovechamiento de esta sustancia consistiría en su quemado en caldera para la generación de calor, por ejemplo para calefacción o el calentamiento de agua sanitaria. Para su combustión es necesaria la atomización previa, pero la elevada viscosidad dificulta notablemente este proceso. Por ello el departamento de Mecánica de fluidos, haciendo uso de las instalaciones del laboratorio de investigación en fluidodinámica y tecnologías de la combustión (LIFTEC), centro mixto CSIC- Universidad de Zaragoza, utiliza un dispositivo tipo Venturi-vórtice para su atomización, consiguiendo tamaños de partículas del orden de micras y explorando la posibilidad de su aprovechamiento energético.

Este proyecto fin de grado, constata la eliminación de los problemas encontrados previamente en la atomización de la glicerina, usando presiones moderadas (hasta 4 bares), con un dispositivo fácil de montar que proporciona una correcta succión y requiere un mínimo mantenimiento. Cabe destacar, la no utilización de partes móviles, lo cual implica la reducción de pérdidas debidas al rozamiento, existentes en otros dispositivos alternativos, así como desgastes y sustitución de piezas.

El objetivo de este trabajo es la caracterización de distintos tipos de diseños con cámaras cónicas (30° , 45° y 60°) operando con distintos caudales de aire (m^3/h) y líquido (l/h). Como elemento de caracterización se ha utilizado el tamaño medio de partículas atomizadas obtenidas en las distintas composiciones ángulo-flujos, obteniéndose una fracción significativa de gotas de pequeño tamaño. Para la obtención de las distribuciones de tamaño se ha utilizado un difractómetro, el cual basa su funcionamiento en la difracción de un haz en una nube de gotas y que conjuntamente con un software de análisis permite la medida de la distribución de tamaño de partículas. Para la visualización del aerosol, se ha utilizado una cámara HAMAMATSU ORCA-ER, con 4096 bits de resolución, junto con un objetivo Nikon con una lente de focal 50 mm y una apertura F/16 en combinación con un láser Quanta System modelo Pils de Nd:YAG sincronizado mediante un generador de pulsos.

El objetivo final de esta investigación es el diseño y parametrización de un atomizador Venturi-vórtice, capaz de generar los tamaños de partículas requeridos, de forma eficaz, rápida, fiable y evitando etapas previas a la atomización como es el calentamiento de la muestra o su mezcla con otros fluidos con el fin de disminuir su viscosidad.

MEMORIA

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
	1.1 Antecedentes.....	1
	1.2 Objetivos.....	1
	1.3 La atomización.....	1
2	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	3
	2.1 Circuito fluido a nebulizar.....	4
	2.2 Circuito de aire.....	6
	2.3 Difractómetro.....	7
	2.4 Dispositivo atomizador.....	9
3	ENSAYOS.....	11
	3.1 Medición de succión.....	11
	3.2 Ensayos con agua.....	14
	3.3 Ensayos con glicerina.....	23
4	TOMA DE IMÁGENES.....	30
5	OPTIMIZACIÓN DEL DISPOSITIVO ATOMIZADOR.....	35
6	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	38
7	REFERENCIAS.....	40
8	ANEXOS.....	42

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

El departamento de Mecánica de Fluidos comienza el estudio de este tipo de atomizadores en respuesta a la petición de una empresa dedicada a equipos y sistemas de lubricación. Se requería la generación de una niebla de aceite para el transporte neumático. En ese momento se verificó que los estudios relativos a la atomización con estos dispositivos eran escasos, por ello se decidió continuar la investigación, en este caso, introduciendo agua y glicerina como fluidos a procesar. Para ello se realizaron unos prototipos en metacrilato que se ensayaron para obtener distribuciones de diámetros de partículas para las distintas configuraciones. Este proyecto es, por tanto, la continuación de dicho estudio, en el que se ha dado un paso adelante, introduciendo, para la fabricación de los atomizadores, materiales más resistentes, mejoras en el diseño así como una mejora en la caracterización del aerosol. Es de interés especial, conocer el comportamiento del aerosol con glicerina pura, debido a que existen pocos artículos científicos al respecto. Además, en las escasas referencias, la glicerina es calentada previamente o mezclada con agua para disminuir su viscosidad.

1.2 Objetivos.

Este proyecto fin de grado tiene como objetivo la caracterización de los distintos aerosoles generados por un atomizador Venturi-vórtice para agua y glicerina. Para ello, se han realizado tanto barridos verticales desde el orificio de salida del atomizador como a distintas alturas en dirección horizontal para comprobar la simetría del cono generado por el aerosol. Para ello se ha utilizado un difractómetro, ubicado en las instalaciones del LIFTEC, el cual nos permite obtener distribuciones de tamaño de gotas. Tras la puesta a punto de la instalación, se procedió a la realización de las pruebas, comprobando periódicamente la alineación del láser usado en el difractómetro, para evitar errores en las medidas. Trabajos anteriores realizados por el grupo de investigación, utilizaban la succión generada por el dispositivo para introducir el fluido a nebulizar en el atomizador. Los caudales con los que se trabajaba bajo esas circunstancias eran minúsculos con los requeridos en la aplicación industrial, que es el objetivo final que persigue el grupo, por lo que en las pruebas realizadas a lo largo de este proyecto se ha introducido el fluido a presión, pudiendo así trabajar con caudales mucho mayores.

1.3 La atomización.

La palabra atomizar hace referencia a la transformación de una masa de líquido, generalmente en forma de lámina o chorro, en gotas de pequeño tamaño. Existen muchas formas de atomizar un líquido. En este caso se utiliza un atomizador asistido por gas, en el que un chorro gaseoso interacciona con el líquido a atomizar y lo rompe en pequeñas gotas. Este gas consigue vencer las fuerzas cohesivas del líquido gracias a una elevada velocidad relativa entre los dos flujos.

El uso de atomizadores hoy en día está muy extendido ya que se puede encontrar en la agricultura ya sea para regadío o para sulfatar, humidificando espacios como zonas

de almacenamiento, zonas lúdicas como terrazas, refrigeración, medicina, procesos de combustión, pintura, procesos industriales, procesos de secado, transporte neumático, etc.

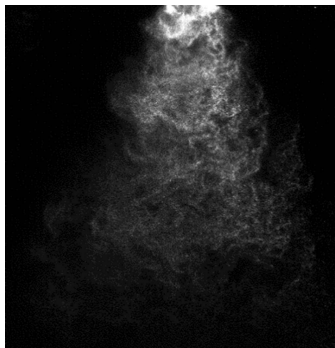


Imagen 1: aerosol generado

El estudio realizado en este proyecto usará agua y glicerina para caracterizar el comportamiento de un dispositivo Venturi-vórtice en función del ángulo utilizado en el atomizador y el diámetro del orificio de salida. En un atomizador de tipo Venturi-vórtice el líquido interacciona con una corriente de aire, que provocará la ruptura del fluido.

El sistema atomizador de tipo Venturi-vórtice presenta como principales ventajas, en comparación con la mayor parte de los atomizadores asistidos por gas, que no precisa de estrechos conductos por lo que evita posibles problemas de obturaciones y, sobre todo, la posibilidad de atomizar líquidos viscosos con gran eficiencia. Se obtienen gotas pequeñas, hay una fracción significativa por debajo de $5\mu\text{m}$ (transporte neumático) y $50\mu\text{m}$ (combustión) sin la necesidad de presiones muy elevadas.

La tecnología de la nebulización abarca diferentes métodos para producir la niebla dependiendo en la energía utilizada para vencer la tensión superficial del líquido. El uso de esta energía se empleara para fragmentar el líquido neutralizando la tensión superficial que lo mantiene unido, formando una mezcla homogénea de gotas del líquido en el gas.

Se presenta una tabla con una clasificación de los nebulizadores más usados en función de la fuente de energía de la que se alimentan los mismos.

TIPO	PRINCIPIO
De presión	El flujo de líquido se hace pasar por un orificio a alta velocidad.
Asistidos por gas	El chorro de líquido interacciona con un flujo de gas que ayuda a su desintegración en gotas.
Efervescentes	Se introduce gas en el seno del líquido y se aprovecha la expansión del gas al salir la mezcla por un orificio, para disgregar el líquido.
Ultrasónico	Una onda ultrasónica rompe la masa líquida en la superficie libre.
Electrostático	Se usan fuerzas electrostáticas para producir la ruptura.

Tabla 1: Resumen de los principales tipos de atomización.

2. Instalación experimental.

La imagen a continuación muestra la disposición de la instalación utilizada para la caracterización de las distintas configuraciones así como la toma de imágenes. Posteriormente se hará una descripción de los elementos más relevantes.

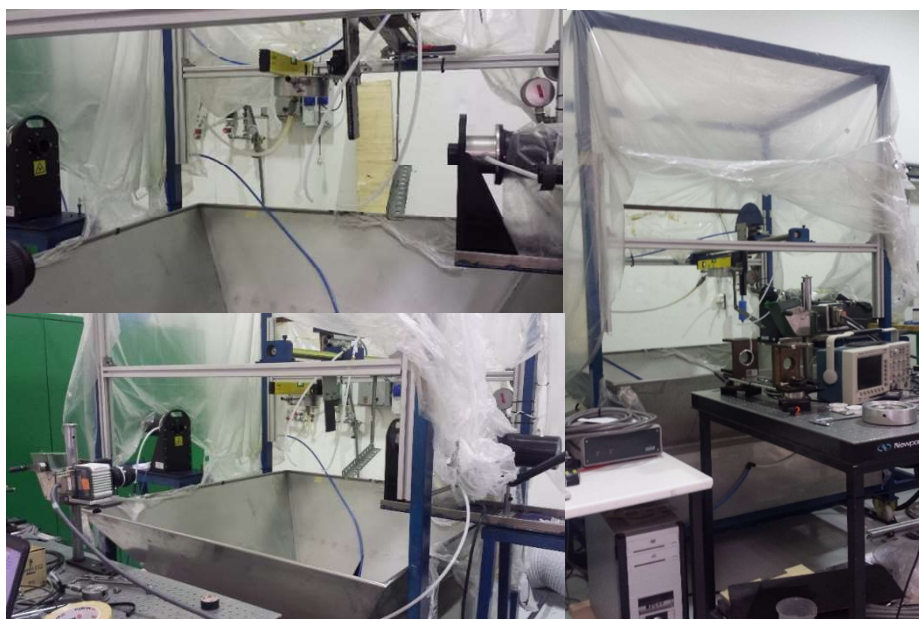


Imagen 2: Instalaciones LIFTEC

Los elementos que componen dicha instalación son:

- »1: Circuito del líquido a nebulizar
- »2: Circuito de aire
- »3: Difractómetro
- »4: Atomizador

2.1. Circuito de fluido a nebulizar

Los fluidos utilizados en los experimentos han sido agua y glicerina. El agua se obtenía directamente de la red a una presión relativamente constante de 3 bares y el caudal era controlado mediante un rotámetro. Cuando se trabajaba con glicerina, en las instalaciones del CSIC se instaló un sistema de baipás y el caudal se controlaba mediante un manómetro, relacionando presiones y caudales. A continuación se muestran los sistemas auxiliares utilizados para el abastecimiento de ambos fluidos.

Para el caso de agua, en las instalaciones del LIFTEC, existe la posibilidad de utilizar 2 rotámetros, diferenciados por los rangos de trabajo. Para este proyecto se ha utilizado uno cuyo límite es 60 l/h. Anteriormente al inicio de las pruebas, se realizó la calibración del rotámetro.

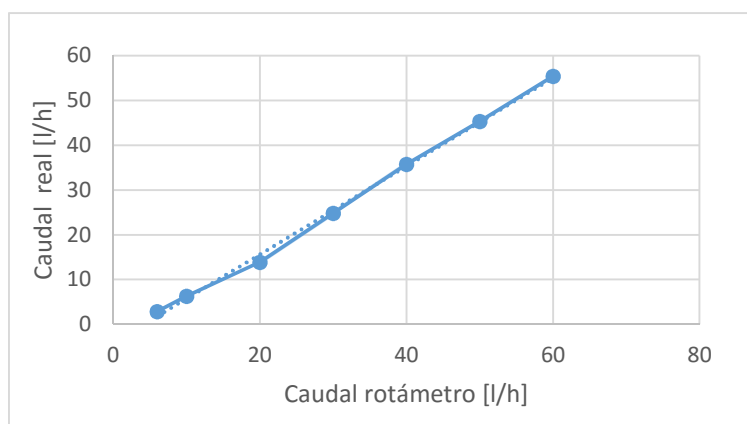


Gráfico 1: Calibración rotámetro agua

A continuación se muestran unas imágenes de los componentes del sistema de alimentación de agua y un esquema básico del mismo.



Imagen 3: Manómetro circuito agua y detalle de rotámetros utilizados en el circuito de agua.

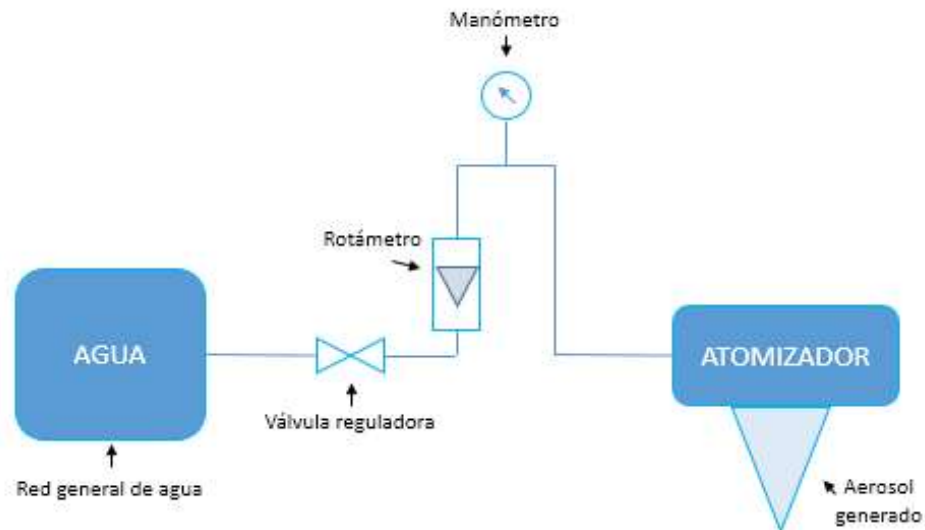


Imagen 4.: Sistema de suministro de agua

En el caso de la glicerina, es suministrada en garrafas de 25 litros y con ayuda de una bomba de engranajes rectos es impulsada, regulando el caudal mediante un sistema con baipás, el cual permite que una parte del flujo recircule de nuevo a la garrafa y otra parte pase al atomizador. A la salida del baipás, en la línea que alimenta el dispositivo atomizador se instaló un manómetro, capaz de medir hasta 25 bares y con el que es controlado el caudal de glicerina. La gráfica mostrada a continuación refleja la relación existente entre la presión en el manómetro y el caudal de glicerina con el que se abastece el atomizador. Dada una presión de trabajo, se ha considerado la densidad y viscosidad constante, puesto que la instalación siempre ha estado ubicada en las mismas instalaciones y la temperatura ha sido aproximadamente constante.

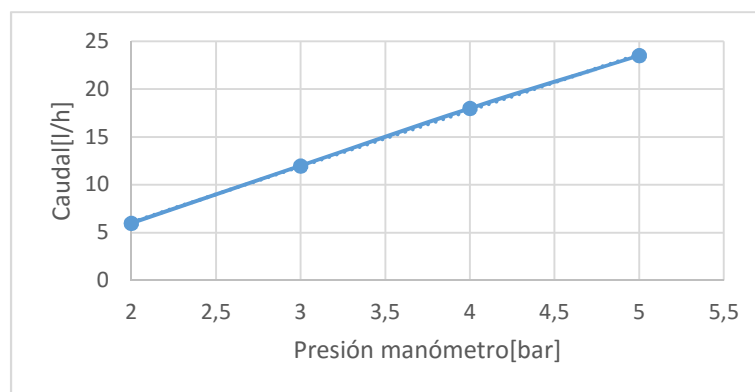


Gráfico 2: Presión-caudal glicerina

Esta grafica nos permite establecer que el régimen en el que estamos trabajando es laminar. Bajo este régimen, la pendiente de la recta es 1. A continuación, se va a calcular el número de Reynolds con el máximo caudal que trabajamos y en la zona de menor sección debido a bajo esas condiciones el número de Reynolds es más elevado.

$$Re = \frac{4 * Q[m^3/s] * \rho[Kg/m^3]}{\pi * \mu[Pa * s] * D[m]} = \frac{4 * 0,024 * 1260}{\pi * 1,49 * 0,006 * 3600} = 1.19$$

El valor obtenido nos permite corroborar la tendencia mostrada por la gráfica, se está trabajando en régimen laminar.



Imagen 5: Elementos constituyentes del circuito de glicerina. Garrafa de glicerina (izq.), regulador by-pass (centro), manómetro de hasta 25 bares (drcha.)

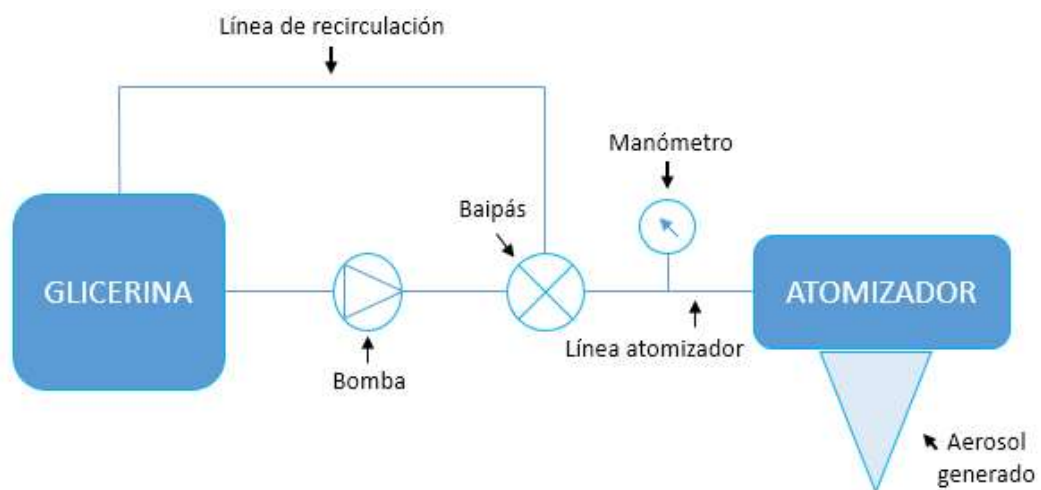


Imagen 6: Sistema de suministro de glicerina

2.2. Circuito de aire.

Para la nebulización del fluido de trabajo es necesaria la interacción con aire, el cual es inyectado tangencialmente al atomizador formando un vórtice cuya velocidad va aumentando debido a la disminución de sección del conducto cónico por el que circula. Por el teorema de Bernoulli, al aumentar la velocidad del vórtice se genera una depresión, originando una interacción entre ambos fluidos que provoca inestabilidades en el líquido las cuales se amplifican y producen la rotura en pequeñas gotas.

Para la alimentación de la instalación se utilizó una línea de aire disponible en las instalaciones del LIFTEC con una presión manométrica máxima de 5 bar. Esta presión se generaba mediante un compresor y a la entrada de la línea podía ser controlada

mediante un regulador. El caudal de aire se controla mediante un rotámetro, el cual fue calibrado previamente a la realización de las mediciones.



Imagen 7: Detalle entrada tangencial, compresor y rotámetro de aire utilizado por el sistema auxiliar de aire

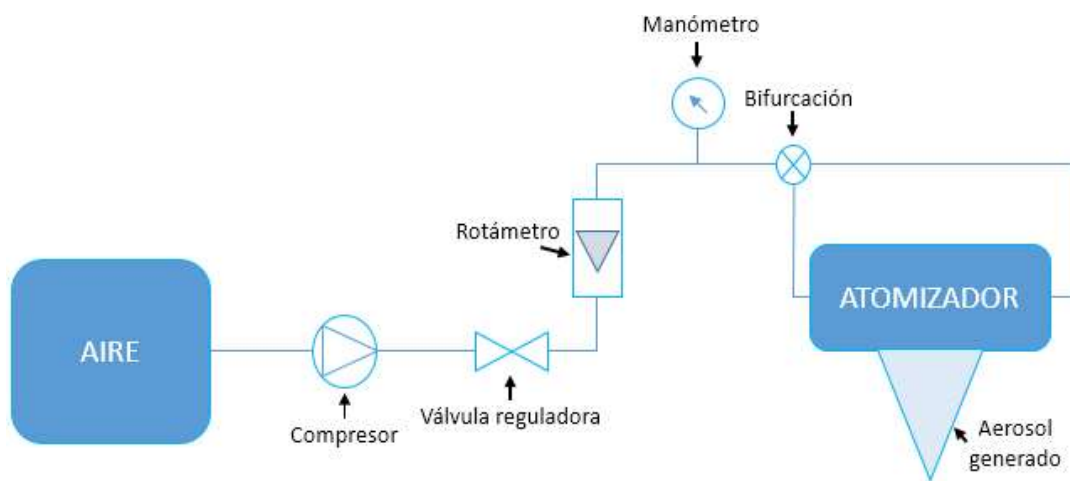


Imagen 8: Sistema auxiliar aire

2.3. Difractómetro

Para medir la distribución del tamaño de gotas se ha utilizado un difractómetro láser, en concreto el modelo Spraytec de Malvern Instruments. Esta técnica, empleada para la medida del tamaño de las gotas y su distribución estadística, se basa en la difracción de un haz de luz láser por la nube de gotas.

El dispositivo de medida está formado por una unidad emisora, en este caso un láser de diodo de 5 mW, con una longitud de onda de 670 nm y 10 mm de diámetro de haz colimado, y una unidad de recepción. Esta unidad, enfrentada al haz láser, está compuesta por una serie de detectores en anillo que recogen la luz difractada por las gotas o partículas iluminadas por el haz láser mediante una lente de focal adecuada sin formar previamente una imagen de la partícula a medir sobre el detector. A continuación se muestra un esquema del sistema de medida.

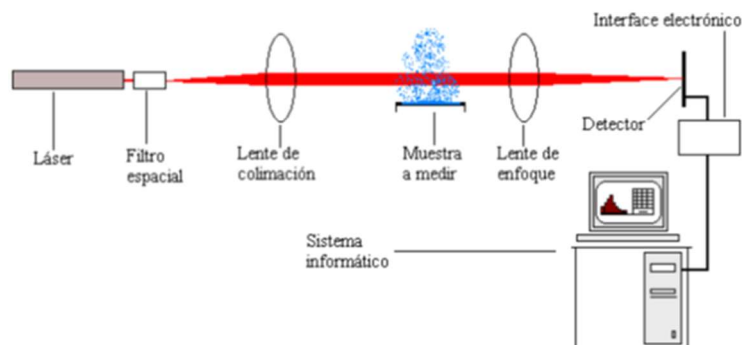


Imagen 9: Esquema difractómetro.

Es importante señalar que para que las medidas obtenidas sean correctas, el haz del láser debe estar exactamente enfrente a los detectores. La alineación de ambos elementos se realiza manualmente mediante unas etapas de desplazamiento micrométrico en dos ejes perpendiculares, que ajustan la posición de los detectores respecto del haz.

El software utilizado para la adquisición de datos que trabaja conjuntamente con el difractómetro genera datos en la forma mostrada en la imagen 10 y está formado principalmente por:

-*El eje de abscisas:* representa el tamaño de gota en micras en escala logarítmica, y su rango varía entre 1 y 1000.

-*El eje vertical derecho:* indica el porcentaje de volumen de fluido, normalizado a cien, incluido en gotas de un tamaño determinado.

-*El eje vertical izquierdo:* representa la distribución acumulativa, es decir, el porcentaje en volumen total de la muestra, normalizado a cien, incluido en gotas con un diámetro inferior al indicado por el valor del eje X.

