



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Caracterización del aerosol de glicerina generado
por un atomizador Venturi-Vórtice

Autor/es

Félix Jaime Anadón

Director/es

Juan Antonio García Rodríguez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

CARACTERIZACIÓN DEL AEROSOL DE GLICERINA GENERADO POR UN ATOMIZADOR VENTURI-VÓRTICE

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto es la caracterización experimental del aerosol de glicerina generado por un atomizador tipo Venturi-Vórtice. Se trata de obtener información de la atomización para líquidos viscosos que se consigue con estos dispositivos. Para ello se midió la velocidad y el diámetro de las gotas generadas en varias secciones transversales al eje del dispositivo con un PDA (Phase Doppler Anemometry).

El equipo de medida permite la medida local de las variables mencionadas en las gotas que atraviesan una pequeña zona del espacio (de dimensiones menores que el milímetro). Para obtener perfiles de las distintas variables en las secciones de medida se realizó un barrido con un sistema de desplazamiento.

Además de obtener los perfiles de diámetros y velocidades axiales medias en las secciones se estudió la correlación entre estas dos variables, así como otros parámetros estadísticos como la desviación típica de la velocidad.

Fue necesario ajustar los parámetros ópticos del sistema de medida y realizar un montaje para la ubicación de las maquetas y del sistema de medida en el sistema de desplazamiento. La parte principal del proyecto fue la adquisición de los datos mencionados y su análisis para la obtención de tendencias y evolución de las distintas variables.

El desarrollo del proyecto incluye una primera fase de acondicionamiento de la instalación experimental y de puesta a punto del equipo de medida. Posteriormente se realizaron las medidas ya resumidas y, finalmente, una fase de procesado y análisis de los resultados.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	4
1.1 Objetivo	5
1.2 Antecedentes	5
1.3 Descripción de capítulos	6
2. Equipos y métodos	7
2.1 Dispositivo Venturi-Vórtice	7
2.2 Instalación experimental	8
2.2.1 Circuito de aire comprimido	8
2.2.2 Instalación de atomización	10
2.2.3 Sistema de extracción	11
2.3 Sistema de medida	12
2.3.1 Medida de la velocidad	14
2.3.2 Medida del diámetro	14
2.3.3 Disposición óptica de medida.	15
3. Ensayos	18
3.1 Propiedades del fluido.....	19
3.2 Fases de un ensayo.....	20
4. Medidas y análisis.....	21
4.1 Análisis de velocidades.....	21
4.1.1 Comprobación de la simetría axial del flujo.	24
4.1.2 Correlación velocidad - diámetro	24
4.1.3 Desviación típica de la velocidad	27
4.2 Análisis de diámetros	30
4.2.1 Perfiles de concentración de partículas por clases	30
4.2.2 Fenómenos de ruptura y coalescencia	33
5. Conclusiones y trabajo futuro	35
 Bibliografía.....	 36
Anexos	37

1. Introducción

Hoy en día el uso de líquidos atomizados o esprays está muy extendido, sobre todo en aplicaciones industriales como combustión, pintura, sistemas de riego, sistemas de refrigeración, sistemas de transporte neumático... y en algunos otros campos como la medicina. Podemos encontrar ejemplos de ello en operaciones de combustión, donde la atomización del combustible contribuye en gran medida a una mayor eficiencia de la combustión además de a un ahorro de combustibles líquidos; procesos de humidificación mediante spray o procesos de secado por atomización, que son muy utilizados en numerosos procesos industriales, sobre todo en los de índole química.

La atomización es el proceso por el que se transforma un chorro o lámina de líquido en pequeñas gotas, que abarcan cierto rango de tamaños. Existen muchos tipos de atomizadores pero lo más común es que esto se produzca gracias a la acción de una corriente de gas (generalmente aire) que consiga vencer las fuerzas cohesivas del líquido estableciéndose una elevada velocidad relativa entre los dos flujos. En el caso de este proyecto se utilizó un atomizador de tipo Venturi-Vórtice.

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. En la parte central de dicho vórtice se genera una depresión que provoca que el fluido a atomizar sea absorbido desde un depósito inferior hacia el atomizador. A este efecto se le conoce como efecto Venturi.

El sistema 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 $5\text{ }\mu\text{m}$ y no se requieren presiones muy elevadas en el gas).