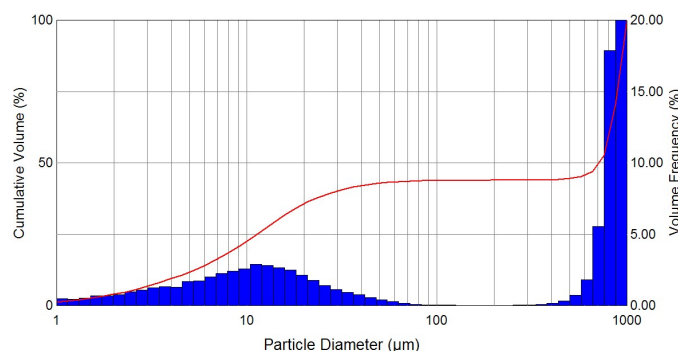


Imagen 10: Captura de imagen histograma generado por el software.

El software empleado, permite la conversión de los datos mostrados en el histograma a un documento de texto, permitiendo así un procesamiento sencillo y rápido. Para este trabajo, se ha elegido el diámetro de Sauter como diámetro medio para caracterizar los distintos aerosoles.

2.5. Dispositivo atomizador

El atomizador es la parte más importante de toda la instalación y nuestro objeto de estudio. Es en él donde aire y líquido interactúan y se genera el aerosol. Está compuesto de varias piezas, permitiendo el uso de distintas variantes, obteniendo así las distintas configuraciones. La denominación Venturi-vórtice se debe a que la corriente de aire entra al atomizador por la tapa superior de forma tangencial a través de dos orificios tras los que el gas desciende por una cavidad cónica, formándose un vórtice de aire. El efecto Venturi consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor. Esto ocurre en el cono. El aumento de la componente tangencial de la velocidad en el vórtice de aire genera además una depresión en el eje. Esta disminución de la presión puede dar lugar a una recirculación cuya magnitud dependerá de la velocidad tangencial, siendo ésta mayor cuanto mayor sea el caudal de aire utilizado para una geometría fija. La depresión hace que parte de las gotas de menor tamaño sean desplazadas hacia el centro del cono generado por el aerosol e incluso en algunos casos, introducidas en una burbuja de recirculación. Éstas serán las de menor tamaño, debido a la mayor facilidad para cambiar la dirección de su velocidad.



Imagen 11: Detalle entrada tangencial del aire y entrada líquido en el dispositivo atomizador.

En trabajos anteriores se abordó la influencia de otros parámetros de diseño como la sección de entrada del fluido al dispositivo o la influencia de la viscosidad en el aerosol generado, por lo que para este proyecto se pensó que distintos ángulos de cono podrían generar variaciones en el aerosol. Los cambios originados al introducir estas modificaciones se traducirían en un ángulo de salida distinto del fluido nebulizado, variaciones en las velocidades del vórtice desarrollado en el interior de la cámara cónica así como alteraciones en la vena contracta del aire a la salida del cono, afectando directamente a la interacción aire-líquido. En el presente proyecto, se decidió escoger conos de 30°, 45°, 60° para tratar de cubrir un mayor rango de ángulos posibles, descartando aquellos más cercanos a los casos extremos (0° y 90°). Las distintas configuraciones se ensayaron en combinación con distintos flujos de aire y fluido. A continuación se detallan las distintas partes de las que se compone el dispositivo atomizador.

»1: Tapa superior. Presenta 6 agujeros roscados de $\varnothing 6.5\text{mm}$ para su ajuste al cono y 2 agujeros por los que el aire es introducido tangencialmente creando el vórtice.

»2: Base. Presenta 6 agujeros pasantes y un orificio central. El correcto diámetro de salida fue elegido teniendo en cuenta cual generaba mayores succiones. Una vez fijado este diámetro las distintas configuraciones se podían obtener intercambiando los distintos tipos de cono.

»3: Junta plana. Material Nitrilo

»4: Junta teórica. Material Nitrilo

»5: Cuerpo del atomizador. Fabricado en aluminio.

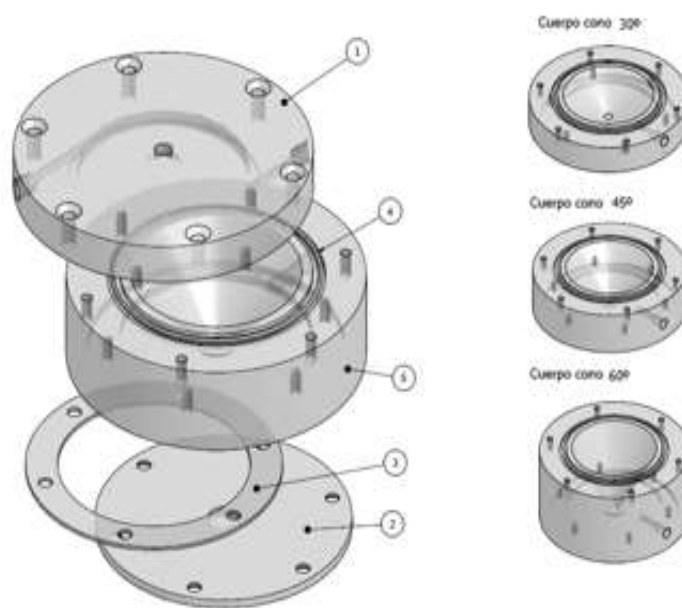


Imagen 12: Despiece componentes del atomizador. Presentación de los 3 conos que van a ser utilizados.

ESQUEMA GENERAL DE LA INSTALACIÓN

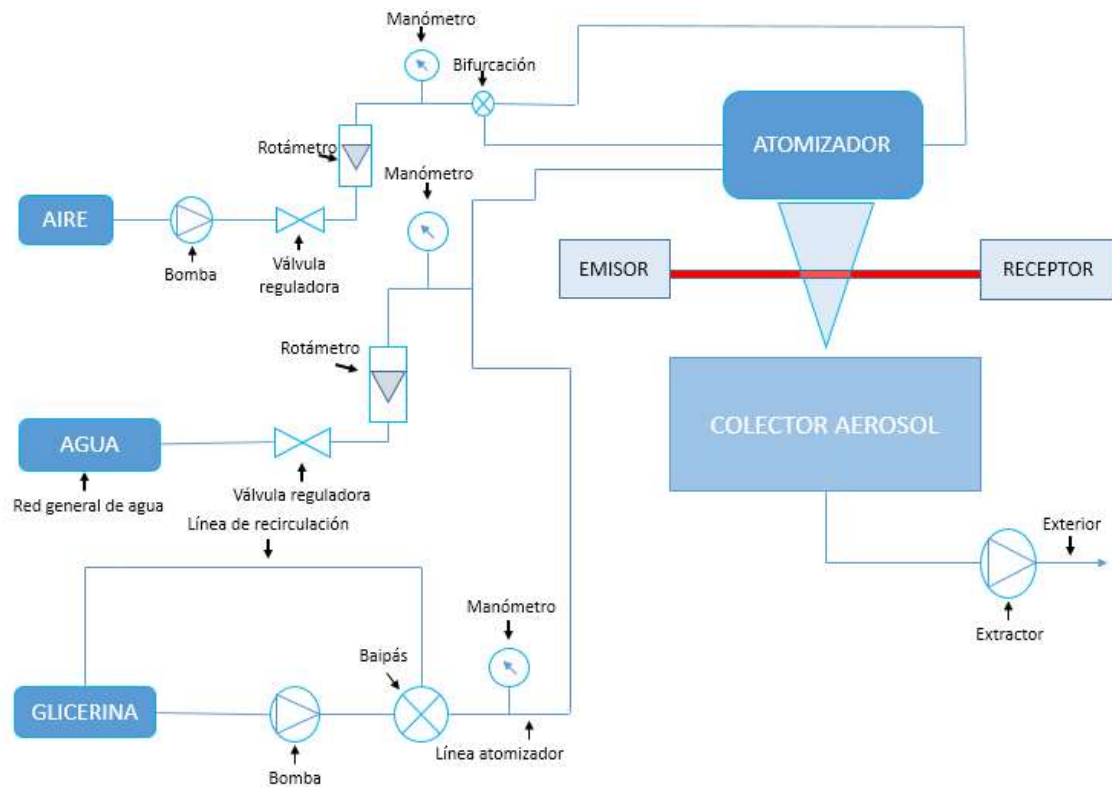


Imagen 14: Disposición general de la instalación.

ENSAYOS

Con el fin de limitar el número de variables que condicionaban nuestro dispositivo atomizador, se decidió fijar una placa inferior, la cual fuera común al resto de las configuraciones, dependiendo así solo del ángulo del cono. Para la determinación de la placa se realizó un estudio de las depresiones generadas por el flujo de aire. Para ello se varió su caudal y midió la depresión mediante un vacuómetro digital acoplado a la entrada del líquido, que no se hizo circular durante las pruebas.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho} + Z_2$$

Tal y como se muestra en la ecuación de Bernoulli y despreciando los cambios de cota, las variaciones en la presión están ligadas directamente con la velocidad a la salida de la cámara cónica, por tanto es de especial interés para este proyecto saber bajo que configuración cono-placa la succión es mayor y por lo tanto la velocidad también lo será



Imagen 15: vacuómetro digital

Para cada una de las configuraciones (cono de 30°, 45° y 60°) se probaron las distintas tapas siendo los resultados obtenidos los que se muestran en las siguientes graficas:

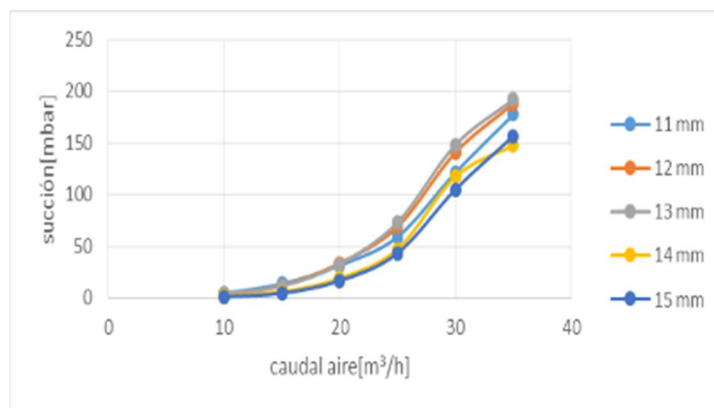


Gráfico 4: succión en milibares para los distintos caudales. Cono 30°

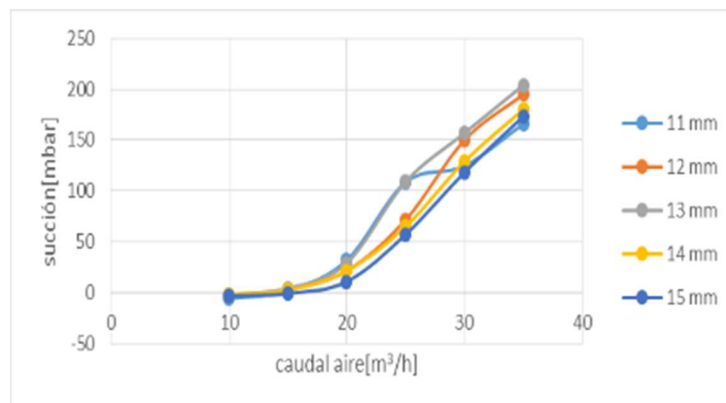


Gráfico 5: succión en milibares para los distintos caudales. Cono 45°

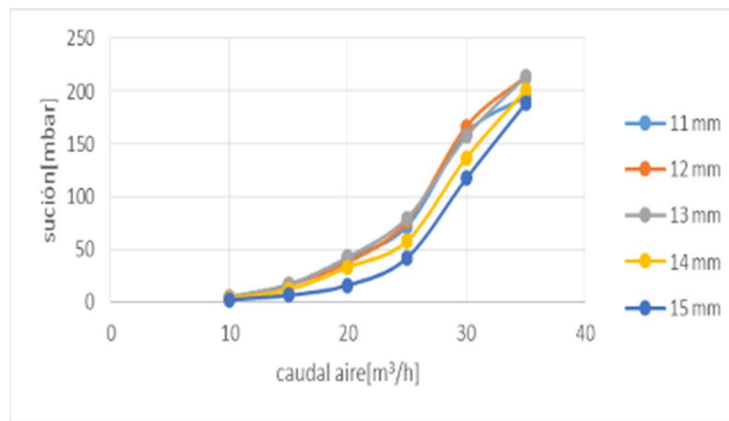


Gráfico 6: succión en milibares para los distintos caudales. Cono 60°

Se tomó como referencia para comprobar la placa más adecuada un caudal de 30 m³/h. Comparando los distintos valores se observa que la placa de 13 mm presenta un comportamiento similar en los tres conos utilizados así como unos valores de succión prácticamente máximos en cada una de las configuraciones. Es por ello que ha sido la placa elegida como referencia para todos los experimentos posteriores.

Una vez establecida la placa que mejor succión presenta en los tres conos (30°, 45° y 60°) se comenzaron a realizar pruebas con distintos caudales tanto de fluido a atomizar como de aire. Primeramente, y como fluido de referencia, en los experimentos se usó agua.

El primer experimento se centró en la medida axial de la distribución de tamaño de gotas desde la salida del orificio hasta una distancia aproximada de 25 cm, tomando muestras cada 2 cm. La segunda de las pruebas se basa en la realización de barridos horizontales a 10 cm de la salida del orificio, permitiendo de esta forma conocer la forma del cono generado por el atomizador así como la existencia o no de axisimetría. De esta forma es posible conocer la evolución del tamaño de las partículas del aerosol tanto verticalmente como horizontalmente. Pueden aparecer fenómenos como la coalescencia, es decir, que 2 o más partículas se unan formando una única gota o la ruptura secundaria por impacto de dos gotas, dependiendo de la velocidad relativa con la que chocan.

Ello podría explicar la aparición de tamaños de gota superiores a los esperados y que serán mostrados posteriormente en histogramas de distribución de tamaños. Otra de las posibles causas se debe a que parte del fluido que sale del orificio, debido a la fuerzas de adhesión la placa, no es atomizado sino que permanece unido a la placa y posteriormente por acción de la gravedad se precipita sobre el aerosol generando la aparición de tamaños de gota grandes. Se prevé que trabajos posteriores a este proyecto aborden este problema, modificando la geometría del orificio de salida y consiguiendo eliminar las gotas en la placa. En este proyecto se ha probado el uso de una película hidrófoba sin obtener una mejora significativa.

Ambas pruebas se realizaron con ayuda del difractómetro y un software explícito para ello y que muestra las distribuciones de tamaños de gotas. Tanto para las medidas

de agua como glicerina el equipo empleado es el mismo, siendo utilizados distintos archivos de calibración, los cuales contienen distintas matrices, dependiendo del índice de refracción del líquido.

Independientemente del aerosol a generar y el cono utilizado, previamente a la toma de datos se ha seguido una metodología de trabajo que puede ser resumida en los siguientes puntos:

1: Encendido de los equipos.

2: Comprobación de la alineación del difractómetro. Ajuste si es necesario. Limpieza de las lentes si es necesario

3: Establecer un caudal de fluido a atomizar así como de aire.

4: Toma de datos.

5: Variación del caudal de agua y aire así como modificación de la posición del atomizador tanto vertical como horizontalmente para estudiar el comportamiento del aerosol en distintas posiciones, realizando barridos axiales y radiales.

6: Nueva comprobación de los equipos. En caso de desalineación, repetición de ensayos.

7: Recogida de datos y análisis.

Uno de problemas más habituales es el ensuciamiento de las lentes tanto del receptor como emisor del difractómetro y en mayor medida en las pruebas realizadas con glicerina. Para resolver esta situación o reducirla, el equipo cuenta con un sistema de soplado de aire que se abastece del mismo compresor que el dispositivo atomizador, siendo regulable la cantidad de aire con un manómetro. A pesar de estos procedimientos, el ensuciamiento de la lente es muy habitual, teniendo que repetir las medidas de nuevo.

ENSAYOS CON AGUA.

Este dispositivo ha sido diseñado para atomizar fluidos de alta viscosidad. Sin embargo, para realizar una primera caracterización, por simplicidad y para comparaciones posteriores, se ha trabajado inicialmente con agua. Se ha comenzado con una configuración de la instalación fija, en este caso, el cono de 45° junto con la placa de 13 mm, la cual en las pruebas realizadas generaba una mayor succión y por tanto una mejor interacción fluido-aire. Se han realizado pruebas para caracterizar el aerosol generado tanto en la dirección del eje, como horizontalmente. Se ha medido a una distancia de 10 cm así como a 4, 8, 12 cm de la boquilla combinando distintos caudales de agua y aire. Tras el análisis de los resultados se han ido introduciendo variaciones en la instalación (distinto cono) y se han utilizado los caudales de aire y líquido que mejores distribuciones generaba en los primeros experimentos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos realizando barridos de caudal a 4, 8 y 12 cm de la salida del atomizador en dirección axial. Se han combinado distintos caudales de agua entre 10 l/h hasta 60 l/h junto con 10, 20 y 30 m³/h de aire. Con ello se pretende determinar el comportamiento del aerosol en distintas posiciones, permitiendo así conocer, para las distintas combinaciones posibles, la evolución del tamaño de gota en distintas posiciones.

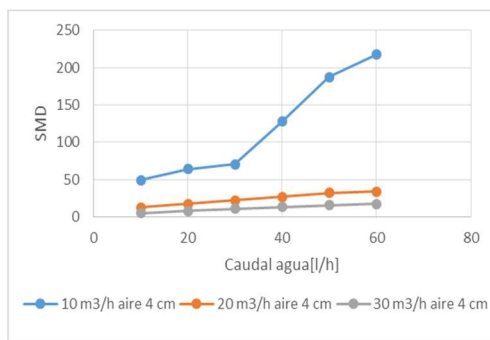


Gráfico 7: evolución SMD-caudal. 4cm

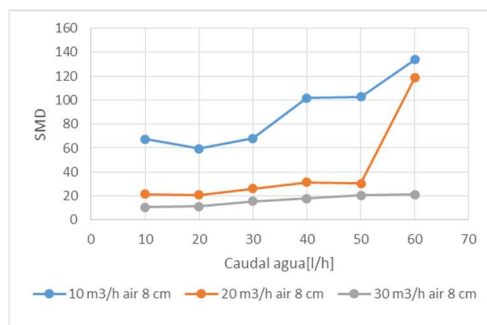


Gráfico 8: evolución SMD-caudal. 8cm

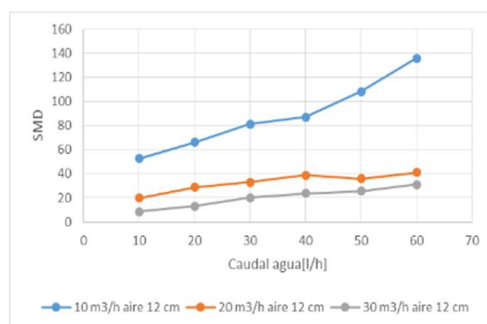


Gráfico 9: evolución SMD-caudal. 12cm

Los datos muestran la tendencia esperada previa a la realización de las pruebas, mayores caudales de aire para un caudal de líquido fijo, generan gotas de menor tamaño y para caudales de aire fijos, menores caudales de líquido generan tamaños menores.



A continuación se muestra el SMD de la distribución del tamaño de partícula a 4, 8 y 12 cm con distintos caudales de agua y 30 m³/h de aire.

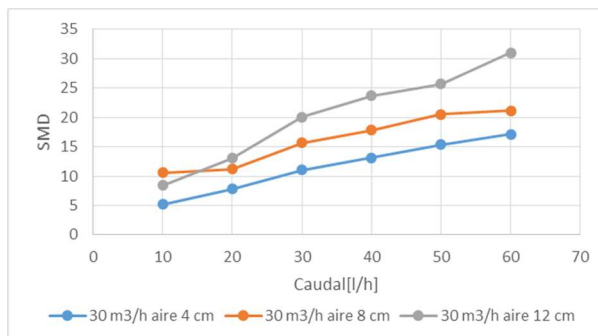
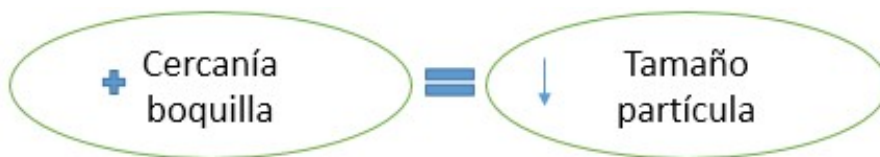


Gráfico 10: evolución SMD-caudal

Atendiendo a los últimos datos se constata que los valores de tamaño de partícula son menores cerca de la boquilla y conforme la distancia aumenta los tamaños van aumentando. Una posible explicación es el fenómeno de la coalescencia, de la que ya se ha hablado. Se observa además que la coalescencia se acentúa al aumentar el caudal de líquido, probablemente porque aumenta el número de gotas y la probabilidad de colisión entre ellas.



En las siguientes pruebas se han utilizado los caudales que mejores comportamientos han mostrado y que además, a nivel industrial podrían ser adecuados. Para aire se utilizó 30 m³/h de aire y para líquido 10 l/h ó 20 l/h alternativamente.

La primera de las pruebas, como se avanzó en la introducción, se centran en la evolución del tamaño de partícula desde una distancia de 2 cm de la boquilla del atomizador hasta 22 cm. La placa utilizada es de 13 mm y los caudales, los descritos anteriormente.

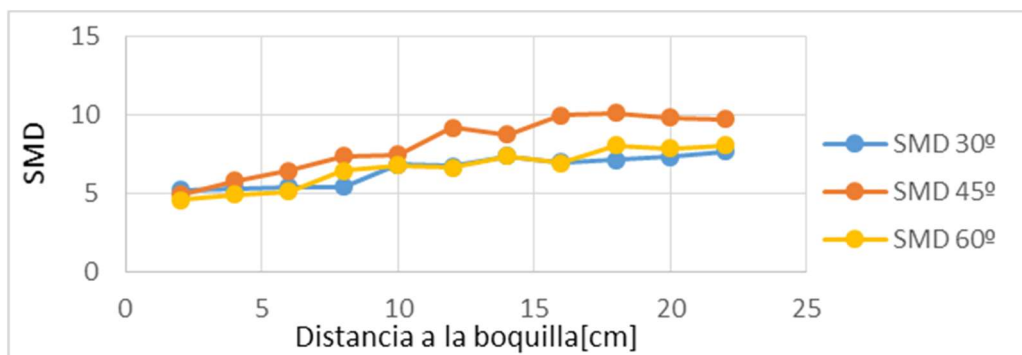


Gráfico 11: Evolución SMD tres conos a lo largo del eje.

Atendiendo a los resultados, no es posible determinar qué cono presenta un mejor comportamiento. Los conos de 30° y 60° presentan un comportamiento muy

similar, mientras que el de 45° genera un SMD muy cercano a los otros dos. En capítulos posteriores se abordará esta discusión desde el punto de vista de la toma de imágenes, el porcentaje en volumen por debajo de un determinado tamaño de partícula o mediante análisis de los histogramas, tratando de estudiar el comportamiento del cono desde más puntos de vista para una más completa caracterización. También se tendrán en cuenta otros aspectos como el ángulo del aerosol generado, la aparición de partículas de gran tamaño a ciertas distancias del orificio de salida, la homogeneidad del aerosol así como el ruido emitido por el dispositivo.

La segunda prueba consistió en un barrido radial a 10 cm de la salida del orificio, realizando medidas a cada centímetro en ambas direcciones. Con este ensayo se pretende estudiar la axisimetría del cono, así como la evolución del tamaño de partícula en la dirección radial.

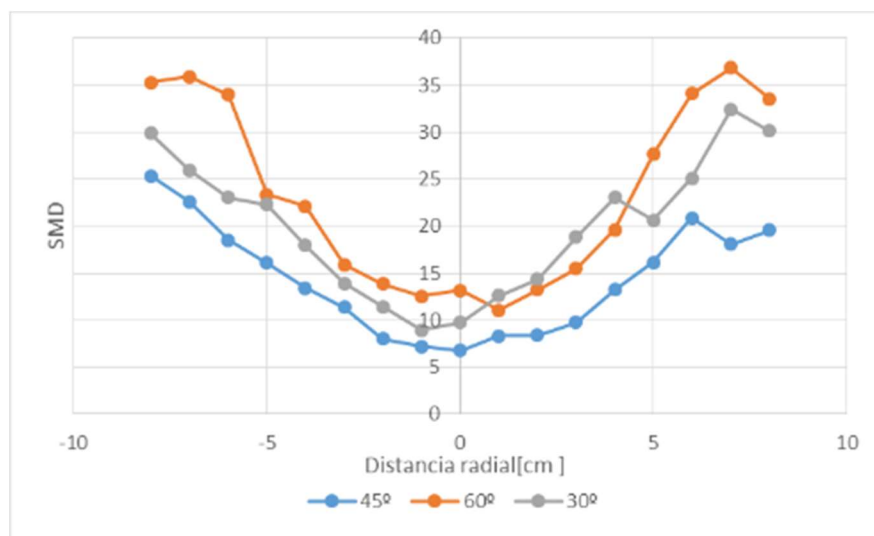


Gráfico 12: Evolución SMD de 3 configuraciones.

Atendiendo a la evolución de las medidas, los resultados obtenidos tampoco son concluyentes en la elección de qué cono presenta un mejor comportamiento porque la tendencia de evolución del SMD en los tres es similar en ambos sentidos. En condiciones ideales, el aerosol solo tendría que estar presente en la parte exterior del aerosol, siendo la presencia de gotas en la parte central mínima. Como ya se comentó, el vórtice genera una succión en su parte central y por tanto, una recirculación cuya intensidad depende de la componente tangencial de la velocidad a la que se inyecta el aire en la parte superior del cono. Esta succión, junto con la acción del aire exterior del aerosol, es el que provoca que parte de las gotas (las de menor tamaño, que se arrastran más fácilmente) que se encuentran en la periferia del aerosol sean desplazadas a la parte central, e incluso asciendan hasta el interior del cono. Por otra parte las gotas de mayor tamaño oponen una mayor dificultad a este desplazamiento debido a su mayor inercia.

Las pruebas realizadas hasta el momento no permiten conocer qué variante del dispositivo presenta un comportamiento superior al resto. Los comportamientos analizados son muy similares y los datos obtenidos muy próximos, pudiendo ser

justificados incluso por errores propios de medida del difractómetro. Por ello se van a analizar los histogramas obtenidos mediante el programa RTsizer.

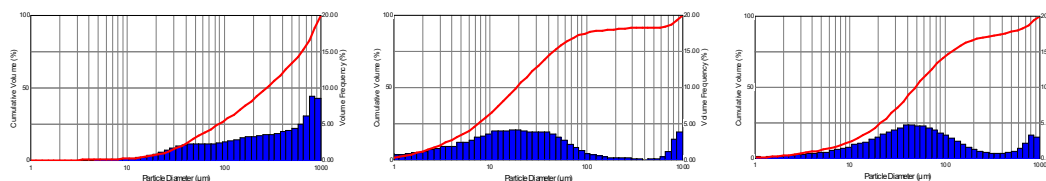


Imagen 17: Histogramas cono 45° con 20 l/h agua variando caudal del aire entre 10 y 30 m³/h a 4 cm

Las imágenes reflejan la evolución del histograma variando el caudal de aire entre 10,20 y 30 m³/h alimentando el atomizador con 20 l/h de agua, a una distancia de 4 cm de la boquilla y utilizando el cono de 45°. Se aprecia un desplazamiento de la distribución de la muestra hacia valores menores al aumentar la componente de aire y por tanto un cambio de tendencia en la traza de la línea roja, que representa la evolución del porcentaje en volumen total de la muestra con respecto a los tamaños de partícula.

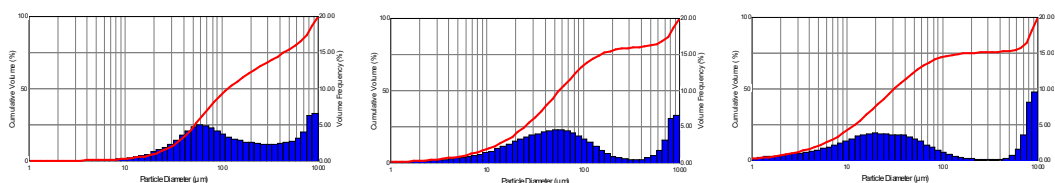


Imagen 18: Histogramas cono 45° con 10 l/h agua variando caudal aire entre 10 y 30 m³/h 8 cm

Las condiciones son idénticas a las anteriores pero en esta ocasión se muestran los histogramas a 8 cm de la boquilla. El comportamiento es idéntico al anterior caso de estudio. Se puede observar que para el caso de 30 m³/h aproximadamente el 75% del volumen total de la muestra se encuentra por debajo de un tamaño medio de partícula de 100 micras mientras que en el caso de 10 m³/h este valor se sitúa próximo a 500 micras. Atendiendo a la imagen 17, para los casos en los que se utiliza 10 l/h de líquido, el fenómeno de rotura o atomización secundaria está presente, pues en el histograma a 8 cm, se observa una importante disminución de presencia de partículas de mayor tamaño, desplazando el histograma hacia valores menores. Ello es debido a la presencia de partículas en el seno del aerosol con una velocidad relativa muy diferente, provocando colisiones entre ellas, con alta velocidad relativa y generando la ruptura de éstas, y por tanto disminuyendo su tamaño. A la salida de la boquilla y sobre todo en los casos de una atomización más pobre tenemos una gran cantidad de partículas de tamaño considerable y es cuando el aerosol se desarrolla y unas gotas interactúan con otras. Los efectos de este fenómeno para caudales más elevados de aire son considerablemente menores pues en la propia interacción líquido-aire ya se han generado partículas de tamaño mucho menor y por tanto la evolución de su tamaño axialmente es menos significativa.

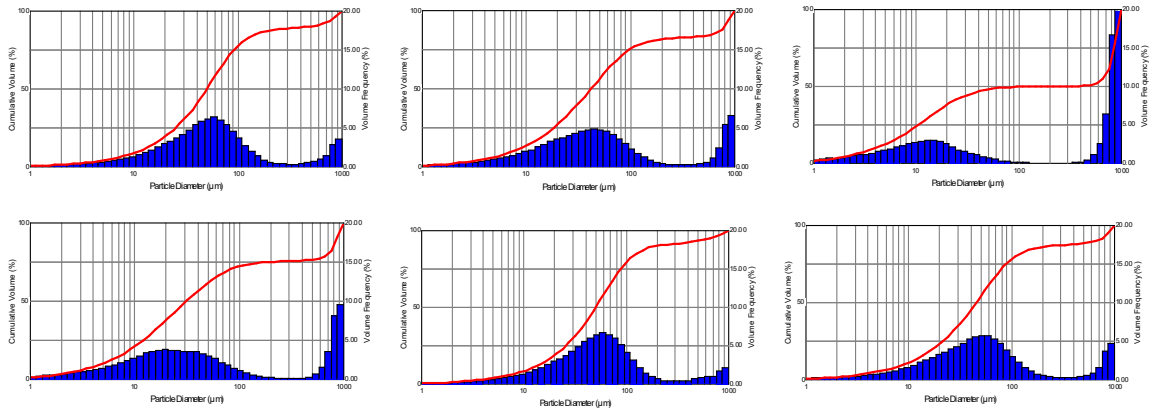


Imagen 19: Histogramas cono 45° con 30m³/h aire variando caudal agua entre 10 y 60l/h a 8cm

Las seis últimas imágenes muestran la evolución del histograma para un caudal de aire fijo de 30 m³/h y variando el caudal de agua entre 10, 20, 30, 40, 50 y 60 l/h. Para los caudales menores de líquido el histograma está desplazado a tamaños de partícula menores y a medida que va aumentando el caudal esta tendencia desaparece y la distribución se va desplazando hacia valores mayores.

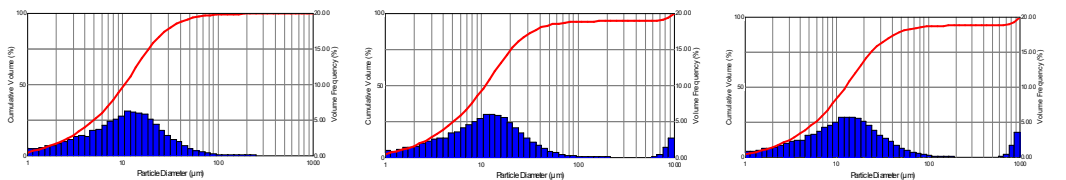


Imagen 19: histogramas cono 30° para 0,4 y 6cm en dirección radial respectivamente.

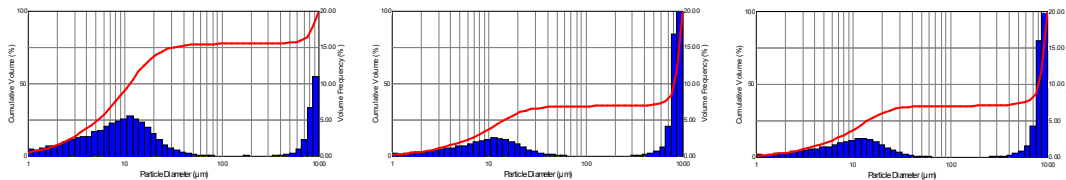


Imagen 20: histogramas cono 45° para 0,4 y 6cm en dirección radial respectivamente.

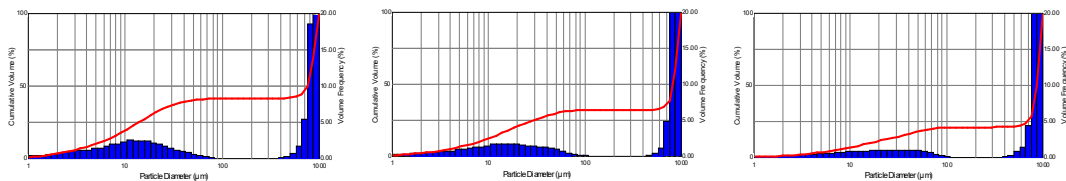


Imagen 21: histogramas cono 60° para 0,4 y 6 cm en dirección radial respectivamente.

Se ha realizado una comparación de histogramas con los tres ángulos de cono disponibles. Las pruebas se realizan con un caudal de 30 m³/h y 10 l/h de agua a una distancia de la boquilla de 10 cm, realizando mediciones 0, 4, 6 cm en la dirección radial. Podía haberse escogido los valores negativos, pero como ya se mostró, el aerosol generado es bastante axisimétrico. Se ha de prestar especial atención al comportamiento del cono de 30°, pues es especialmente constante en la distribución de tamaño de partícula cuando se realizan mediciones en distintas posiciones radiales. Una vez más se reitera la importancia del comportamiento de la línea roja, mostrando

especial interés nuevamente para la configuración de 30°, en la que más del 90% de la muestra se encuentra por debajo de 100 micras para el caso de 6 cm en la dirección radial. Para los conos de 60° y 45°, aproximadamente el 23% y 35% del volumen total de la muestra respectivamente se encuentran por debajo de las 100 micras.

Aunque un aerosol puede caracterizarse mediante un diámetro medio, este parámetro puede no ser suficiente para describirlo adecuadamente. De la función de distribución de tamaño de gotas pueden derivarse otros parámetros significativos, como el Span, definido en el anexo (III). El tipo de distribuciones que están siendo estudiadas son muy anchas, combinando importantes porcentajes en volumen para pequeños tamaños de partícula y para tamaños mucho mayores, provocando que el valor D(90%) se encuentre desplazado hacia valores elevados y por tanto generando un Span elevado.

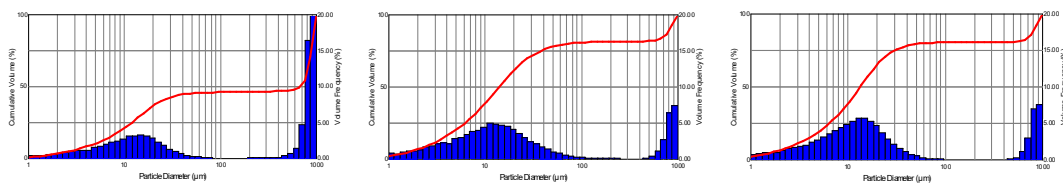


Figura 22: histogramas cono 45°, 60° y 30° con 10 l/h agua y 30 m³/h a 12 cm

En este caso se han comparado los histogramas obtenidos utilizando los 3 conos disponibles a una distancia de la salida de 12 cm combinando 10 l/h de agua y 30 m³/h de aire. Tanto el cono de 60° como el de 30° presentan una evolución de distribución de tamaños muy similar. Para el caso del cono de 45° hay una parte muy importante del volumen de la muestra ubicada en tamaños de partícula muy elevados.

Como se ha visto, para boquillas de doble fluido, el diámetro medio del aerosol normalmente disminuye al aumentar el caudal de gas y aumenta al aumentar el caudal de líquido. La dependencia simultánea de estos dos parámetros puede combinarse definiendo la relación entre los flujos máscicos de aire y líquido (*air to liquid ratio*, o *ALR*). En este proyecto a partir de los barridos realizados en la sección de ensayos con agua, los cuales abarcaban caudales de agua entre 10 y 60 l/h y aire entre 10 y 30 m³/h, se ha estudiado este parámetro para los casos de 4, 8 y 12 cm de la salida de la boquilla en la dirección axial. Para ello fue necesario calcular el flujo másico para los tres caudales de aire disponibles, pues el rotámetro proporciona medidas directas del flujo volumétrico. Se utilizó la siguiente expresión:

$$\dot{m}_G = \frac{Q_G [Nm^3/h]}{3600} \frac{101325}{273.15(287)} \sqrt{\left(\frac{p}{395525}\right) \left(\frac{293.15}{T}\right)}$$

En la que se ha tenido en cuenta que la presión y temperatura de trabajo pueden diferir de las de calibración del dispositivo. Para el caso de agua, asumiendo que es un fluido incompresible y que presenta una densidad de 1000 kg/m³, el cálculo de los flujos máscicos resulta mucho más sencillo. El caudal utilizado para establecer la relación ha sido el real, hasta ahora se había trabajado por comodidad y rapidez en las mediciones con el caudal nominal del rotámetro. Todas las comparaciones realizadas anteriormente, bien sea entre conos distintos o bajo distintos caudales de aire, se han

realizado con las medidas del rotámetro. A continuación se muestran los datos de caudales en kg/s para aire y agua.

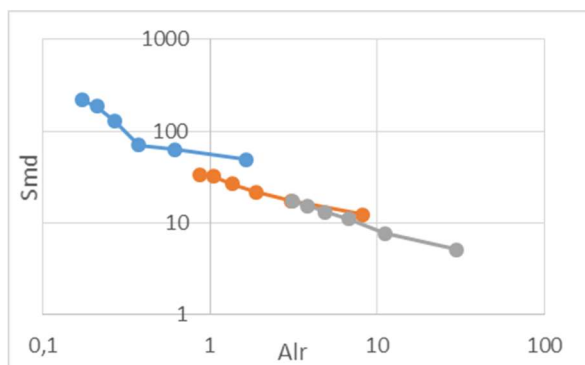
Q (Nm ³ /h)	Qm (kg/h)
10	9,55
20	47,88
30	173,69

Tabla 12: Flujo volumétrico y flujo másico de aire.

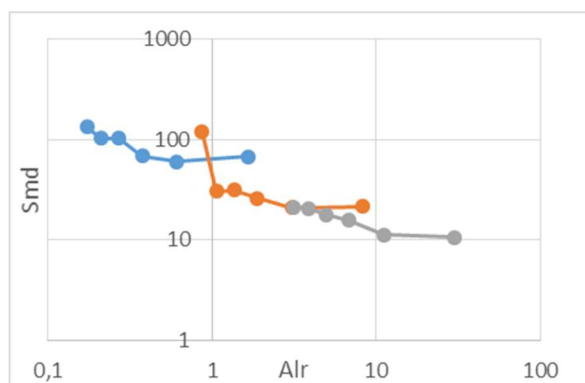
Q (l/h) rot	Qm (Kg/h) real
10	5,7992
20	15,6262
30	25,4532
40	35,2802
50	45,26928
60	55,27379088

Tabla 13: Flujo volumétrico y flujo másico de agua

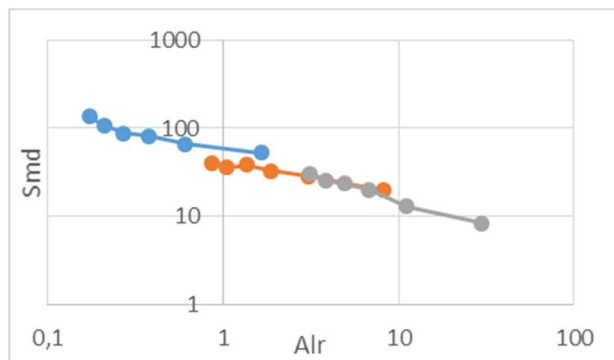
Por lo tanto, para cada condición aire-agua determinada, mediante las tablas anteriores, podemos establecer el ALR y una vez hecho esto graficar el SMD frente a esta variable adimensional, en vez de hacerlo mediante el caudal de aire y de agua. A continuación se muestran las gráficas SMD-ALR para una distancia de 4, 8 y 12 cm de la salida de la boquilla.



Gráfica 13: ALR a 4cm con agua



Gráfica 14: ALR a 8cm con agua



Gráfica 15: ALR a 12cm con agua

El comportamiento observado, muestra que se tiene una relación aproximadamente lineal en una gráfica con escala logarítmica y por tanto se puede expresar el SMD en función de este número adimensional.

Atendiendo a todo lo anterior mostrado en el apartado de ensayos con agua, parece que el ángulo del cono utilizado no es una variable determinante de diseño a tener en cuenta, puesto que en los tres casos posibles no existe uno de ellos que presente un comportamiento sustancialmente mejor. Es por ello que pueden ser otros aspectos como la manera de introducir el aire, los que determinen en mayor medida el comportamiento del dispositivo.

Como ya se expuso, el estudio con agua se realizó para parametrizar un caso base. Los resultados obtenidos muestran las tendencias esperadas y que en trabajos anteriores (Larred, 2014) utilizando maquetas de metacrilato, ya se habían observado. La atomización con bajos caudales de aire genera un aerosol muy pobre con grandes tamaños de partícula, ello se debe a la imposibilidad del atomizador de pulverizar todo el fluido. Los valores SMD obtenidos para este caso base son razonables, teniendo en cuenta la finalidad del dispositivo (alta viscosidad). Pese a ello, es posible encontrar en el mercado dispositivos alternativos para generar aerosoles de agua de una calidad equivalente o incluso superior, normalmente con orificios de salida menores. Sin embargo, estos dispositivos no serían adecuados para atomizar líquidos de alta viscosidad, pues exigirían presiones muy elevadas, y además podrían presentar inconvenientes como la obstrucción del orificio de salida. El diseño de la boquilla utilizada en estos experimentos, minimiza este tipo de problemas.

ENSAYOS CON GLICERINA

Como se acaba de comentar, este dispositivo atomizador ha sido diseñado para procesar fluidos de alta viscosidad y las pruebas con agua se realizaron para obtener una primera caracterización de un caso base. Se han repetido los experimentos utilizando la misma instalación y metodología que la seguida para el agua, pero utilizando glicerina como líquido de trabajo. Hay que tener en cuenta que las viscosidades dinámicas de agua y glicerina a 20°C son $1,00 \cdot 10^{-3} [N \cdot \frac{s}{m^2}]$ y $1,32 [N \cdot \frac{s}{m^2}]$ respectivamente, es decir, la viscosidad de la glicerina es más de mil veces mayor que la del agua. Se utilizaron distintos caudales de glicerina, controlados mediante un sistema by-pass y relacionando presiones y caudales. La glicerina empleada es impulsada mediante una bomba directamente desde una garrafa, sin precalentar o mezclar con otros fluidos para disminuir la viscosidad.

A continuación se muestran barridos con distintos caudales de aire y de glicerina realizados a distintas distancias (4, 8, 12 cm) de la salida del orificio.

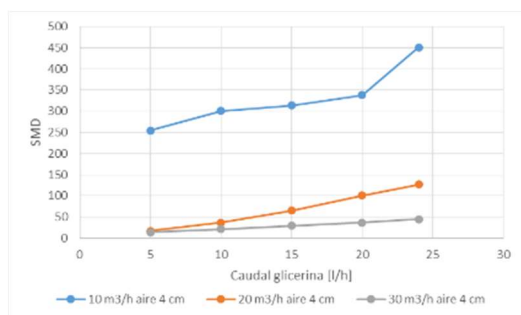


Gráfico 18: evolución SMD-caudal a 4cm glicerina

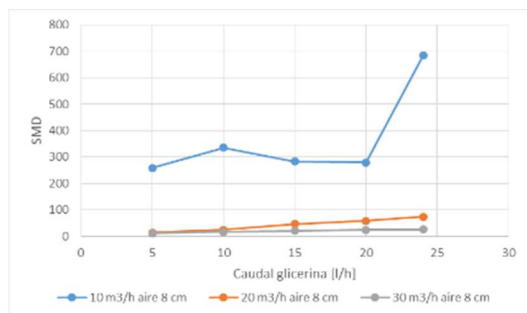


Gráfico 18: evolución SMD-caudal a 8cm con glicerina

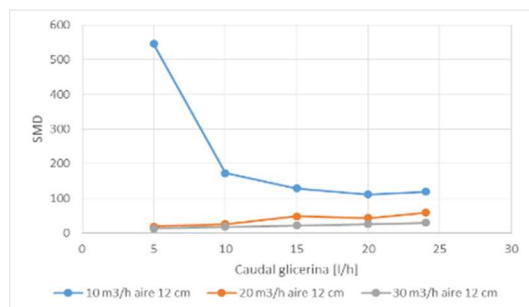


Gráfico 18: evolución SMD-caudal a 12cm glicerina

El aerosol generado al utilizar la glicerina, presenta unas tendencias idénticas a las observadas en el caso base, para un mismo caudal de glicerina, aumentando el de aire conseguimos unos valores de tamaño medio de partícula menores. En este caso, y como ya se comentó en capítulos anteriores, la atomización de fluidos de alta viscosidad presenta dificultades y por ello los SMD obtenidos son mayores. A continuación se muestra una tabla comparativa con valores de 10 y 20 l/h de agua y glicerina utilizando 30 m³/h de aire a 12 cm del orificio.

	SMD agua	SMD glicerina
10 l/h	8,43	17,57
20 l/h	13,08	25,29

Tabla 17: Comparación SMD agua y glicerina

Para una misma configuración y utilizando agua o glicerina, en la tabla se puede observar la diferencia de tamaños de gota existente. En el caso mostrado es prácticamente un diámetro 2 veces superior para el caso de la glicerina. Se han escogido caudales de 10 y 20 l/h debido a que están presentes en los estudios realizados con ambos fluidos. Para configuraciones que utilizan caudales menores de aire se obtienen SMD muy superiores. Esto se debe a que en ciertos casos, el dispositivo es incapaz de atomizar la glicerina y aparece una mezcla de glicerina atomizada y partes sin atomizar, disgregadas en grandes filamentos.

En el caso de la glicerina, y como será mostrado en el capítulo dedicado a la toma de imágenes, la atomización no siempre genera gotas aproximadamente esféricas sino que, en algunos casos, se obtienen filamentos sobre todo para valores bajos de ALR. Como el difractómetro ha sido diseñado para relacionar las energías medidas con las difractadas por gotas esféricas, la presencia de ligamentos puede generar imprecisiones en la medida. A este respecto, puede argumentarse, en primer lugar, que es difícil caracterizar un filamento mediante un único diámetro medio. Por otro lado, las comparativas entre resultados obtenidos para un mismo líquido si podrían indicar la presencia de un mayor o menor número de filamentos o gotas grandes. Finalmente, las medidas de gotas pequeñas se verían poco afectadas por este problema.