1.1 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización del aerosol de glicerina que es generado por un atomizador. Para ello se midieron mediante técnicas no intrusivas el diámetro de las partículas y la velocidad de las gotas generadas. Las medidas se realizan con un PDA que permite la medida local de las variables mencionadas. Para la caracterización de la estructura del aerosol se obtuvieron medidas a lo largo de secciones cercanas a la salida del dispositivo Venturi-Vórtice.

Previamente a la realización de la caracterización en sí, se tuvieron que completar las siguientes tareas: Diseño y montaje completo de la instalación de atomización, calibración y puesta a punto del sistema de medida y montaje del sistema de aire comprimido y el sistema de extracción de aire y líquido tras la atomización.

1.2 Antecedentes

El trabajo en este atomizador comienza en el Área de Mecánica de Fluidos a raíz de un contrato con una empresa para el diseño de un prototipo que permita la generación de niebla de aceite para transporte neumático.

Se constata que no hay datos experimentales sobre su comportamiento en revistas científicas internacional mientras que sí existen varias patentes para su uso en generadores de niebla. Dadas las posibilidades prácticas que presenta este tipo de atomizador se considera un estudio más detallado que permita por una parte la mejora del diseño y por otra caracterizar la estructura del aerosol para la mejora del diseño de las instalaciones que usen estos dispositivos, a modo de ejemplo: conocer la cinemática del aerosol permitirá mejorar el diseño de las geometrías por las que resultara más eficiente conducir la niebla de líquido.

El trabajo de este Proyecto Fin de Grado se enmarca la caracterización de la estructura del aerosol que se está llevando a cabo en el Área de Mecánica de Fluidos y aborda la obtención de datos experimentales de velocidad y diámetro de gotas usando uno de estos dispositivos con glicerina.

1.3 Descripción de capítulos

- En el apartado 2 de la presente memoria se exponen todos los equipos que han sido necesarios para la realización del proyecto, tanto para conseguir la atomización de la glicerina como para la toma de las medidas de velocidad y tamaño de las partículas del flujo.
- En el apartado 3 se describen brevemente las propiedades que posee el fluido a tratar y se explica el procedimiento seguido para realizar los ensayos.
- En el apartado 4 se muestran todas las variables calculadas a partir del programa de adquisición de datos, así como los resultados obtenidos en cuanto a correlaciones, tendencias, etc., explicados de forma justificada.
- En el apartado 5 se realiza una conclusión final a partir de todos los resultados obtenidos además comentar una serie de mejoras con respecto a futuras investigaciones de estos dispositivos.

2. Equipos y métodos

En este capítulo se van a exponer las diferentes partes de las que consta la instalación, así como los dispositivos y métodos utilizados para realizar las mediciones necesarias del fluido atomizado.

2.1 Dispositivo Venturi-Vórtice

El dispositivo que se utilizó para conseguir la atomización de la glicerina fue diseñado y fabricado hace unos años para otros ensayos experimentales. Este dispositivo está hecho de metacrilato y está formado por las piezas que aparecen en la figura 1:

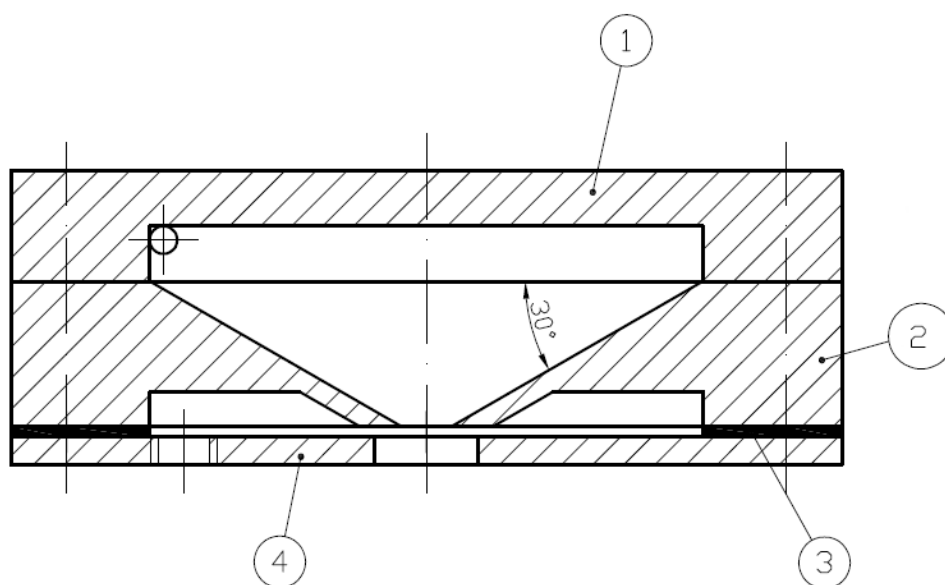


Figura 1. Sección del atomizador utilizado.