A continuación, y como se realizó para el caso base, se muestran los resultados obtenidos para los tres ángulos de cono posibles en combinación con la placa base de 13mm. El ensayo se basa en caracterizar los distintos aerosoles en distintas posiciones axiales. Se ha utilizado un caudal de 10 l/h de glicerina y 30 m³/h de aire.

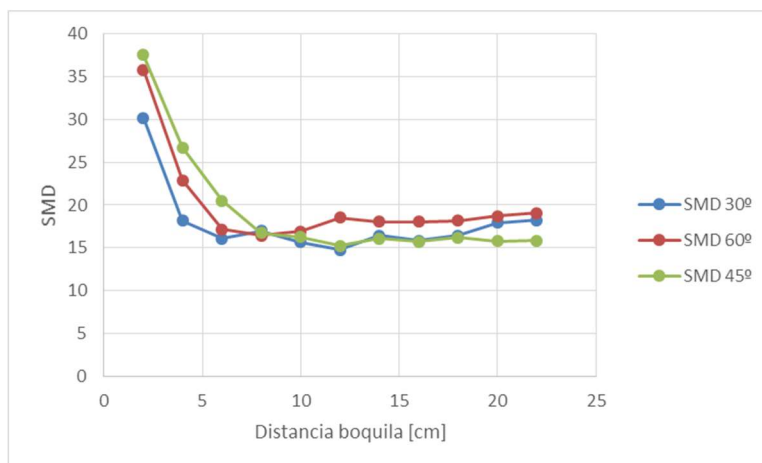


Gráfico 22: evolución SMD-caudal

Atendiendo a los resultados, se observa que a pequeñas distancias axiales a la salida del dispositivo atomizador es donde el SMD presenta valores más elevados. Esto es debido a que es en la salida donde se produce una mayor acumulación de filamentos se observará en el capítulo de toma de imágenes. Para mayores valores axiales los ligamentos se fragmentan en gotas, y además el fluido atomizado se distribuye en la parte externa del cono generado, permaneciendo en la parte central solo las partículas de menor tamaño.

El segundo de los ensayos que se realizó, y de igual forma que para el caso base, fue un barrido radial a 10 cm de la salida del atomizador bajo las mismas condiciones que para el ensayo anterior, 10 l/h de glicerina y 30 m³/h de aire. A continuación se muestran los resultados obtenidos

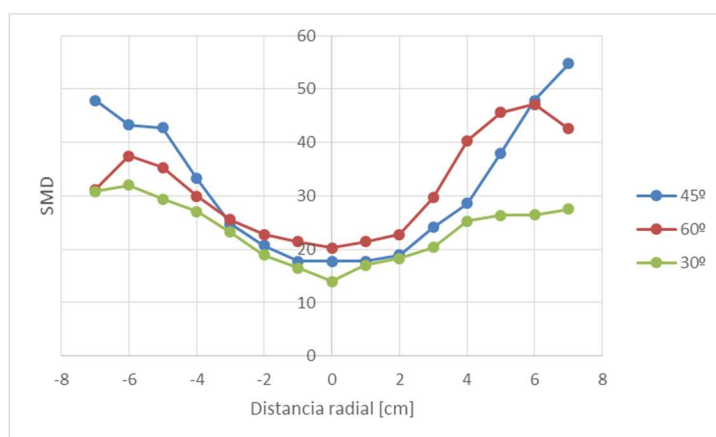


Gráfico 20: evolución radial SMD-caudal

Como ya ha sido comentado, el comportamiento es el esperado y es muy similar al presente en el caso base (agua). Los valores de SMD más elevados están presentes en la periferia del cono generado y la parte central alberga las partículas de tamaño más pequeño. Los tres conos muestran una tendencia muy similar, por lo que no es posible determinar cuál de ellos es mejor y por tanto habrá que valorar otros aspectos como se hará en próximas secciones.

De igual forma que se hizo en los ensayos con agua, se van a analizar algunos de los histogramas obtenidos utilizando glicerina como fluido a atomizar. Las distribuciones de partícula que van a ser comentadas son las mismas que se realizaron para el caso de agua.

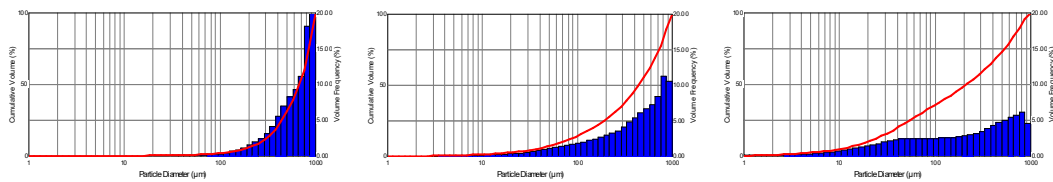


Imagen 23: Histogramas cono 45° con 20l/h glicerina variando cauda del aire entre 10 y 30m³/h a 4cm

Primeramente se van a analizar los histogramas de un barrido realizado utilizando 20 l/h de glicerina y 10, 20 y 30 m³/h de aire. La influencia del aumento del caudal de aire se ve presente en la evolución de los histogramas, mostrando un desplazamiento hacia valores mas pequeños de tamaño de partícula a medida que aumenta el aire y una disminución de las gotas de tamaño grande. Comparando con la imagen 17, los resultados obtenidos en el caso de glicerina a diferencia de los de agua, presentan una mayor cantidad de partículas de elevado tamaño y el desplazamiento del histograma hacia valores mas pequeños al aumentar el flujo de aire, es considerablemente menos acusado.

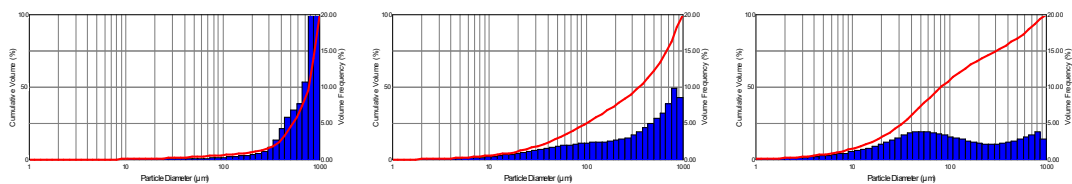


Imagen 24: Histogramas cono 45° con 20l/h glicerina variando cauda del aire entre 10 y 30m³/h a 8cm

Los histogramas mostrados se realizaron bajo las mismas condiciones que en el caso anterior pero a una distancia de la boquilla de 8 cm. En esta ocasión el aumento de aire genera unas distribuciones en las que se aprecia un claro desplazamiento hacia valores de tamaño de partícula menores. Igual que en el caso con agua, existen diferencias entre los histogramas a 4 y 8 cm. Una posible explicación podría ser la rotura secundaria de filamentos debido al efecto del aire.

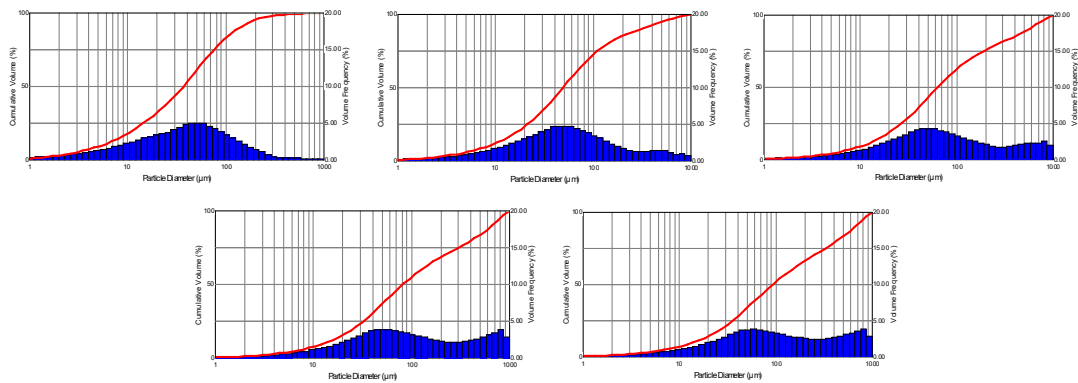


Imagen 25: histogramas cono 45° con 30m³/h aire y caudal glicerina entre 5, 10, 15, 20 y 24 l/h a 8cm

Alimentando al atomizador con un caudal fijo de aire y elevando la cantidad de fluido a nebulizar, como ya ha sido comentado anteriormente provoca un desplazamiento de los histogramas hacia valores superiores. Los cambios no son tan acentuados como los mostrados en el estudio del caso base pero si presentan la misma tendencia comentada.

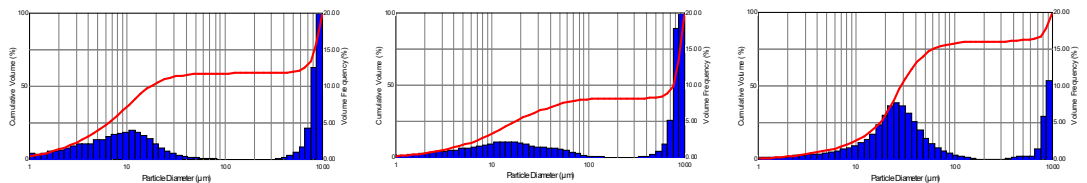


Imagen 26: histogramas cono 30° para 0,4 y 6cm en dirección radial respectivamente.

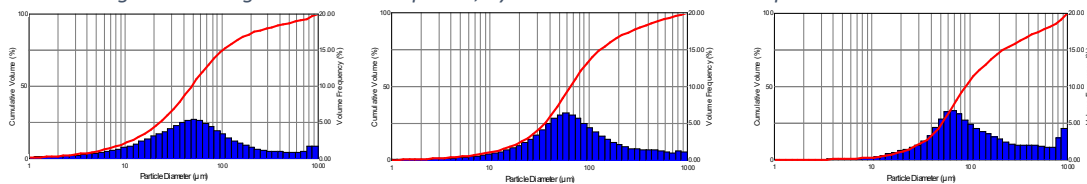


Imagen 27: histogramas cono 45° para 0,4 y 6cm en dirección radial respectivamente.

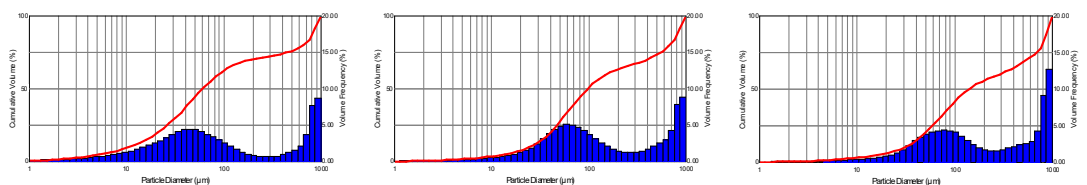


Imagen 28: histogramas cono 60° para 0,4 y 6cm en dirección radial respectivamente.

Se muestran los histogramas para los 3 conos disponibles en tres posiciones distintas, 0, 4 y 6cm en la dirección radial a una distancia de 10 cm del dispositivo atomizador. Se han escogido los valores radiales positivos por conveniencia, puesto que se ha asumido la axisimetría del cono generado. Se observa que el cono de 45° muestra el comportamiento que mas cabría esperar, distribución más desplazada a la izquierda en la zona central y para 4 y 6 cm una mayor presencia de gotas de mayor tamaño. Por el contrario, el cono de 30° genera una importante cantidad de partículas grandes ya en la zona central y para el caso de 45° el comportamiento es similar.

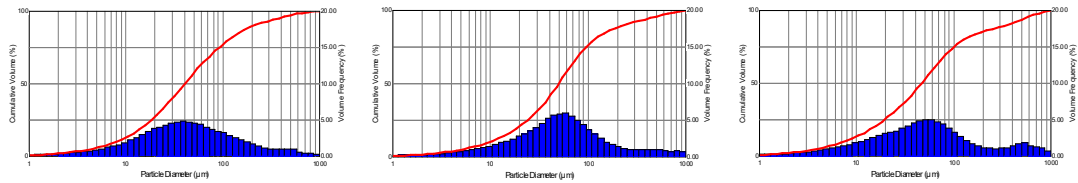
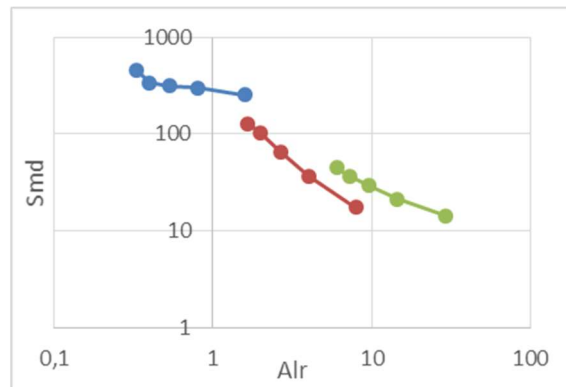


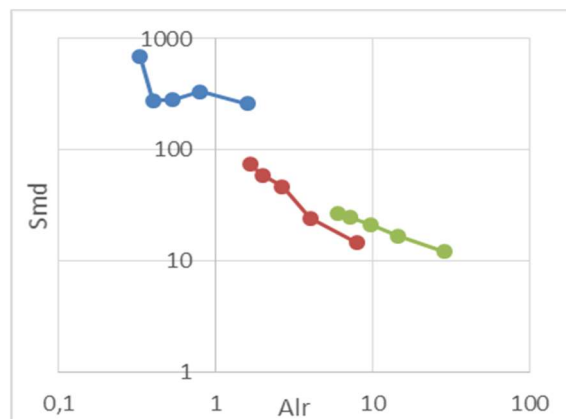
Imagen 29: histogramas cono 45°, 60° y 30° con 10 l/h glicerina y 30 m³/h aire a 12 cm

En esta ocasión, se va a comparar para los tres conos posibles a 12 cm, una de las configuraciones que menor tamaño de partícula generan, 10 l/h de glicerina y 30 m³/h de aire. Tanto el cono de 45° como el de 60° muestran un comportamiento similar siendo la configuración con el cono de 30° la que presenta un pequeño porcentaje de tamaños de partícula elevados.

De la misma forma que se realizó para el estudio del caso base con agua, resulta muy interesante establecer una relación entre el tamaño medio de las gotas con el parámetro adimensional ALR. A continuación se muestran las gráficas SMD-ALR a 4, 8, 12 cm de la salida del atomizador.



Gráfica 14: ALR a 4 cm con glicerina



Gráfica 14: ALR a 4 cm con glicerina

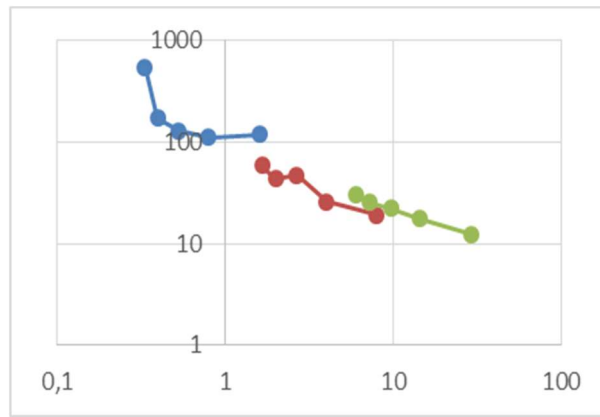
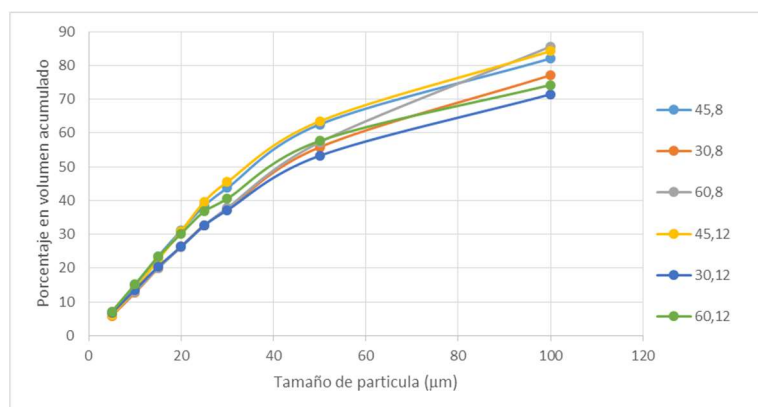


Gráfico 22: SMD-ALr a 8cm de la boquilla

Comparando con el ALR obtenido para el caso de agua, aquí el ajuste a una sola recta es peor. Se puede suponer una mayor influencia de otros números adimensionales. En este caso podría ser una influencia relacionada con el número de Reynolds, dado que la densidad y la tensión superficial del agua y de la glicerina son similares.

Para concluir con el capítulo de ensayos con glicerina, se decidió, para los tres conos (30°, 45° y 60°) a 2 distancias de la salida de la boquilla, 8 y 12 cm realizar un estudio sobre qué porcentaje en volumen de la muestra se encuentra por debajo de ciertos tamaños de partícula, que podrían ser interesantes en una futura aplicación industrial. A continuación se muestra los datos obtenidos para los casos descritos anteriormente y caudales de 10 l/h de glicerina y 30 m³/h de aire.



Gráfica 24: Representación porcentajes en volumen por debajo de un tamaño en los distintos conos a 8 y 12

Atendiendo a la gráfica anterior, se puede establecer que la tendencia para los tres conos en ambas distancias a la salida es muy similar. Fijando el caso de 30 μm, tanto para 4 como 8 cm se observa que el cono de 45° es el que más porcentaje en volumen se encuentra por debajo de ese tamaño de partícula. Este comportamiento está presente también para prácticamente todos los tamaños de gota. No obstante tanto la tendencia como los porcentajes por debajo de cada tamaño de partícula son muy similares en todos los casos y no muestran una configuración o posición que destaque

sobre el resto. Es de reseñar que el volumen de gotas con diámetro inferior a $20\text{ }\mu\text{m}$ supone en algunos casos más del 30% del total.

Toma de imágenes.

Como ya se avanzó en capítulos anteriores, la toma de imágenes del aerosol tiene gran relevancia en este proyecto puesto que nos permite, mediante la visualización, interpretar el comportamiento del fluido atomizado, conocer el ángulo de salida del aerosol, la homogeneidad de la muestra, la existencia de pulsos, la presencia de filamentos así como establecer comparaciones visuales entre varias configuraciones.

El equipo utilizado fue una cámara HAMAMATSU ORCA-ER de 1344×1024 pixels con un objetivo NIKON de 50 mm de focal 50, a una apertura F/16 en combinación con un láser pulsante de Nd:YAG Quanta Systems modelo Pils sincronizado con la cámara mediante un generador de pulsos. El haz láser se hace pasar por un conjunto de 2 lentes para generar un plano láser delgado, la primera lente es cilíndrica divergente y expande el haz en un plano vertical y la segunda es una lente cilíndrica que se usa para focalizar el plano, en este caso en la zona del aerosol.

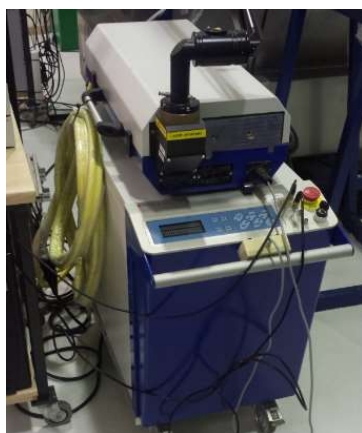


Imagen 30: Detalle láser utilizado



Imagen 31: Detalle cámara y objetivo utilizado

Los ensayos que se realizaron se basaron en un barrido de caudales tanto para agua como glicerina con distintos caudales de aire y combinando también los 3 tipos de conos de los que se disponía (30° , 45° y 60°). En esta sección se van a mostrar las visualizaciones de los aspectos más importantes y que a lo largo del texto han sido nombradas como por ejemplo la visualización de filamentos de glicerina, atomización pobre y diferencias en el aerosol generado utilizando caudales de aire distintos entre otros.

La primera de las imágenes que se muestra es un claro ejemplo de la aparición de filamentos. Como ya se comentó, aparecen cuando el dispositivo atomizador no es capaz de nebulizar todo el caudal de glicerina. Es obvio pensar por tanto, que dada una configuración, el uso de caudales menores de aire fomentará la generación de filamentos. Su presencia es un claro ejemplo de las dificultades que presenta la atomización de fluidos de alta viscosidad, en comparación con el caso base, en cuyo caso las condiciones necesarias para obtener una nebulización aceptable son mucho menos restrictivas.

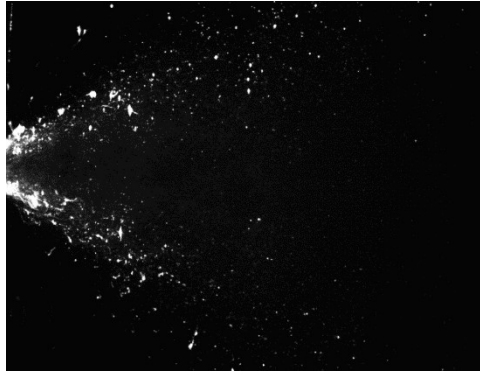


Imagen 32: Filamentos de glicerina

Los filamentos mostrados en la imagen corresponden a un caudal de glicerina de 20 l/h y 20 m³/h de aire. El cono utilizado es de 30°. Para ciertas configuraciones e incluso en ciertos casos utilizando agua, el tamaño de gota obtenido es tal, que proyecta incluso sombra en la propia imagen. Se puede observar que la mayor parte de volumen atomizado se encuentra en la parte exterior del cono, albergando en la parte central muy pequeñas concentraciones de gotas de menor tamaño.

A continuación para un caudal de 20 l/h para ambos fluidos y 30 m³/h de aire, se van a mostrar las imágenes obtenidas para los 3 ángulos de cono disponibles.

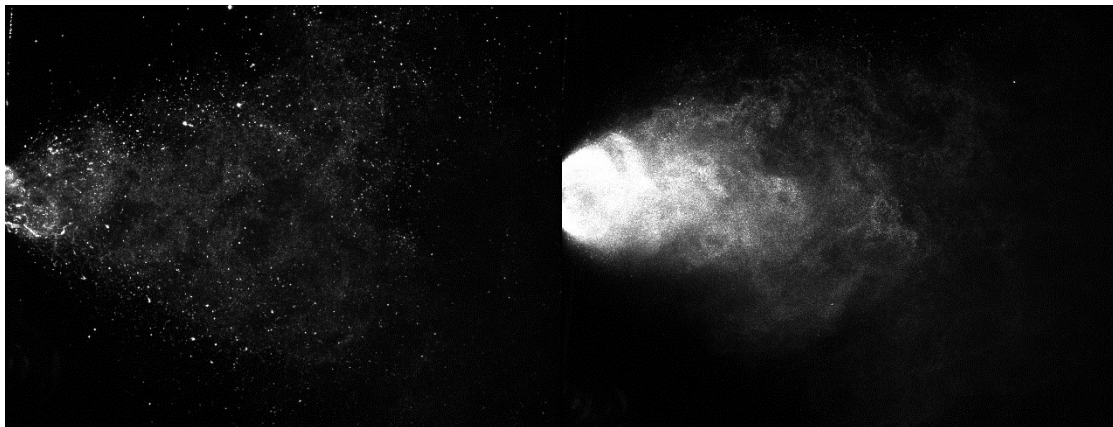


Imagen 33: cono 30° y glicerina



Imagen 34: cono 30° y agua

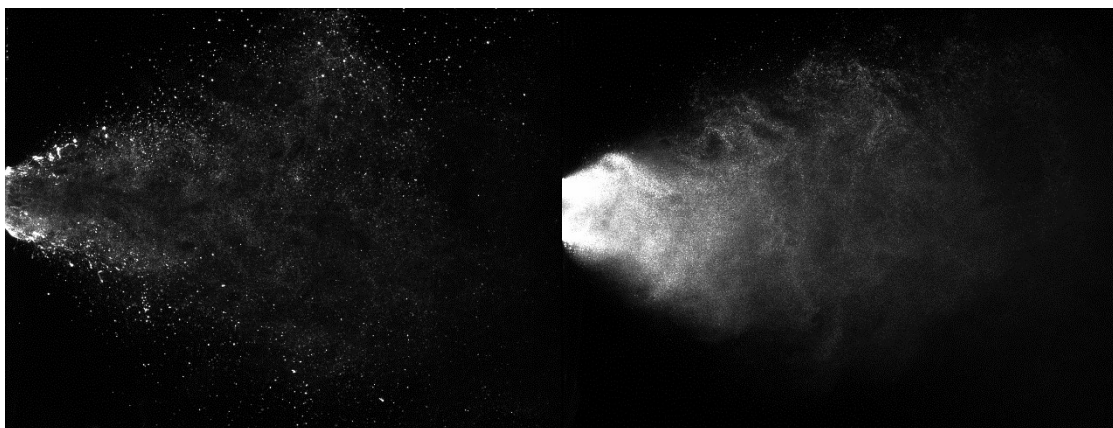


Imagen 35: cono 45° y glicerina

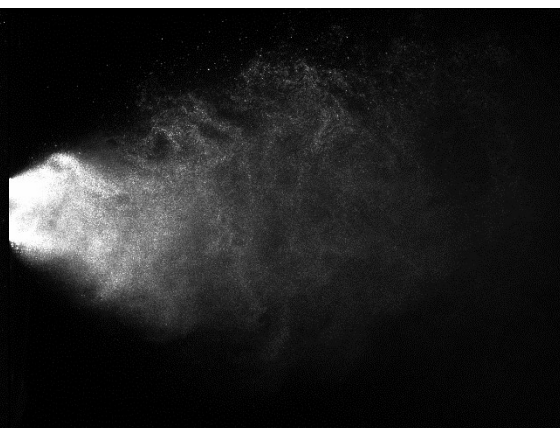


Imagen 36: cono 45° y agua

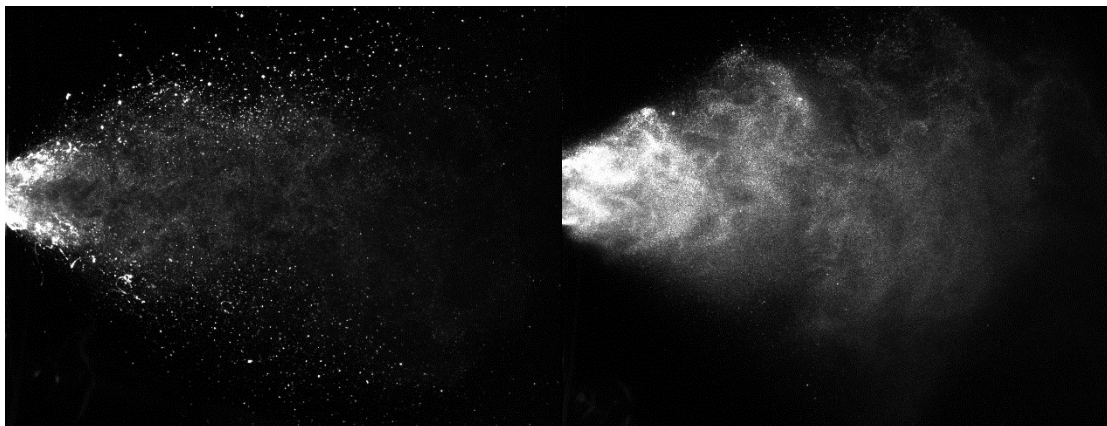


Imagen 37: cono 60 ° y glicerina

Imagen 38: cono 60 ° y agua

Como se puede apreciar y ya ha sido comentado en capítulos anteriores, utilizando tanto el SMD como los histogramas, el ángulo del cono utilizado no es una variable determinante en el dispositivo atomizador. Para las imágenes mostradas, el rango de contraste utilizado es el mismo [200-850]. Para una imagen dada, una mayor intensidad es indicativa de una mayor cantidad de gotas y, teniendo en cuenta que el caudal de líquido es el mismo, un mayor número de gotas debe implicar que tengan menor tamaño.

En lo que resta de capítulo, se van a correlacionar los datos y comentarios obtenidos en secciones anteriores mediante la visualización de imágenes. Debido a que ningún cono presenta un comportamiento muy superior al resto se ha escogido el cono de 45°. A continuación se van a mostrar los cambios en el aerosol variando las condiciones de operación de dos formas distintas:

-Dado un caudal de líquido fijo, variando la cantidad de aire. En este caso se va a utilizar 20 l/h debido a que es un valor intermedio entre el mínimo y máximo con el que la instalación puede trabajar

-Para un caudal fijo de 30 m³/h de aire variar el caudal de fluido a nebulizar.



Imagen 39: Evolución aerosol para 20 l/h de agua y variando el caudal entre 10, 20 y 30 m³/h

La imagen de la izquierda corresponde a un caudal de 10 m³/h de aire y 20 l/h de agua, en esta ocasión ha sido necesario modificar el rango de contraste entre [200-350] debido a que, utilizando las condiciones establecidas para el resto de las imágenes no permitía la visualización del aerosol. Para el resto de las imágenes las condiciones son las mencionadas anteriormente.

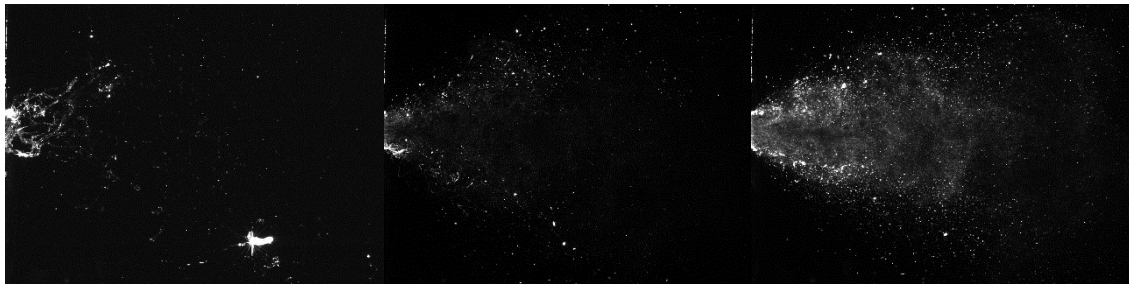


Imagen 40: Evolución aerosol para 20 l/h de glicerina variando el caudal entre 10, 20 y 30 m³/h

Se aprecia la tendencia ya comentada en secciones anteriores, al aumentar el caudal de aire para uno fijo de fluido a nebulizar el tamaño de partícula disminuye. En las fotos queda reflejado en forma de intensidad. La imagen de la derecha, que se corresponde a 30 m³/h presenta una intensidad muy superior al caso de 20 m³/h atomizando el mismo caudal de agua, por lo tanto la única diferencia es la cantidad de gotas, las cuales tienen que tener menor tamaño.

Como en el caso de agua, en la imagen de atomización de glicerina con menos caudal de aire el rango de contraste ha sido cambiado [200-350] pues el otro contraste no permitía visualización del aerosol. El aumento del caudal de aire genera un aerosol con tamaños de partícula menores, pues las imágenes presentan una mayor intensidad. Cabe destacar y como también se ha comentado en ocasiones anteriores, la presencia de filamentos para el caudal menor de aire así como la diferencia entre la intensidad en las imágenes para atomización de agua y glicerina, siendo mucho mayores en la primera.

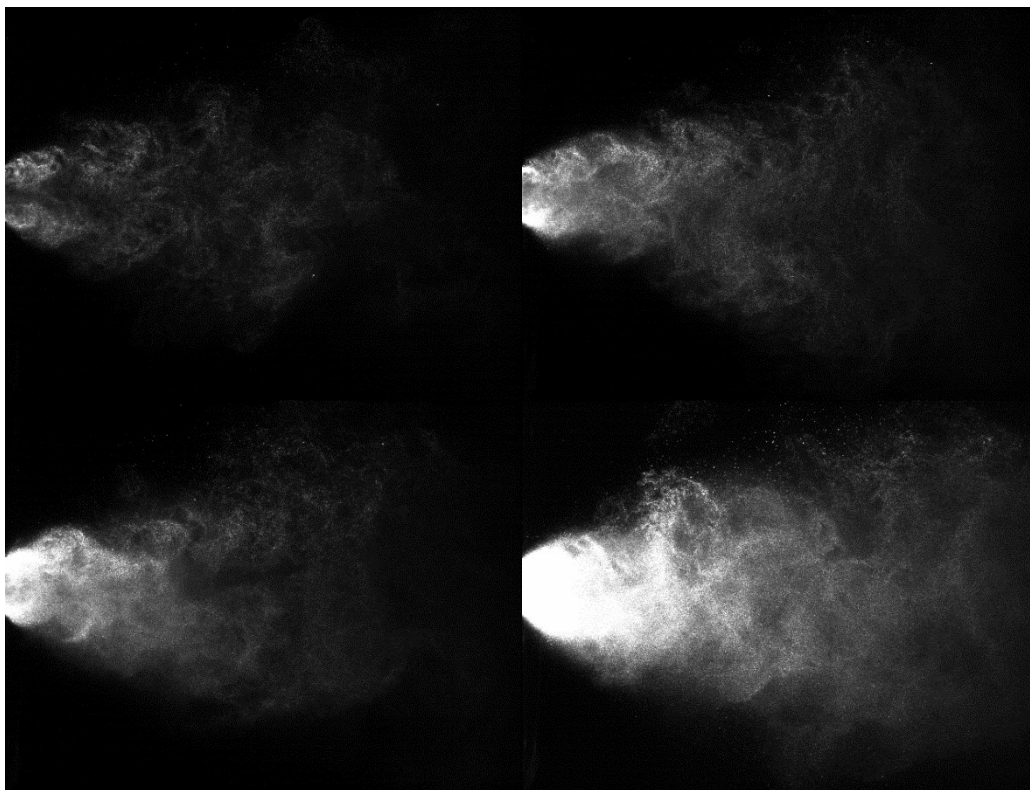


Imagen 41: Evolución aerosol con 30 m³/h de aire y variando los caudales de agua.

Las cuatro imágenes mostradas anteriormente corresponden a un caudal de 30 m³/h, siendo los de agua 5, 15, 20 y 25 /h. A medida que el caudal de agua aumenta, se produce una mayor acumulación de fluido a la salida así como una mayor presencia de partículas de mayor tamaño en la parte más externa del cono de aerosol. Es importante recordar que en el caso ideal, toda la masa de fluido nebulizada se ubicaría en la parte más externa. A medida que aumenta el caudal lo hace también la intensidad de las imágenes debido a una mayor cantidad de gotas.

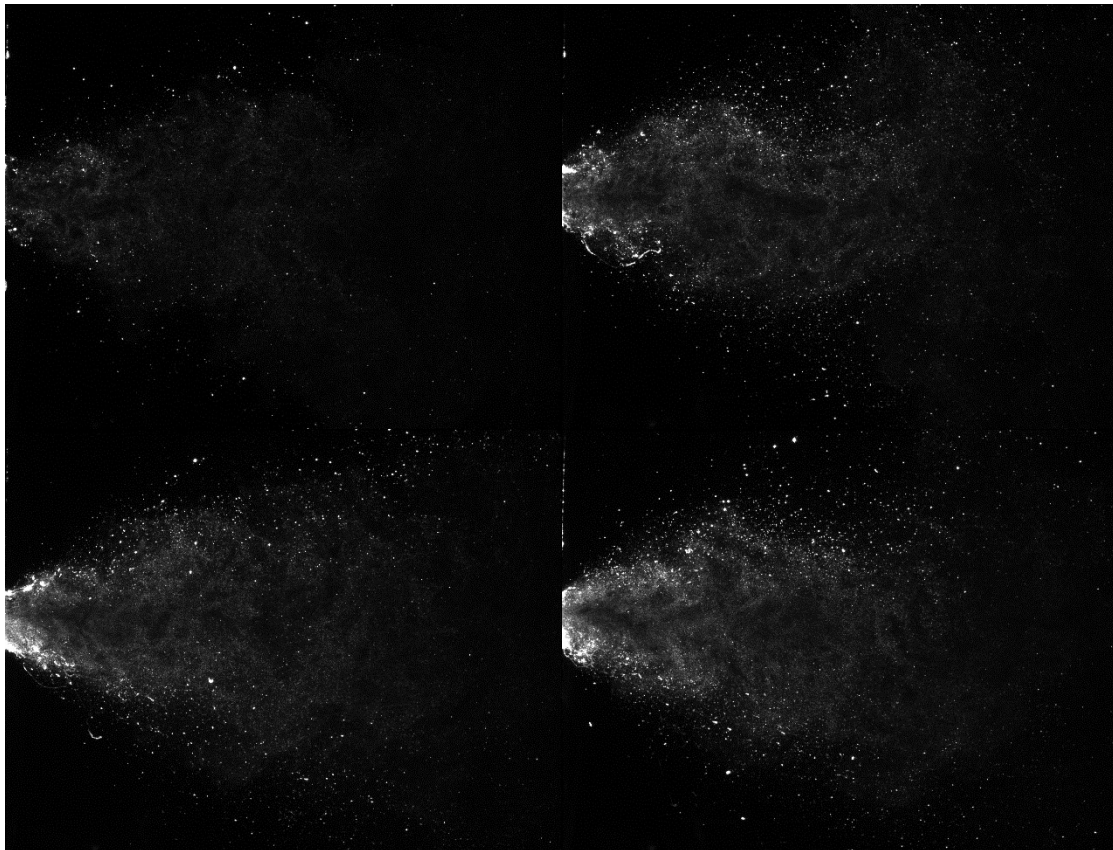


Imagen 42: Evolución aerosol con 30 m³/h de aire y variando los caudales de glicerina

Las cuatro imágenes mostradas anteriormente corresponden a un caudal de 30 m³/h, siendo los de glicerina 5, 10, 20 y 24 l/h. Para el caso con menos glicerina, a diferencia de aquellos en los que se nebulizan caudales más altos, no se aprecia presencia de filamentos. Se observa que la cantidad de fluido a la salida de la boquilla es mucho mayor, en caudales altos, apareciendo el fenómeno de la rotura secundaria debido a la diferencia de velocidades relativas.

El caso de 20 l/h podría ser uno de los más relevantes debido a que es un caudal representativo que podría utilizarse en la aplicación final del dispositivo atomizador. Caudales menores como el de 5 l/h no son tan relevantes, porque las posibles aplicaciones podrían ser más limitadas.

Para caudal similar de agua y glicerina, y con la misma cantidad de aire, se observan las diferencias en el aerosol creado. Con agua la intensidad de las imágenes es mucho mayor, por lo que hay una mayor concentración de partículas de menor tamaño.

Esta es la justificación de por qué, siendo el objetivo final de este dispositivo la atomización de fluidos de alta viscosidad se empezó con un caso base con agua. Si los resultados obtenidos con agua hubieran sido negativos, al tratar de nebulizar glicerina u otro fluido muy viscoso, la atomización hubiera sido pésima, con una gran presencia de filamentos debido a que el atomizador no puede atomizar el fluido correctamente.

No se han comentado imágenes con caudales de 10 m³/h de aire pues la atomización es de muy mala calidad. En el caso de agua los tamaños de partícula son muy elevados y para glicerina hay una gran cantidad de filamentos por lo que no es de interés para este proyecto que se centra en la posibilidad de generar gotas pequeñas. A continuación se muestran imágenes de atomización pobre.

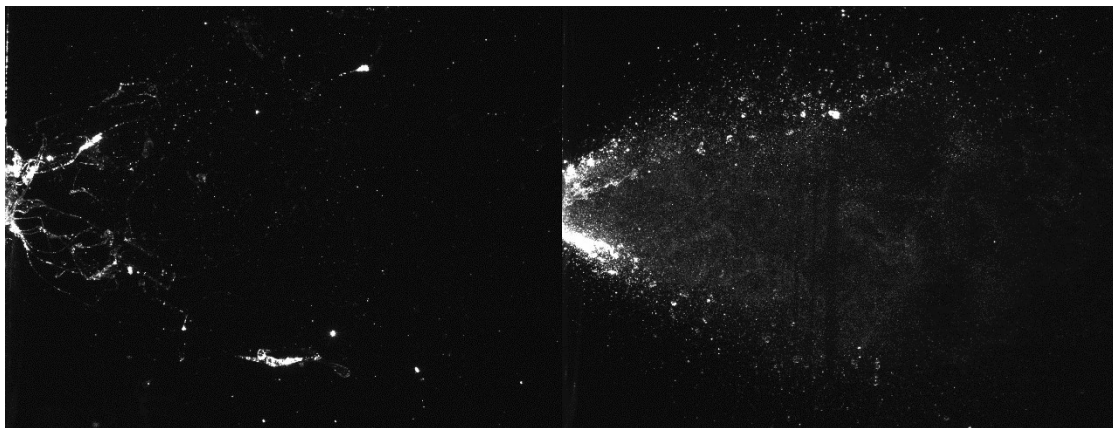


Imagen 43: Ejemplos de atomización pobre para glicerina y agua

Uno de los motivos principales por los que se ha realizado la toma de imágenes combinando fluidos y conos distintos ha sido tratar de establecer una relación entre el ángulo de cono utilizado y el ángulo del aerosol generado. La variación en el ángulo del aerosol entre las distintas configuraciones es mínima, es un resultado muy importante debido a que nos permite establecer la no existencia de una relación entre el ángulo del cono utilizado y el que producirá su nebulización.

OPTIMIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN

Tras la caracterización del dispositivo atomizador, se pensó en la posibilidad realizar un pequeño estudio relacionado con la optimización del nebulizador. Como ya se ha comentado anteriormente en este texto, se ha detectado a lo largo del análisis de los ensayos realizados, la posibilidad de que algunas gotas, debido a la tensión superficial se queden pegadas en la placa inferior, precipitándose posteriormente. Ello podría ser una explicación de la presencia en los histogramas de una cantidad de partículas de gran tamaño.

Por ello se decidió adquirir un producto hidrófobo, concretamente *NeverWet*. Está compuesto por dos espray, denominados “step 1” y “step 2”. La forma de trabajar con este productor es sencilla, se realiza primeramente una limpieza de la superficie con

la que queremos trabajar y aplicamos el spray “step 1” una vez. Tras un tiempo aproximado de 15 minutos en los que la película creada se ha secado, se vuelve a aplicar el producto y se espera de nuevo un tiempo similar. El spray “step 2” puede aplicarse tantas veces como se desee, para las pruebas realizadas en este proyecto se realizó 3 veces, dejando unos 10 minutos entre una y otra aplicación. Una vez realizados estos pasos, se ha conseguido convertir la superficie de nuestra placa inferior completamente hidrófoba. El anexo (II) incluye más detalles de este producto.

Los ensayos realizados para comprobar si la aplicación del producto anteriormente descrito eliminaba parte de las partículas de mayor tamaño mostradas en los histogramas. Puesto que se disponía de 2 placas de 13 mm, a una de ellas se le aplicó el producto hidrófobo y la otra permaneció sin cambios. Las pruebas realizadas fueron idénticas para ambas placas y se utilizaron caudales de aire de 20 m³/h y 30 m³/h de aire con 10, 20 y 30 l/h. Tras la realización de los ensayos los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

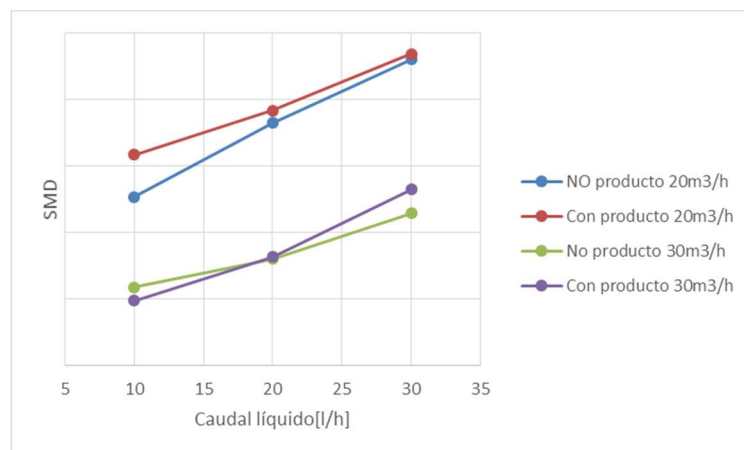


Gráfico 25: Evolución SMD-Caudal para 20 y 30 m³/h con material hidrófobo y sin él

Atendiendo a los resultados, no se observa una mejoría en el SMD tras haber aplicado el producto hidrófobo. Las tendencias mostradas son muy similares y por tanto no es posible concluir que los tamaños de partícula de gran tamaño que aparecían en los histogramas durante los ensayos de agua y glicerina estén causados en cierta medida por las posibles gotas que permanezcan pegadas a la placa inferior.

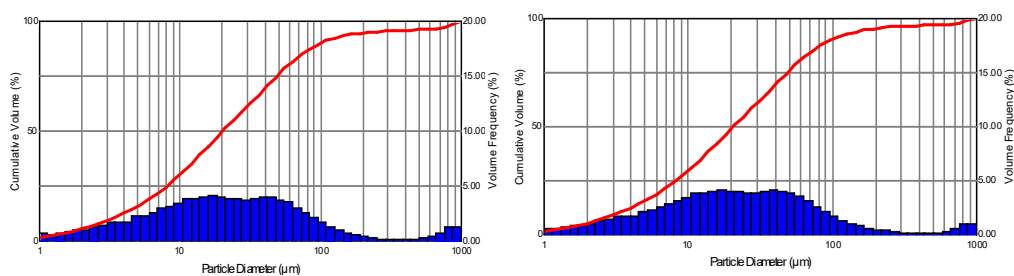


Imagen 44: Histograma sin producto hidrófobo (izda) y con producto (drcha.) utilizando 20 l/h agua y 20 m³/h aire

Los histogramas anteriores refuerzan la idea de la no existencia de mejoría utilizando el producto hidrófobo. Muestran una tendencia idéntica y las pequeñas

diferencias que se pueden observar son en su mayoría propiciadas por los errores de medida introducidos por el histograma.

A petición del grupo de investigación se han solicitado varios estudios mediante análisis numérico tratando de tener más información sobre como interaccionan ambos fluidos. A pesar de la gran complejidad de los estudios realizados, no se ha conseguido establecer una relación entre los resultados numéricos y lo obtenido experimentalmente.

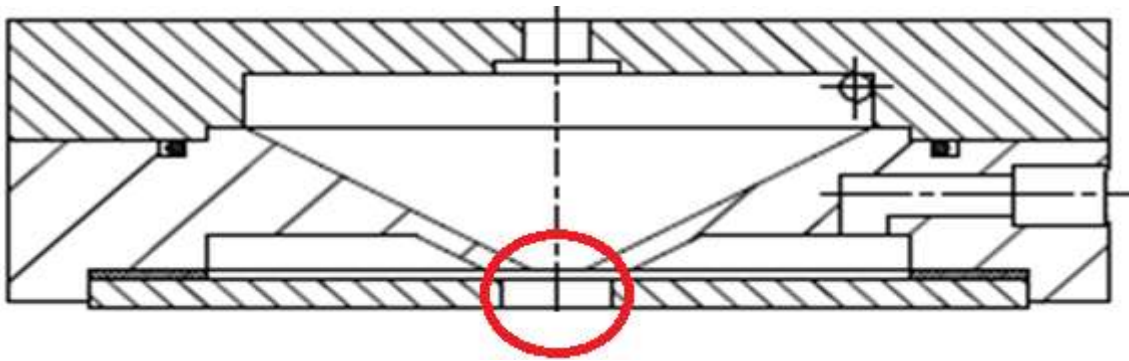


Imagen 45: Sección dispositivo atomizador.