1. Tapa. Es la parte superior, por donde entra la corriente de aire a través de dos orificios colocados de forma tangencial.
2. Cuerpo. Se realizaron en su momento varios cuerpos con diferentes inclinaciones de la cavidad troncocónica interior. En este trabajo se hicieron las mediciones con el cuerpo de 30°.
3. Junta. Se sitúa entre el cuerpo y la base, y se utiliza para evitar fugas de líquido o de aire.

4. Base. Posee el orificio inferior alineado con la base inferior del cono del cuerpo por donde saldrá la corriente bifásica de glicerina y aire. Además por la parte inferior de la base se introduce a través de otro agujero roscado el fluido a atomizar

La interacción entre glicerina y aire se produce en el espacio existente entre el final de la cavidad cónica y el orificio de salida de la base.

Debido a que cuando se hicieron pruebas con el atomizador se comprobó que seguía habiendo fugas de aire pese a la junta, se creyó conveniente reemplazar ésta por una plastilina que selló el cuerpo y la base de forma más eficiente.

Además se probaron varias bases disponibles, cuya única diferencia entre sí era el diámetro del orificio de salida. Se realizaron pruebas con bases con el orificio de salida de 18, 14 y 12 mm de diámetro y se comprobó que la que mejor funcionaba era la del orificio de menor tamaño, es decir, la de 12 mm, por lo que fue la que se utilizó para llevar a cabo las medidas del presente proyecto.

2.2 Instalación experimental

La instalación experimental consta de 3 partes diferenciadas:

- Circuito de aire comprimido
- Instalación de atomización
- Sistema de extracción

2.2.1 Circuito de aire comprimido

El aire antes de llegar al dispositivo atomizar y entrar en contacto con la glicerina pasa por los siguientes puntos:

- 1) El compresor del laboratorio, que puede ofrecer una presión máxima de aproximadamente 10 bares.
- 2) Del compresor el aire es conducido por la red de aire comprimido del laboratorio hasta las distintas tomas de presión existentes para la conexión de los equipos que requieran este medio para su funcionamiento.
- 3) A la entrada, tras la toma, existe una válvula de apertura y cierre de suministro de aire.

- 4) Tras ella el aire pasa por un regulador de presión o mano-regulador como el de la Figura 2.
- 5) A continuación se lleva a un rotámetro de aire de la marca Kytola (izquierda de la Figura 2), ajustado para una presión de funcionamiento de 3 bares, por lo que es necesario ajustar también el mano-regulador para que a su salida no se superen estos 3 bares. Este rotámetro dispone de una válvula estranguladora para poder regular el caudal.



Figura 2. Regulador de presión de aire y rotámetro de aire marca Kytola.

- 6) Finalmente el aire se conduce al dispositivo atomizador pasando por un bifurcador de flujo en “Y” para hacer llegar las dos corrientes de aire comprimido a los dos orificios que se encuentran en la tapa del atomizador. Se procuró que los dos segmentos de tubo que van desde el bifurcador hasta la entrada del dispositivo de atomización fueran de una longitud similar para que las dos corrientes de aire fueran lo más parecidas posibles y así asegurar una correcta formación del vórtice dentro del cuerpo del atomizador.

En la figura 3 se puede observar un sencillo esquema del circuito de aire comprimido.