En la imagen anterior, la parte rodeada con un círculo rojo se corresponde con la zona crítica del dispositivo. Es en esa región donde los análisis numéricos muestran unos comportamientos de los fluidos y a nivel experimental existen ciertas discrepancias. Aunque los resultados obtenidos mediante la prueba hidrófoba no hayan mostrado una clara mejoría, si permiten acotar en mayor medida el origen de esas partículas de mayor tamaño que están presentes incluso en los casos más óptimos, en aquellos con una relación aire-líquido mayor.

Se ha llegado a varias conclusiones con respecto a lo que puede estar sucediendo, desde la posible ingesta de aire exterior por el orificio de salida generando una recirculación interior hasta que en la zona de interacción aire-líquido parte del fluido alcance el orificio de salida sin interaccionar con el aire.

Es por tanto un aspecto que debe ser abordado y su solución aportaría al dispositivo una clara mejoría.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

Como ya ha sido comentado a lo largo del texto, el principal objetivo de este TFG es la parametrización de un dispositivo nebulizador. Se ha constatado que parte de los inconvenientes mostrados en diseños previos han sido solventados pero todavía persisten aspectos a nivel de diseño que han de ser mejorados. A continuación se citan las conclusiones más relevantes de este proyecto.

- Debido a las discordancias entre los modelos matemáticos y los datos obtenidos experimentalmente. Ha sido necesario en varios proyectos alterar distintos componentes de la instalación para estudiar su comportamiento en mayor profundidad. En este TFG se presentó como variable el ángulo de la cámara cónica. Tras las pruebas realizadas, en los casos de agua y glicerina se ha constatado que la evolución del aerosol tanto radialmente como axialmente presenta leves diferencias en los SMD mostrados, por lo que no ha sido posible determinar que variante es mejor. No obstante, no han sido realizadas pruebas de velocidad del aerosol producido, las cuales podrían establecer diferencias en los distintos conos. Tampoco ha sido posible establecer una relación entre las distintas cámaras cónicas y el ángulo de salida del fluido nebulizado, que era el principal objetivo perseguido en el capítulo de toma de imágenes.

- Aunque en este proyecto todas las pruebas realizadas han sido introduciendo los fluidos con una cierta presión, el dispositivo sería capaz de funcionar mediante la succión generada por el vórtice. En proyectos anteriores ésta era la forma de trabajo pero como ya se comentó, los caudales comparados con los conseguidos introduciendo el fluido a presión en este proyecto eran minúsculos.

- Destaca el carácter novedoso del dispositivo. A pesar de las pocas publicaciones relativas a atomización de fluidos viscosos las existentes han sido revisadas y la información obtenida es la siguiente:

- Universidad de Twente, Holanda. Investigadores de esta universidad nebulizan glicerina pura combinando distintas configuraciones temperatura-presión. Los rangos de temperatura a los que calientan la glicerina son 60°C, 70°C, 80°C, 100°C bajo presiones de 10, 15, 20, 25, 30bar. Para el caso de 100°C y 30bar, el caudal que nebulizaban era de 3.38l/h y obtenían un SMD de 70µm.

- Universidad de Lisboa, Portugal. En esta ocasión la glicerina era mezclada con gas natural e hidrógeno para facilitar la combustión y además era calentada a una temperatura de 80 °C. Bajo estas condiciones y utilizando caudales de mezcla de componentes descrita anteriormente, los SMD obtenidos superaban en los mejores casos las 25µm.

Tras esta revisión de artículos publicados por otros grupos de investigación los resultados obtenidos en este proyecto son más que prometedores. Es importante recordar que en este TFG la glicerina no ha sido calentada, siendo la temperatura a la que se atomizaba aproximadamente de 20°C. Tampoco han sido utilizados otros líquidos ni aditivos con el fin de disminuir su viscosidad o facilidad de combustión.

En comparación con los resultados extraídos de las publicaciones en este texto, como ya ha sido mostrado, para un caudal de glicerina de 10l/h utilizando 30m³/h de aire y presión 5 bares, se obtiene un SMD por debajo de 20μm en los tres ángulos de cono disponibles. En la configuración con cono de 30° el SMD desciende hasta 13μm.

EQUIPO INVESTIGACIÓN	SMD[μm]
Universidad Zaragoza-LIFTEC	13,37
Twente, Holanda	70
Lisboa, Portugal	>25

- Se ha comprobado, tal y como se demostró en el capítulo de optimización, que las pruebas realizadas con el producto hidrófobo no conllevan una desaparición de los tamaños de partícula mayores, cuya aparición se pensaba que en cierta medida estaba directamente relacionada con las gotas que, debido a la tensión superficial quedaban pegadas a la placa inferior y que posteriormente se precipitaban sobre el aerosol producido. En trabajos posteriores se estudiará más en detalle la zona de interacción aire-fluido, realizando, si es necesario, mejoras en diseño para eliminar las partículas de mayor tamaño que persisten.

- La gran relación del tamaño medio de partícula y el parámetro adimensional ALR, siendo no tan acusado para el caso de glicerina, en la que intervienen otros factores como el número de Weber o el de Reynolds.

- Se ha detectado una importante caída de presión en el sistema de admisión del fluido a nebulizar. Se va a modificar el diseño estableciendo 4 entradas para fluido a nebulizar al dispositivo. De esta forma no solamente disminuimos la pérdida de carga existente en el diseño actual sino que también, para el caso de agua disminuimos considerablemente el número de Reynolds, que en los casos de mayor caudal era superior a 3000, estando por tanto en la zona de transición laminar-turbulento.

- El nebulizador, tal y como se esperaba para caudales de fluido a atomizar y mayores de aire, genera un SMD menor. Este comportamiento es menos acentuado para el caso de utilizar glicerina, presentando para los caudales de aire menores filamentos. Dos de los fenómenos que afectan a la evolución del fluido como son la coalescencia y la rotura secundaria están presentes de manera distinta dependiendo del fluido a nebulizar. Atomizando agua la coalescencia tiene una mayor influencia. La existencia de una gran cantidad de partículas ya de pequeño tamaño dificulta su ruptura en partículas aún menores pero aquellas que tienen una velocidad relativa similar si pueden juntarse y formar gotas de mayor tamaño. Para el caso de la glicerina, dada su mayor dificultad para producir su rotura junto con una gran acumulación de fluido a la salida de la boquilla, es en esta interacción a la salida y por debajo dónde se produce una importante rotura de partículas grandes o filamentos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. Gañán-Calvo (1998). Generation of steady liquid microthreads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams. *Phys. Rev. Letter*, 80, 285, 1998.[Online] . Disponible en:
http://prl.aps.org/abstract/PRL/v80/i2/p285_1.
- [2] B. Almagro Fernández (Mayo 2008). Desarrollo de nebulizadores neumáticos basados en la tecnología Flow Focusing y Flow Blurring para su uso en técnicas analíticas basadas en plasma de acoplamiento inductivo. [Online]. Disponible en:
http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/11457/1/Tesis_Almagro.pdf.
- [3] SGITT-OTRI, Universidad de Alicante (2007). Nebulizador de alta eficiencia para introducir muestras en aplicaciones de plasma [Online]. Disponible en:
<http://sgitt-otri.ua.es/es/empresa/documentos/nebulizador.pdf>.
- [4] G. Grindlay Lledó (Febrero 2003). Aplicación de las microondas a la desolvatación de soluciones orgánicas en ICP-AES. [Online]. Disponible en:
<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/13422>.
- [5] L. Bayvel, Z. Orzechowsky (1993). Liquid Atomization.
- [6] O.Rojas G., *Introducción a la reología*, S520-B Apuntes de clase, Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Química, 1999. [Online]. Disponible en:
<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S520B.pdf>.
- [7] D.S. Viswanath, T.K. Ghosh, D.H.L. Prasad, N.V. K. Dutt, K.Y.Rani, (2007). Viscosity of liquids. Theory, Estimation, Experiment, and Dat). [Online]. Disponible en:
<http://www.springer.com/materials/mechanics/book/978-1-4020-5481-5>.

- [8] J. Rosell-Llompart, A. M. Gañan Calvo (Marzo 2008). Turbulence in pneumatic flow focusing and flow blurring regimes. *Physical Review*. [Online] Vol. 77, 036321. Disponible en: <http://pre.aps.org.focus.lib.kth.se/abstract/PRE/v77/i3/e036321>.
- [9] M. Frías, M. P. De Luxan y M. I. Sanchez de Rojas (Septiembre 1988). Espectrometría de difracción por rayos láser. [Online]. Disponible en: <http://digital.csic.es/handle/10261/39545>
- [10] A. Ettiernot y H. Ferrazzini. Análisis para determinar la calidad de una aeroaplicación. [Online]. Disponible en : [http://www.mgap.gub.uy/dgss\[10\]/divanalisisdiagnostico/documentosDAYD/ANALISIS_DETERM_CALIDAD_AEROAPL.pdf](http://www.mgap.gub.uy/dgss[10]/divanalisisdiagnostico/documentosDAYD/ANALISIS_DETERM_CALIDAD_AEROAPL.pdf).
- [11] Proyecto de fin de carrera, Alberto Blasco Sanz, “Diseño de nebulizador para aceite tipo vórtice”, realizado en la universidad de Zaragoza en Mayo del 2012.
- [12] Tesis doctoral, José Luis Santolaya Sáenz, “Estudio experimental del spray de aceite usado generado por un atomizador de presión con rotación”, realizado en la Universidad de Zaragoza en Marzo de 2004.
- [13] Proyecto fin de grado, Hector Larred, “Influencia de la viscosidad y parámetros geométricos en atomizadores vórtice-Venturi”, realizado en la universidad de Zaragoza en 2014.
- [14] Leboucher, N., Roger, F., Carreau, J.L., Claverie, A., 2009, 11th Int. Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, paper 162.
- [15] P.Queiros,N.Costa,R.H.Carvalho. Co-combustion of crude glycerin with natural gas and hydrogen
- [16] J.L.H.P. Sallevelt ↑, A.K. Pozarlik, G. Brem. Characterization of viscous biofuel sprays using digital imaging in the near field región

ANEXOS

ANEXO I: TABLAS DE VALORES.

-Tabla succión (mbar) con el cono de 30° con agua

[m ³ /h] aire	11mm	12mm	13mm	14mm	15mm
10	4,3	3,5	3,9	2	1,1
15	13,4	11,6	11,3	5,9	4,4
20	31,3	33,5	32,5	18,7	16,5
25	59	68,8	73	46,9	43,2
30	121,2	140,7	148	117,3	104,9
35	177,4	188	192	147,8	156,6

-Tabla succión (mbar) con el cono de 45° con agua

[m ³ /h] aire	11mm	12mm	13mm	14mm	15mm
10	-5,9	-2,6	-1,7	-1,3	-3,3
15	1,9	3,4	4,2	2,5	-0,8
20	31,9	21,5	29,1	21,5	10,9
25	108,7	71,5	109	65	57,1
30	124,6	150	157	129	118,3
35	166	195	204	180,2	173,4

-Tabla succión (mbar) con el cono de 60° con agua

[m ³ /h] aire	11mm	12mm	13mm	14mm	15mm
10	4,2	3,8	4,4	2,7	1,6
15	15,7	15,8	15,8	11,3	5,9
20	41,3	37,4	42,1	32,6	15,4
25	71,9	76,2	79,4	57,8	41,6
30	160	166,7	157,2	136,8	117,2
35	195	214	214	201	188,4

-Valores SMD cono 45° a 4cm con agua

agua l/h	10 m ³ /h aire 4 cm	20 m ³ /h aire 4 cm	30 m ³ /h aire 4 cm
10	49,04	12,42	5,16
20	63,75	17,52	7,79
30	70,58	21,93	11,04
40	127,56	26,93	13,1
50	187,55	32,18	15,36
60	217,76	33,64	17,16

-Valores SMD cono 45° a 8cm con agua

agua l/h	10 m ³ /h air 8 cm	20 m ³ /h air 8 cm	30 m ³ /h air 8 cm
10	67,4	21,53	10,59
20	59,62	21	11,21
30	68,11	25,97	15,64
40	101,87	31,49	17,81
50	102,91	30,33	20,51
60	133,7	118,6	21,16

-Valores SMD cono 45° a 12cm con agua

agua l/h	10 m ³ /h aire 12 cm	20 m ³ /h aire 12 cm	30 m ³ /h aire 12 cm
10	52,8	19,79	8,43
20	66,29	28,69	13,08
30	81,46	32,96	20,08
40	87,02	38,7	23,69
50	108,31	35,99	25,71
60	136,01	40,96	30,97

-Valores SMD cono 45° a 4, 8,12cm con agua

agua l/h	30 m ³ /h aire 4 cm	30 m ³ /h aire 8 cm	30 m ³ /h aire 12 cm
10	5,16	10,59	8,43
20	7,79	11,21	13,08
30	11,04	15,64	20,08
40	13,1	17,81	23,69
50	15,36	20,51	25,71
60	17,16	21,16	30,97

-Valores SMD para los tres conos con 30m³/h de aire y 10l/h de agua en dirección axial.

distancia orificio[cm]	SMD 30º	SMD 45º	SMD 60º
2	5,24	4,94	4,6
4	5,32	5,8	4,93
6	5,42	6,46	5,13
8	5,44	7,39	6,44
10	6,87	7,51	6,79
12	6,73	9,19	6,68
14	7,41	8,78	7,41
16	7,02	9,99	6,93
18	7,16	10,14	8,07
20	7,36	9,84	7,88
22	7,67	9,76	8,08

- Valores SMD para los tres conos con 30m³/h de aire y 10l/h de agua en dirección radial.

Radio (cm)	30º	45º	60º
-8	29,87	25,38	35,32
-7	25,95	22,59	35,92
-6	23,04	18,5	33,98
-5	22,29	16,09	23,38
-4	17,94	13,42	22,13
-3	13,89	11,38	15,89
-2	11,45	8	13,85
-1	8,93	7,19	12,53
0	9,76	6,77	13,2
1	12,59	8,33	11,07
2	14,33	8,4	13,25
3	18,81	9,76	15,48
4	23,07	13,23	19,65
5	20,64	16,14	27,67
6	25,13	20,9	34,1
7	32,44	18,08	36,85
8	30,11	19,58	33,55

-Valores SMD cono 45° a 4cm con glicerina.

glicerina l/h	10 m ³ /h aire 4 cm	20 m ³ /h aire 4 cm	30 m ³ /h aire 4 cm
5	254,23	17,4	14,15
10	300,77	36,59	21,2
15	314,09	65,34	29,21
20	337,89	101,28	36,68
24	450,95	126,66	44,69

-Valores SMD cono 45° a 8cm con glicerina.

glicerina l/h	10 m ³ /h aire 8 cm	20 m ³ /h aire 8 cm	30 m ³ /h aire 8 cm
5	259,3	14,62	12,17
10	334,98	24,5	16,9
15	283,85	47,19	21,32
20	279,53	59,18	24,78
24	684,17	74,74	26,54

-Valores SMD cono 45° a 12cm con glicerina.

glicerina l/h	10 m ³ /h aire 12 cm	20 m ³ /h aire 12 cm	30 m ³ /h aire 12 cm
5	545,7	19,04	12,38
10	172,86	25,87	17,57
15	129,03	47,46	22,09
20	111,65	43,51	25,29
24	118,98	59,15	29,87

- Valores SMD cono 45° a 4, 8,12cm con glicerina.

glicerina l/h	10 m ³ /h aire 12 cm	20 m ³ /h aire 12 cm	30 m ³ /h aire 12 cm
5	545,7	19,04	12,38
10	172,86	25,87	17,57
15	129,03	47,46	22,09
20	111,65	43,51	25,29
24	118,98	59,15	29,87

-Valores SMD para los tres conos con 30m³/h de aire y 10l/h de glicerina en dirección axial.

Z (cm)	30º	45º	60º
2	42,1	28,8	35,78
4	27,78	21,32	22,91
6	19,79	17,72	17,18
8	17,15	17,2	16,46
10	16,16	17,34	16,9
12	15,72	15,98	18,52
14	15,25	16,97	18,05
16	15,21	17,13	18,04
18	15,07	16,59	18,17
20	15,74	16,9	18,7
22	15,94	16,16	19,07

- Valores SMD para los tres conos con 30m³/h de aire y 10l/h de glicerina en dirección radial.

Radio (cm)	30º	45º	60º
-8	29,87	25,38	35,32
-7	25,95	22,59	35,92
-6	23,04	18,5	33,98
-5	22,29	16,09	23,38
-4	17,94	13,42	22,13
-3	13,89	11,38	15,89
-2	11,45	8	13,85
-1	8,93	7,19	12,53
0	9,76	6,77	13,2
1	12,59	8,33	11,07
2	14,33	8,4	13,25
3	18,81	9,76	15,48
4	23,07	13,23	19,65
5	20,64	16,14	27,67
6	25,13	20,9	34,1
7	32,44	18,08	36,85
8	30,11	19,58	33,55

-Porcentajes en volumen por debajo de un tamaño en los distintos conos a 8cm.

30º	8cm	45º	8cm	60º	8cm
PORCENTAJE[%]	TAMAÑO[μm]	PORCENTAJE[%]	TAMAÑO[μm]	PORCENTAJE[%]	TAMAÑO[μm]
5,87	5	6,9	5	6,12	5
12,66	10	14,93	10	12,96	10
19,92	15	23,48	15	19,98	15
26,41	20	31,11	20	26,19	20
32,75	25	38,44	25	32,54	25
37,41	30	43,74	30	37,84	30
55,83	50	62,57	50	57,27	50
77,13	100	82,09	100	85,63	100

-Porcentajes en volumen por debajo de un tamaño en los distintos conos a 12cm.

30º	12cm	45º	12cm	60º	12cm
PORCENTAJE[%]	TAMAÑO[μm]	PORCENTAJE[%]	TAMAÑO[μm]	PORCENTAJE[%]	TAMAÑO[μm]
6,68	5	6,07	5	7,12	5
13,54	10	13,66	10	15,14	10
20,36	15	22,47	15	23,33	15
26,35	20	30,9	20	30,18	20
32,61	25	39,64	25	36,8	25
37,18	30	45,53	30	40,56	30
53,27	50	63,49	50	57,67	50
71,48	100	84,27	100	74,27	100

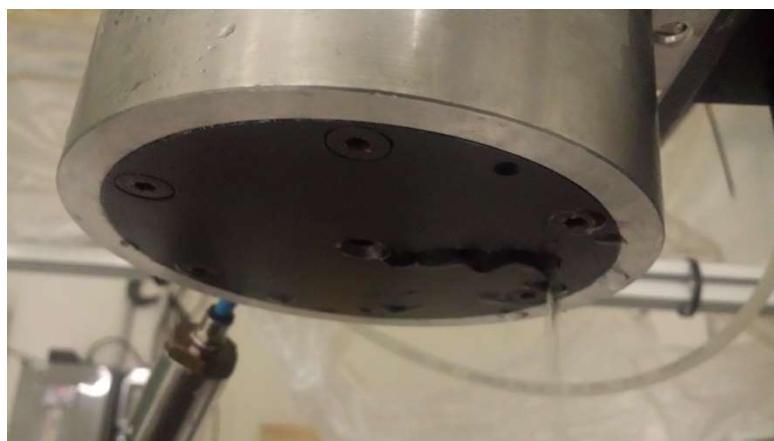
ANEXO II: DETALLES PRODUCTO HIDRÓFBO

-Producto hidrófobo comprado.



-Placa base antes y después de aplicar el producto hidrófobo.





ANEXO III: INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DIFRACTÓMETRO.

Para medir la distribución del tamaño de gotas se ha utilizado un difractómetro láser, en concreto el modelo Spraytec de Malvern Instruments. Esta técnica, empleada para la medida del tamaño de las gotas y su distribución estadística, se basa en la difracción de un haz de luz láser por la nube de gotas. El patrón de difracción depende del tamaño de gota, de modo que para gotas menores, la luz se difracta con ángulos mayores. De este modo puede medirse la distribución de tamaños de cualquier tipo de partículas de una fase (sólida o líquida) en otra (líquida o gaseosa) de modo repetible y fiable; aunque no da información puntual sobre cada una de las partículas. Los requisitos de esta técnica son que cada fase debe ser distinta ópticamente de la otra; y que el medio de suspensión de las partículas debe ser transparente para la longitud de onda del haz de luz láser. Esto significa, en la práctica, que el índice de refracción de las partículas a medir debe ser diferente al del medio en el cual se encuentran en suspensión.

El dispositivo de medida está formado por una unidad emisora, en este caso un láser de diodo de 5 mW, longitud de onda de 670 nm y 10 mm de diámetro de haz colimado, y una unidad de recepción, enfrentada al haz láser, compuesta por una serie de detectores en anillo que recogen la luz difractada por las gotas o partículas iluminadas por el haz láser mediante una lente de focal adecuada sin formar previamente una imagen de la partícula a medir sobre el detector. El volumen de medida del flujo a analizar debe estar localizado entre las dos unidades, a una distancia de la lente colectora menor que la distancia focal, para que no se forme imagen en el plano de detección. La estructura esquemática del equipo es la que se muestra en la Figura 5. Para las presentes medidas, el difractómetro se ha equipado con una lente colectora de 450 mm de focal lo que permite medir gotas en un rango comprendido entre 2,25 μm y 850 μm .

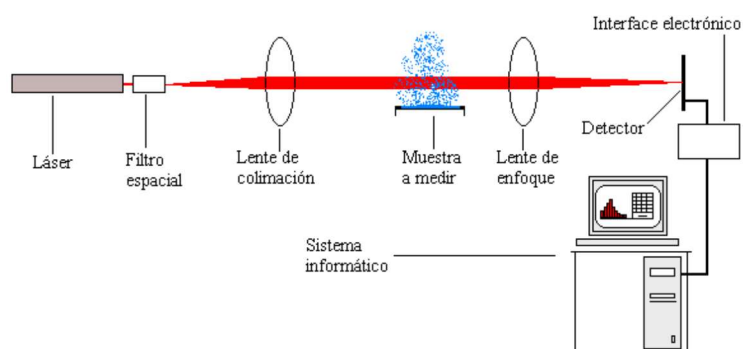


Imagen 10: Difractómetro utilizado

Durante una medida individual, las señales recopiladas en los anillos detectores son digitalizadas en orden consecutivo, y almacenadas en el ordenador para ser promediadas con las señales de la siguiente medida. En terminología técnica, a las

medidas individuales se les conoce como “barrido”. Normalmente, se toman los datos durante unos miles de barridos para asegurar que la estadística es suficientemente buena por la gran cantidad de datos. Estos datos se procesan con la ayuda de un software específico para obtener los resultados, es decir, la distribución de tamaños de partículas. Este proceso se puede realizar a una frecuencia máxima de 2500 Hz.

Para obtener la distribución de tamaño de partículas a partir de las energías registradas por los detectores, primero se elimina el ruido de fondo y posteriormente, de acuerdo con los índices de refracción de las gotas y el medio continuo (en este caso agua ó glicerina y aire), se calcula teóricamente una distribución de gotas esféricas y se compara la distribución de energías que produciría en el detector con las medidas. El proceso se refina iterativamente.

Las clases de tamaños correspondientes a la lente de 450 mm son las siguientes:

Clase	Intervalo (μm)	Clase	Intervalo (μm)	Clase	Intervalo (μm)	Clase	Intervalo (μm)
1	0.25 – 0.29	16	1.99 – 2.28	31	15.81 – 18.15	46	125.74 – 144.38
2	0.29 – 0.33	17	2.28 – 2.62	32	18.15 – 20.85	47	144.38 – 165.79
3	0.33 – 0.38	18	2.62 – 3.01	33	20.85 – 23.94	48	165.79 – 190.36
4	0.38 – 0.43	19	3.01 – 3.45	34	23.94 – 27.49	49	190.36 – 218.59
5	0.43 – 0.50	20	3.45 – 3.97	35	27.49 – 31.56	50	218.59 – 251.00
6	0.50 – 0.57	21	3.97 – 4.55	36	31.56 – 36.24	51	251.00 – 288.20
7	0.57 – 0.66	22	4.55 – 5.23	37	36.24 – 41.61	52	288.20 – 330.92
8	0.66 – 0.75	23	5.23 – 6.01	38	41.61 – 47.78	53	330.92 – 379.98
9	0.75 – 0.86	24	6.01 – 6.90	39	47.78 – 54.86	54	379.98 – 436.31
10	0.86 – 1.00	25	6.90 – 7.92	40	54.86 – 63.00	55	436.31 – 500.99
11	1.00 – 1.14	26	7.92 – 9.10	41	63.00 – 72.33	56	500.99 – 575.26
12	1.14 – 1.31	27	9.10 – 10.44	42	72.33 – 83.06	57	575.26 – 660.53
13	1.31 – 1.51	28	10.44 – 12.00	43	83.06 – 95.37	58	660.53 – 758.46
14	1.51 – 1.73	29	12.00 – 13.77	44	95.37 – 109.51	59	758.46 – 870.89
15	1.73 – 1.99	30	13.77 – 15.81	45	109.51 – 125.74	60	870.89 – 1000.0

Tabla 2: Relación clases-tamaño partícula difractómetro.

Una vez conocida la distribución de gotas por clases de tamaños, cualquier otra información sobre diámetros medios del aerosol puede derivarse de ella mediante una manipulación numérica de los resultados volumétricos, suponiendo que las partículas son esféricas.

En general, las características de tamaño de un conjunto de gotas esféricas en un flujo bifásico suelen describirse estadísticamente por medio de la Función de Distribución, $f(D)$. Esta función, normalizada a la unidad, indica la probabilidad de que las gotas tengan un diámetro comprendido entre D y $D+dD$. En muchos casos, por simplicidad, resulta conveniente trabajar con un diámetro medio, en lugar de utilizar la función de distribución. Sin embargo, no existe un modo único de definir un diámetro medio. Con toda generalidad, se puede definir un diámetro que denominaremos D_{jk} mediante la fórmula:

$$(D_{jk})^{j-k} \equiv \frac{\int_0^{\infty} D^j f(D) dD}{\int_0^{\infty} D^k f(D) dD}$$

Según esta definición, D_{10} resulta ser la media aritmética de los diámetros, D_{20} representa el diámetro de una gota cuya superficie multiplicada por el número total de gotas es igual la superficie total del conjunto. Del mismo modo, D_{30} también denominado diámetro de volumen medio (VMD), es el diámetro de una gota cuyo volumen multiplicado por el número de gotas es igual al volumen total del líquido. Un diámetro muy utilizado es el denominado diámetro medio de Sauter (SMD) que corresponde al D_{32} , es decir, el diámetro de una gota cuya relación de volumen a superficie es igual a la del conjunto total de gotas. Este valor es especialmente significativo para casos en los que las gotas deben reaccionar con el fluido circundante (por ejemplo, en problemas de combustión). En este caso la reacción química sólo tiene lugar en la fase gas que por evaporación envuelve a la superficie de las gotas, por lo que la relación volumen/superficie influye de forma determinante en la eficiencia de la reacción. A partir de medidas discretas, los diámetros medios pueden calcularse de acuerdo con la fórmula discretizada.

$$(D_{jk})^{j-k} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i D_i^j}{\sum_{i=1}^n n_i D_i^k}$$

Donde n_i representa el número de gotas con diámetros D_i y donde hemos sustituido $f(D_i)$ por el equivalente discreto n_i/N siendo N el número total de gotas del aerosol.

De este modo, el SMD se obtendría con la siguiente expresión:

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i D_i^2}$$

Hay que tener en cuenta que, dependiendo de los instrumentos utilizados, a veces las medidas no proporcionan directamente estadística en número de gotas para un diámetro determinado, sino en el volumen de fluido que constituye gotas de dicho diámetro. Según esto, a veces se habla de estadísticas en número o en volumen. En concreto, el difractor Malvern Spraytec utilizado en este estudio y que se describe a continuación, proporciona estadísticas en volumen. En su versión discreta, la fórmula utilizada para calcular diámetros medios para estadísticas en volumen sería:

$$(D_{jk})^{j-k} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i D_i^j}{\sum_{i=1}^n v_i D_i^k}$$

Donde v_i representa el volumen de fluido en gotas de diámetro D_i y donde ahora $f(D_i)$ se ha sustituido por v_i/V siendo V el volumen total de líquido (nótese que $V=N \cdot D_{n30}$). Para pasar de un tipo de estadística al otro sólo hay que tener en cuenta que:

$$n_i = \frac{6}{\pi} \frac{V_i}{D_i^3}$$

Por lo tanto, el SMD puede también calcularse como:

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^v v_i}{\sum_{i=1}^v \frac{v_i}{D_i}}$$

Evidentemente, la correlación entre diámetros medios volumétricos y numéricos no es directa. Aunque no es habitual, si calculamos un “diámetro D_{32} volumétrico”, D_{v32} según:

$$D_{v3} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n v_i D_i^2}$$

Pueden utilizarse también valores medianos, que dividan la distribución en dos partes iguales atendiendo al número de gotas, superficie total, volumen total, masa, etc. Este es el caso del diámetro mediano de masa (MMD) que establece el diámetro tal que una mitad de la masa del aerosol se distribuye en gotas de tamaño mayor y la otra mitad en gotas menores. Es también común calcular los deciles D (10%), D (50%) y D (90%) en volumen, es decir los diámetros tales que el 10%, 50% y 90% del volumen de líquido se incluye en gotas de diámetro menor que ellos. Aunque es mucho menos habitual, también podrían definirse de modo análogo percentiles en número de gotas. Con estos percentiles se puede definir una anchura de la distribución o Span como:

$$Span = \frac{D(90\%) - D(10\%)}{D(50\%)}$$

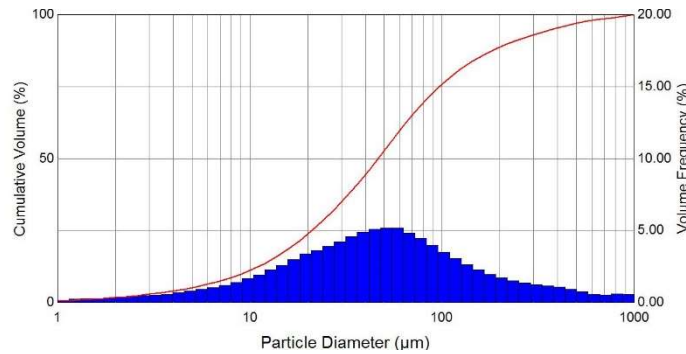
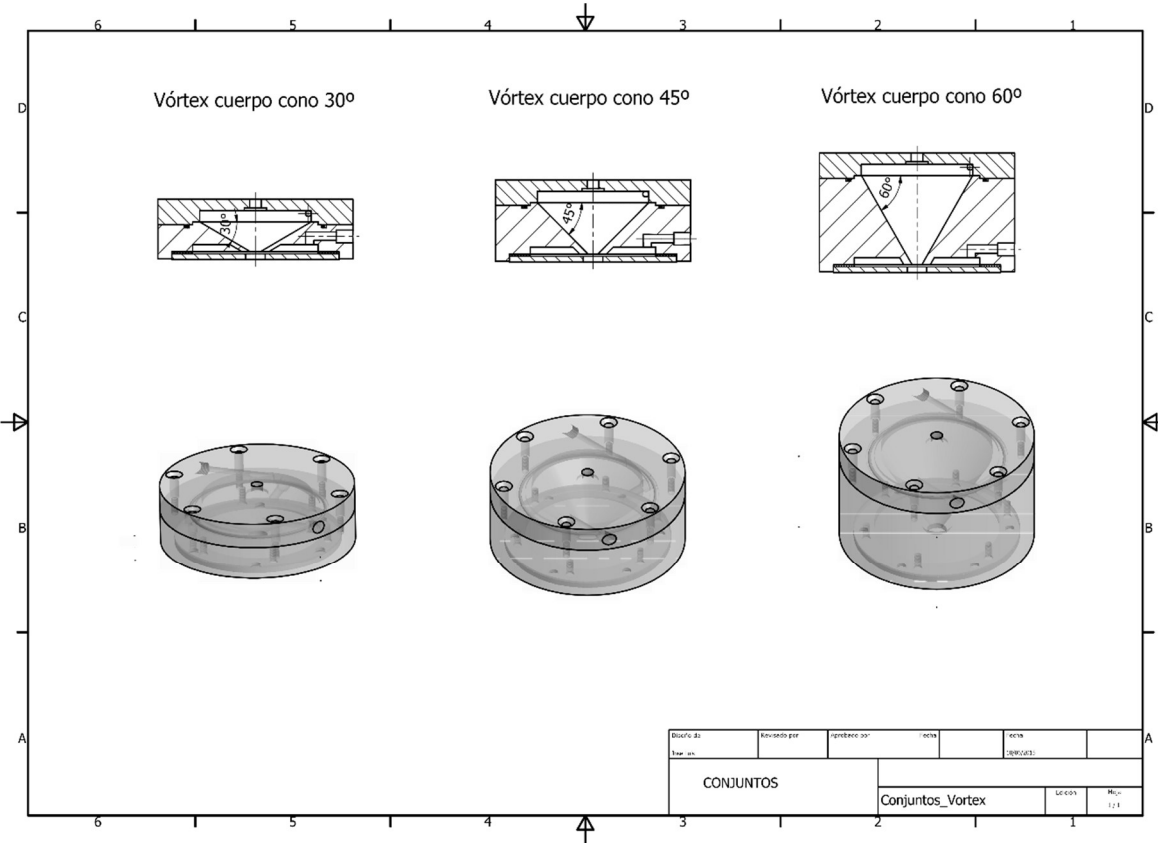
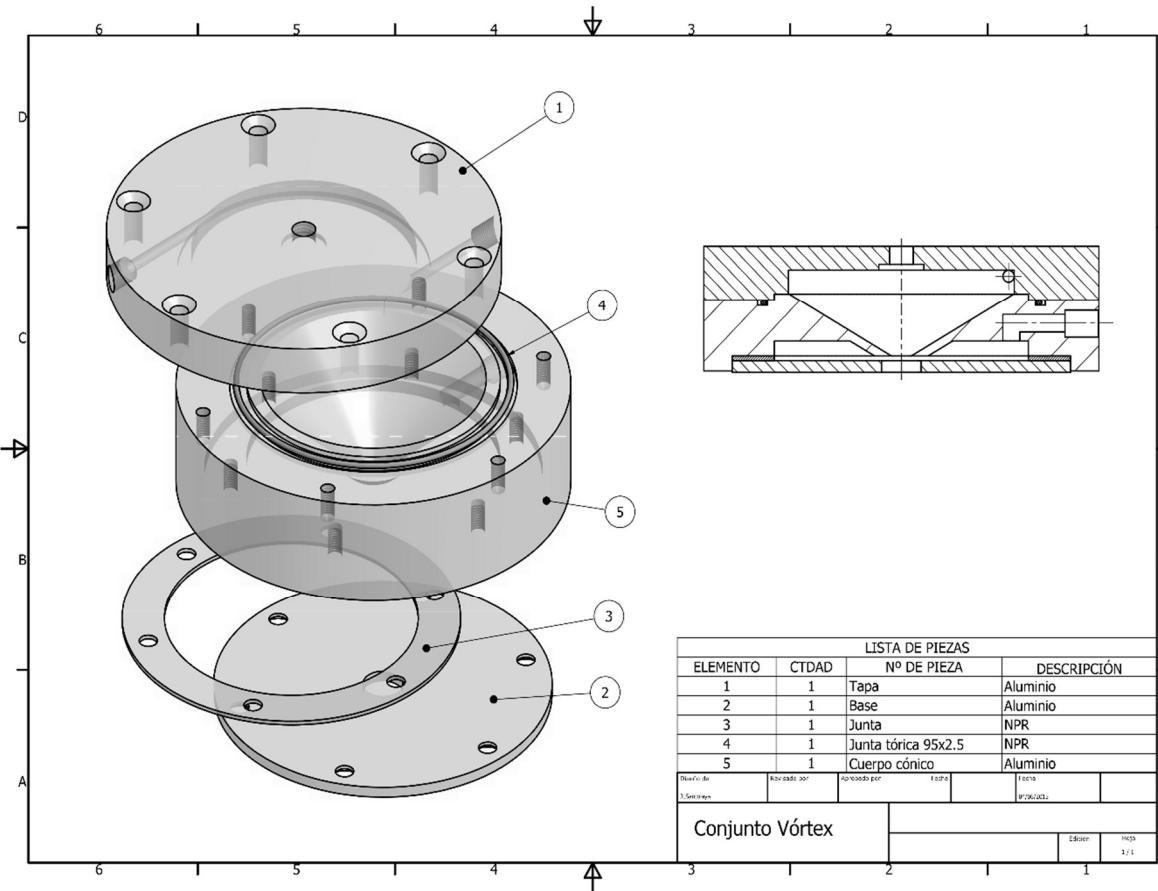
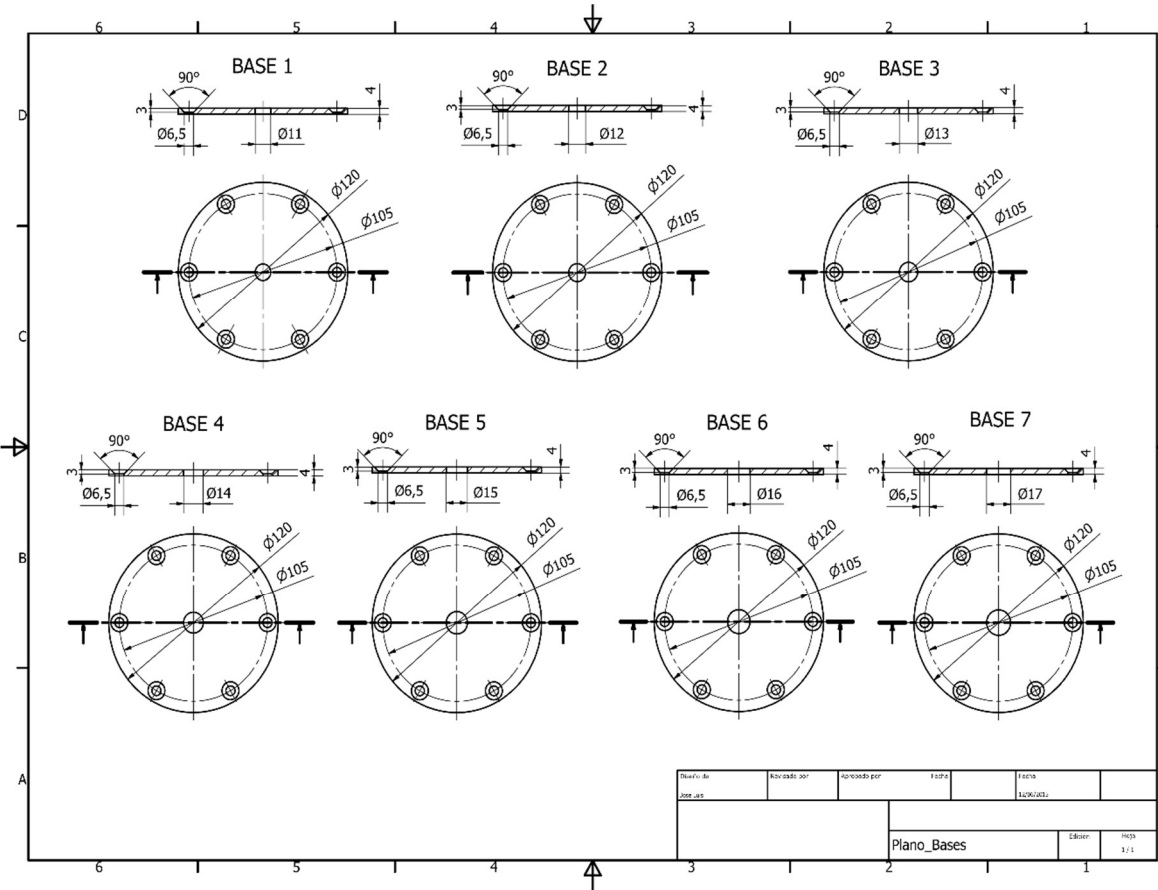


Imagen 9: Captura de imagen histograma generado por el software.