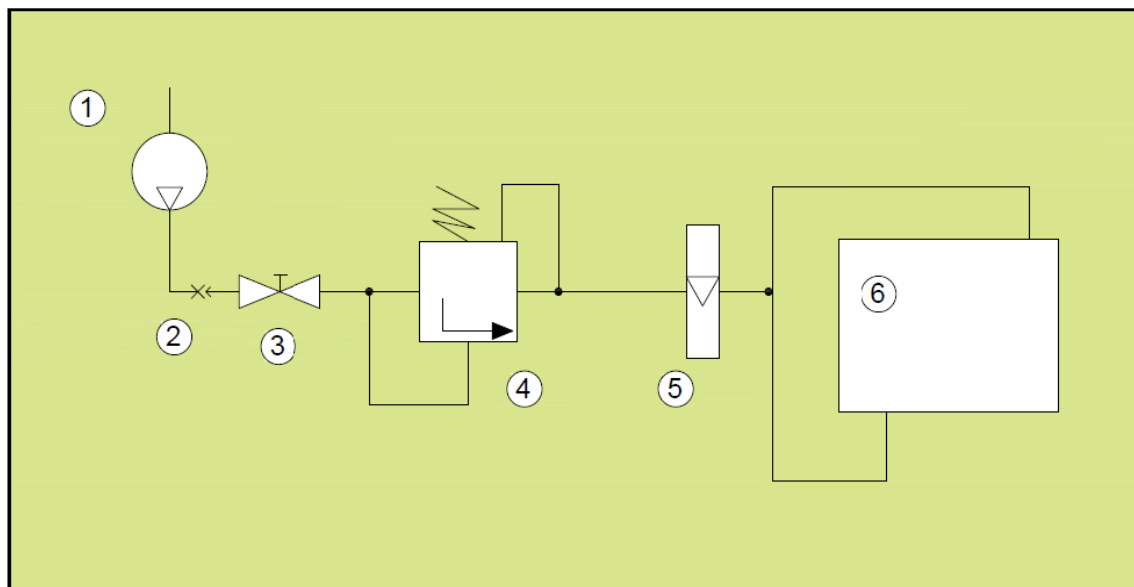


Figura 3. Esquema del circuito de aire comprimido.

2.2.2 Instalación de atomización

Para alojar el dispositivo atomizador se diseñó una estructura hecha con ángulos metálicos ranurados. Mediante dichas barras se fijó el atomizador a una altura determinada y suficiente para que el flujo de aerosol de salida, el cual tiene un perfil cónico, no rebasara los límites de la estructura.

En uno de los laterales se colocó por la parte interior otra barra paralela a la de ese lado con el fin de poder asentar el recipiente en el que está alojada la glicerina. En la figura 4 se puede observar un esquema simple de la instalación de atomización (estructura y posición del atomizador y del film de plástico).

Para recoger todo el espray obtenido se colocó un film de plástico que abarcaba toda la sección de la estructura.

El proceso de diseño y montaje de la instalación de atomización fue un proceso que tomó bastante tiempo debido a que tuvieron que buscarse las barras adecuadas y cortarlas para adaptarlas a nuestras necesidades, además se tuvo que buscar la mejor manera de colocar el dispositivo atomizador en cuanto a orientación, para que ninguno de los tubos de la instalación interfirieran en el camino óptico de los haces del PDA.