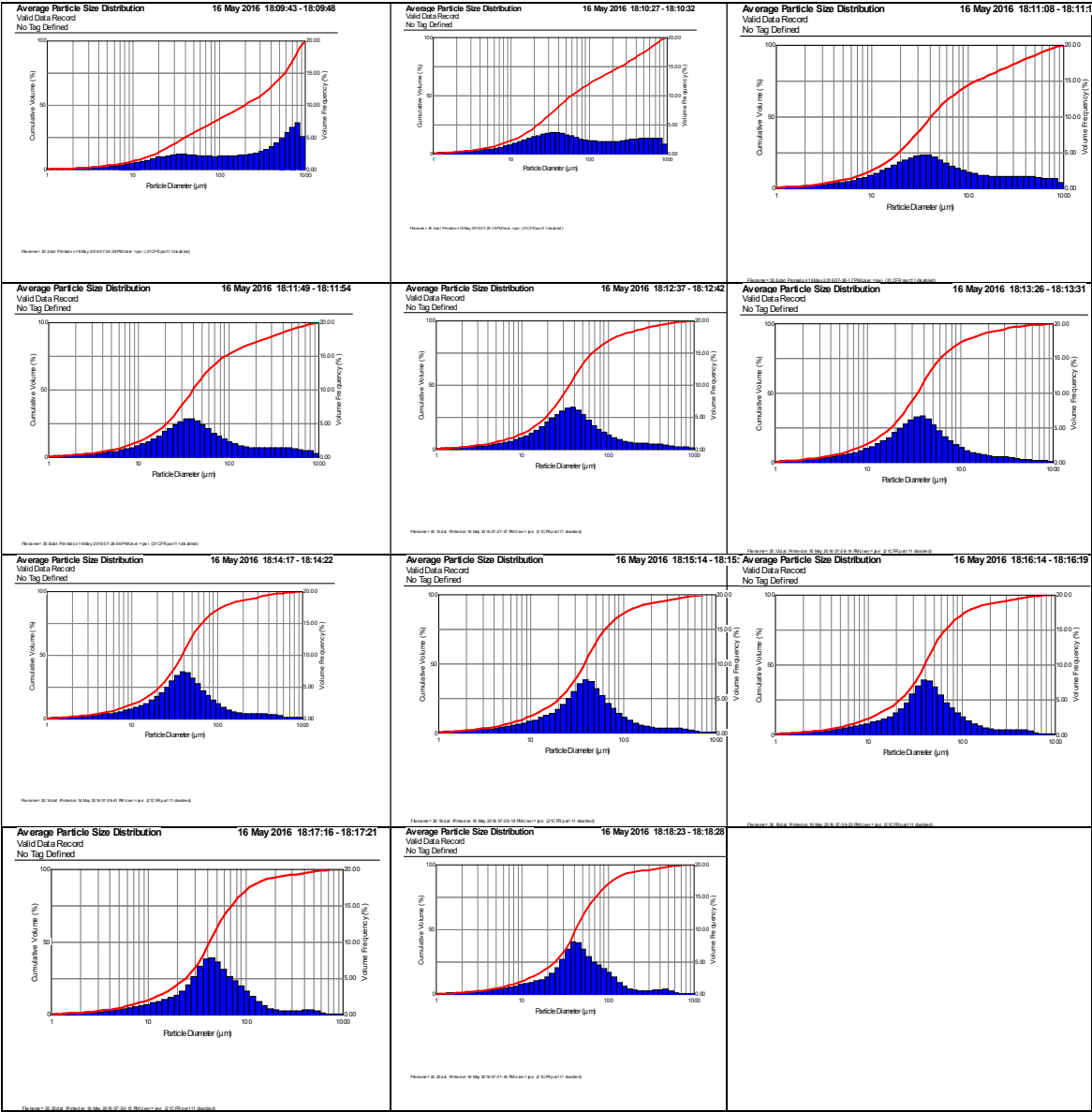
ANEXO IV: PLANOS ATOMIZADOR



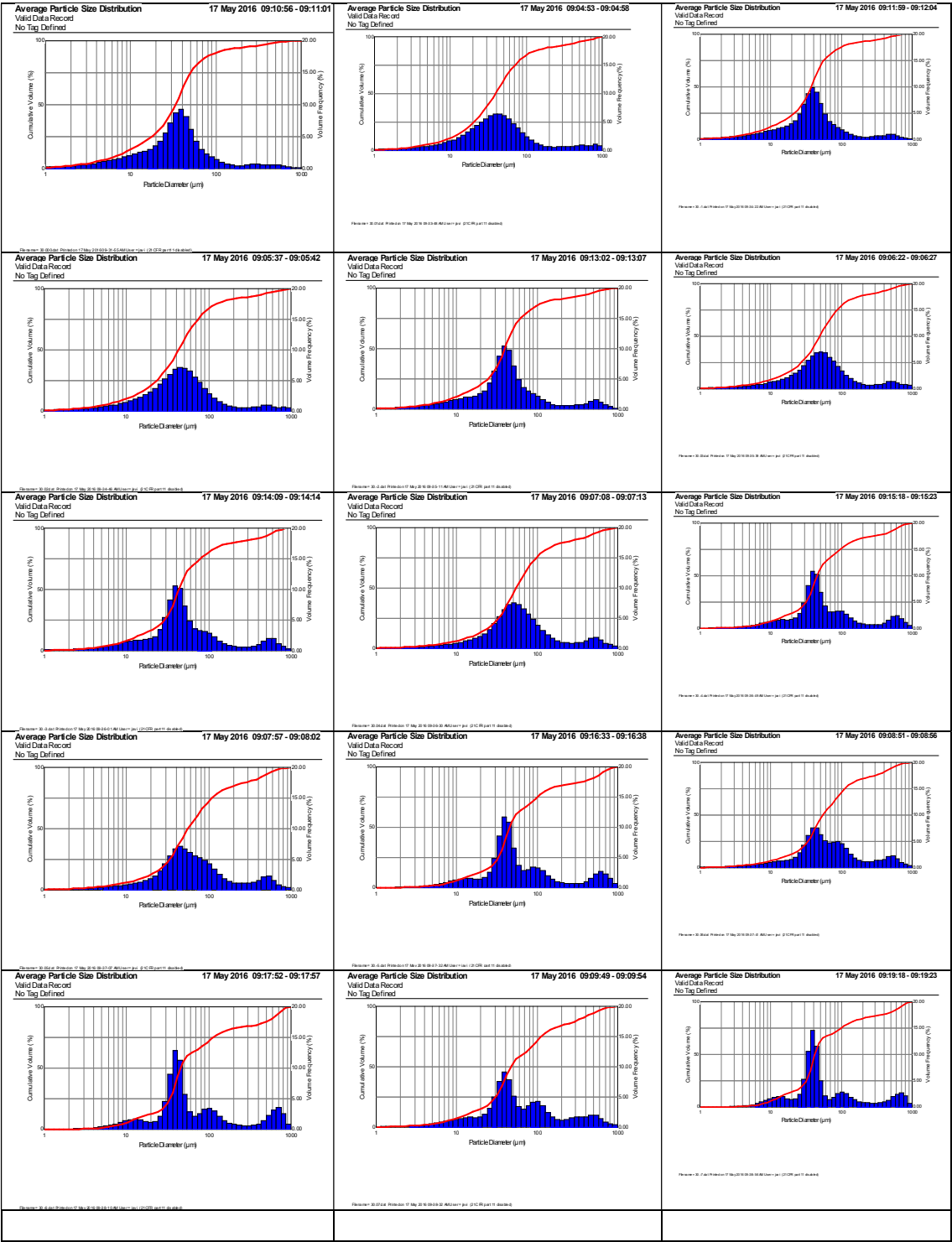


ANEXO V: HISTOGRAMAS DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES

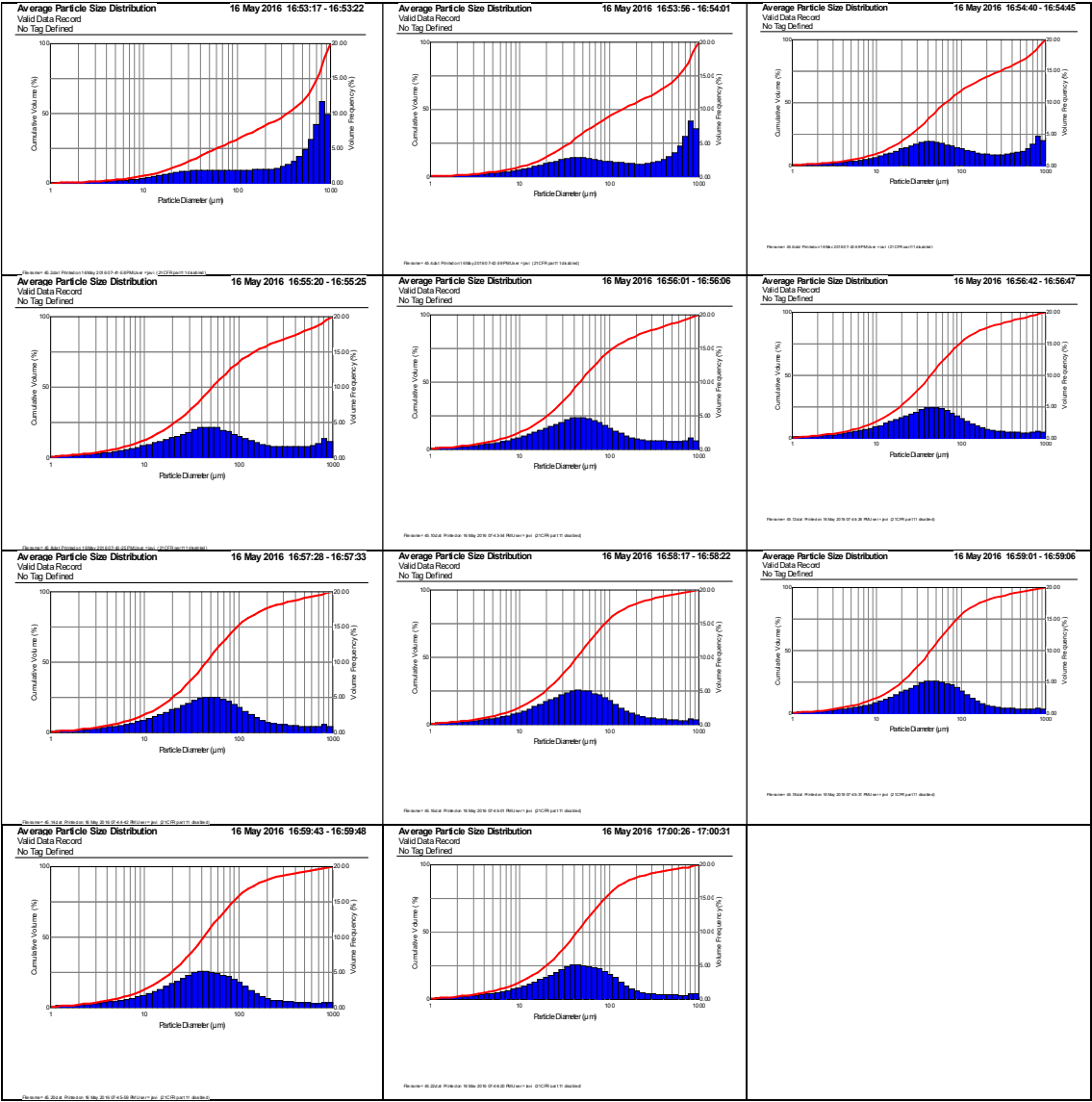
CONO 30°, EVOLUCIÓN AXIAL. GLICERINA 10 l/h Y 30 m³/h



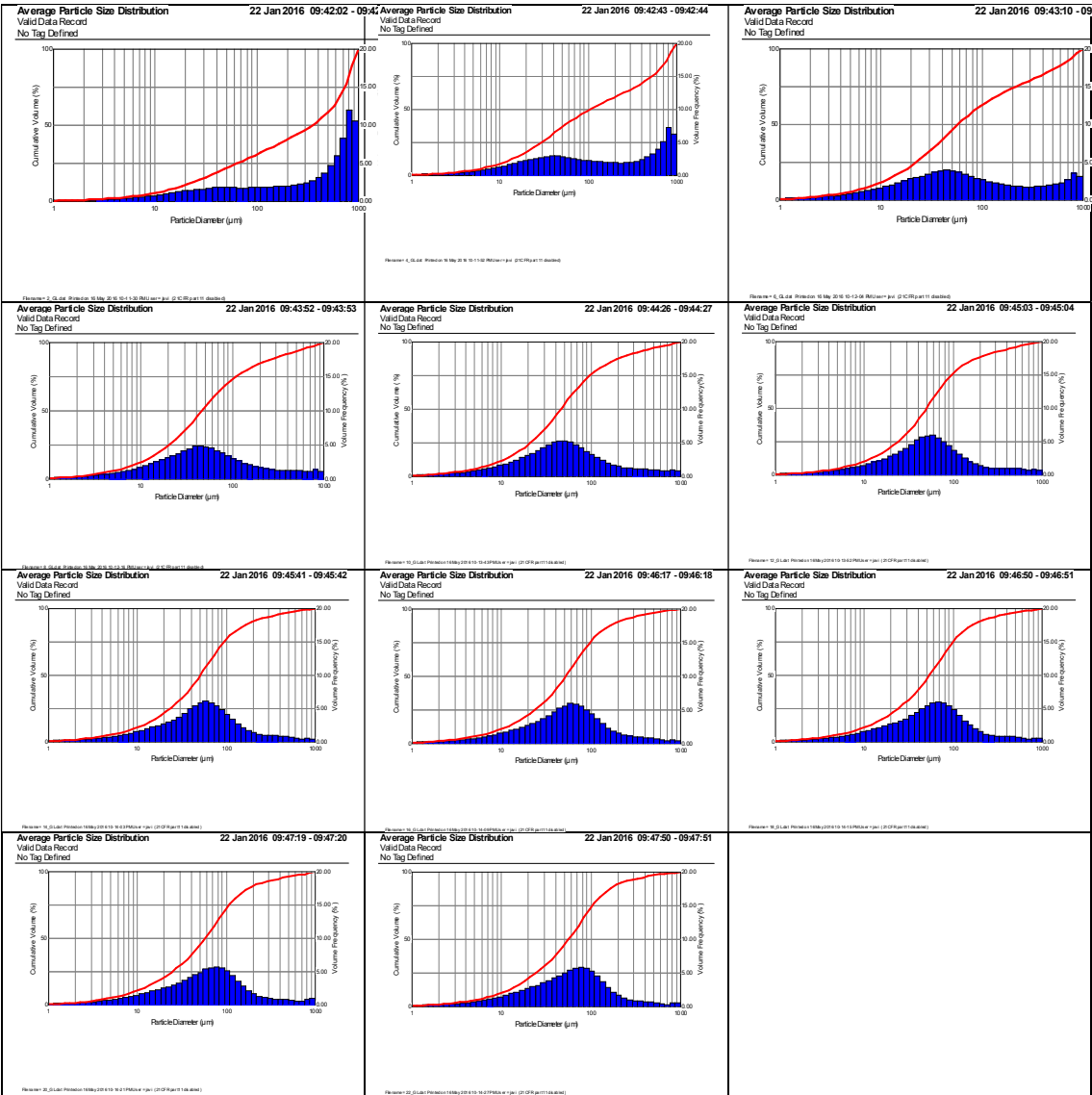
CONO 30°, EVOLUCIÓN RADIAL. GLICERINA 10 l/h Y 30 m³/h



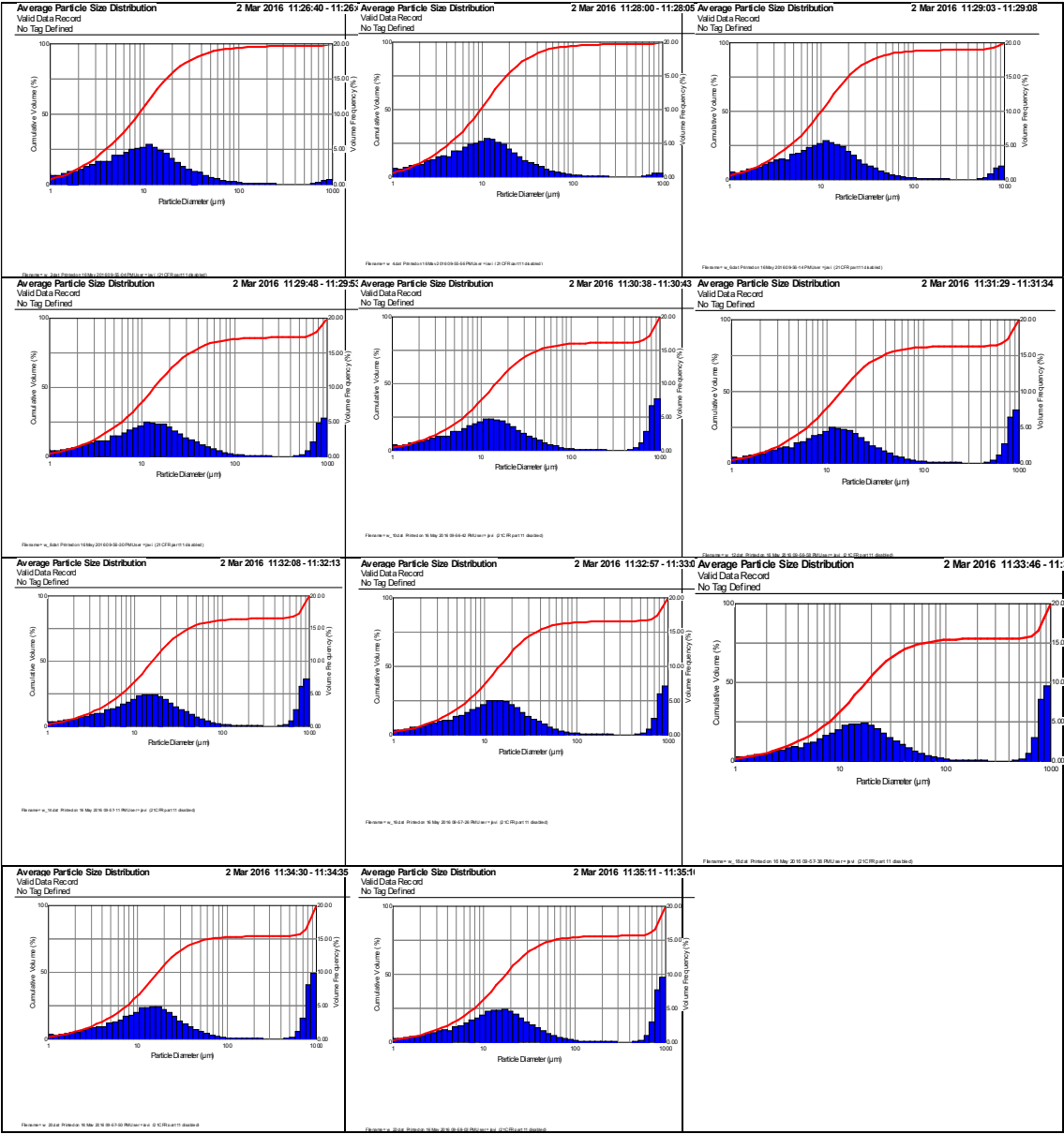
CONO 45°, EVOLUCIÓN AXIAL. GLICERINA 10 l/h Y 30 m³/h



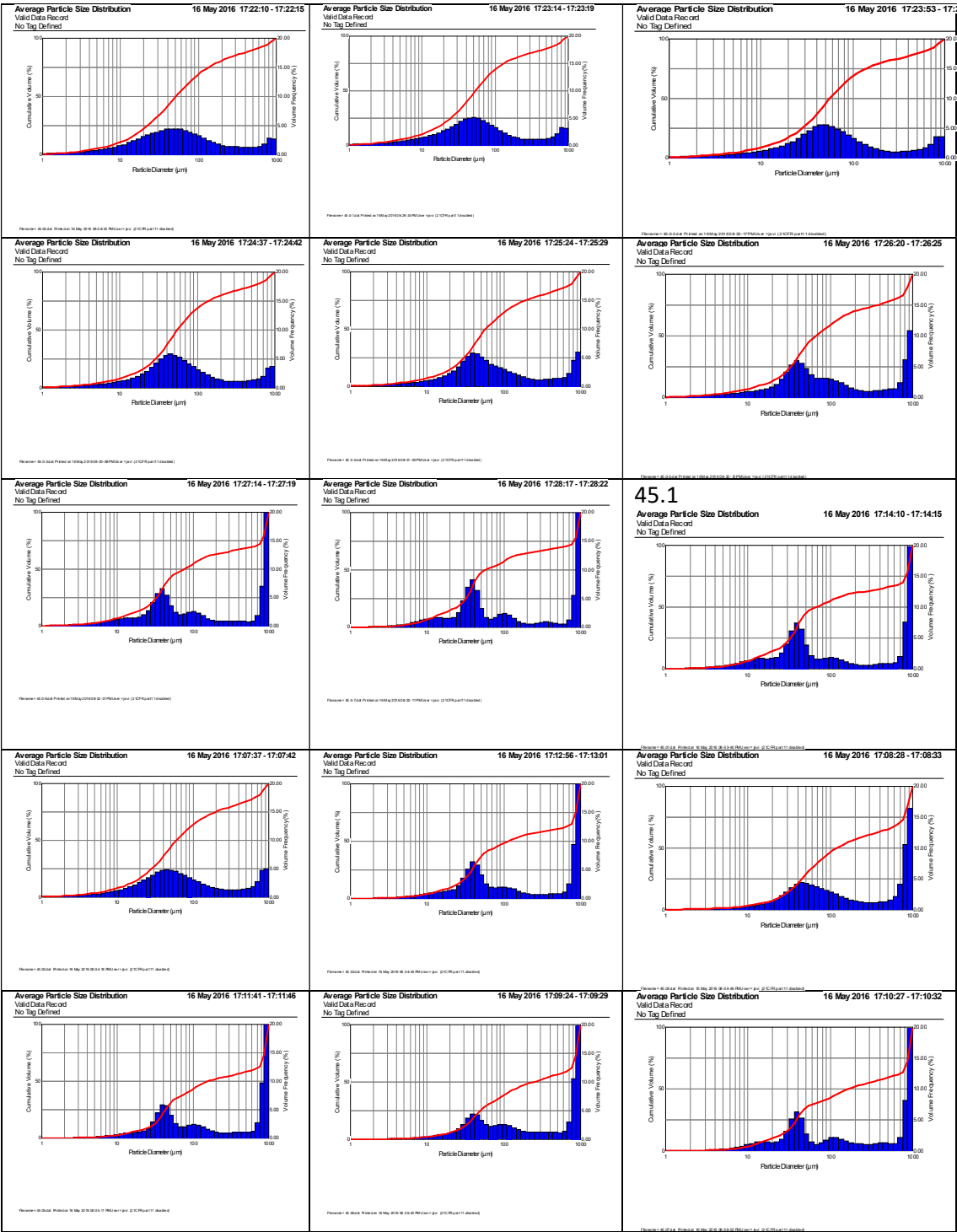
CONO 60°, EVOLUCIÓN AXIAL. GLICERINA 10 l/h Y 30 m³/h

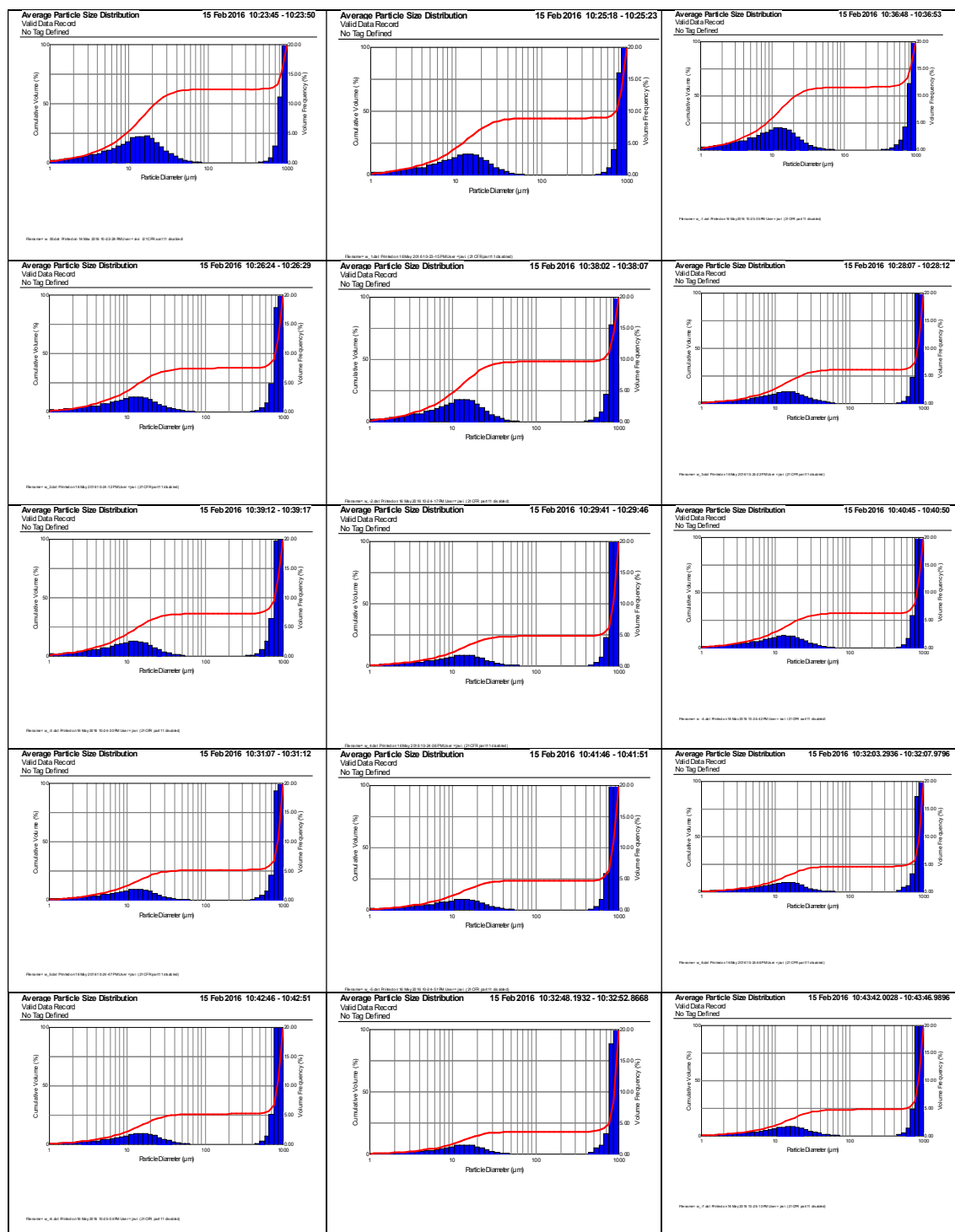


CONO 60°, EVOLUCIÓN AXIAL. AGUA 10 l/h Y 30 m³/h



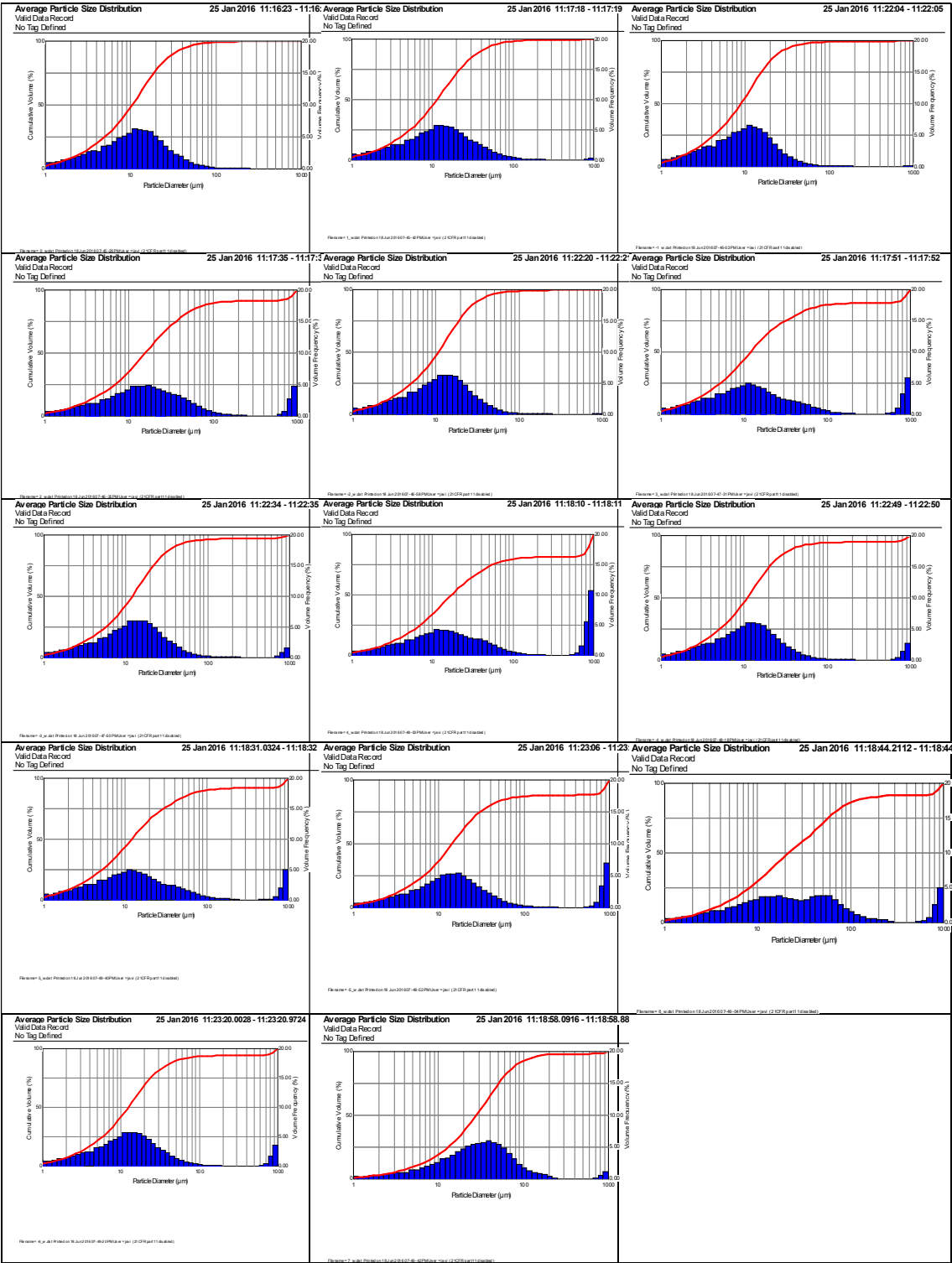
CONO 45°, EVOLUCIÓN RADIAL GLICERINA 10 l/h Y 30 m³/h







CONO 60 °, EVOLUCIÓN AXIAL. AGUA 10 l/h Y 30 m³/h



CONO 30°, EVOLUCIÓN AXIAL. AGUA 10 l/h Y 30 m³/h