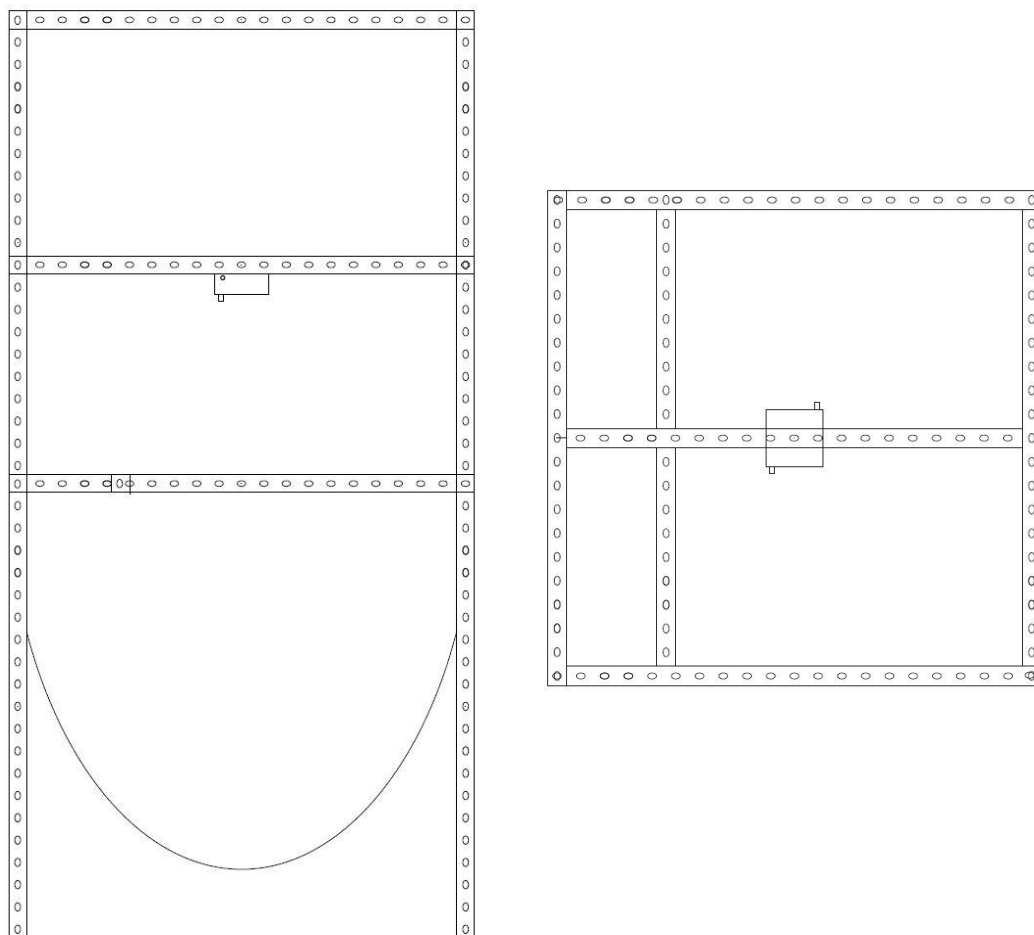


Figura 4. Esquema de alzado y planta de la estructura.

2.2.3 Sistema de extracción

El sistema de extracción consta básicamente de un tubo flexible de aluminio conectado a un ventilador actuando como succionador. Este tubo se colocó inicialmente en la instalación a través de un orificio practicado en el film de plástico y en una posición elevada respecto al fondo del plástico. Cuando se realizaron las pruebas con glicerina surgió el problema de que había demasiada recirculación de aerosol desde abajo hacia arriba y se formaba una neblina que inundaba la zona de medición e incluso el laboratorio y podía dificultar la toma de datos, recogiendo información de partículas que no provienen directamente de la salida del atomizador.

Por tanto se tomó la decisión de elevar la posición del tubo extractor hasta colocarlo próximo a la salida del atomizador, de manera que succionara gran parte del aire y evitar así en mayor medida las recirculaciones.

Además, durante las pruebas se comprobó que el caudal de fluido atomizado no era muy elevado y las dimensiones del plástico eran bastante grandes, por lo que se decidió no incluir un sistema de extracción de la glicerina recogida en el film, el cual podría complicar mucho el funcionamiento de la instalación debido a las propiedades físicas de dicho fluido.

Finalmente se optó por extraer la glicerina recogida periódicamente y de forma manual.

2.3 Sistema de medida

El sistema de medida utilizado para la caracterización de las pequeñas gotas que se forman es conocido como PDA (Phase Doppler Anemometry) o Anemometría de Desfase Doppler. A través de este dispositivo es posible medir simultáneamente diámetro de partículas esféricas (gotas) y dos componentes de la velocidad.

Esta técnica de medición tiene la gran ventaja de que es totalmente no intrusiva, por lo que sólo es necesario acceso óptico al lugar de medida para su utilización. De esta forma se evitan posibles perturbaciones del flujo, ya que otras técnicas requieren de la introducción de sondas en el interior del flujo a medir.

Este sistema se compone de los siguientes elementos:

1. Fuente láser de ión Argón. Genera un haz de luz láser de longitudes de onda 488 nm (color azul) y 514,5 nm (color verde).
2. Célula de Bragg. Es el dispositivo encargado de dividir el haz de luz láser en dos, es decir, cada color del láser tendrá su pareja. Además modifica la frecuencia de uno de los haces de cada pareja con una variación de 40 MHz. Así se consigue solventar la ambigüedad en el sentido de la velocidad del volumen de medida.
3. Conjunto óptico integrado. Se compone de una serie de manipuladores de orientación, posición y enfoque (para cada uno de los cuatro haces) con los que se logra la correcta alineación del láser a la entrada de las fibras ópticas que se dirigen al cabezal transmisor. (Ver anexo A1).
4. Cabezal transmisor. Contiene un expansor para que los haces salgan colimados, es decir, paralelos entre sí y con una distancia entre haces de 40 mm, además de una lente convergente de 500 mm.
5. Cabezal receptor. La lente usada en detección es también de 500 mm.
6. Fotodetectores (o fotomultiplicadores). Se sitúan tras el cabezal receptor, de donde les llega la señal luminosa para transformarla en señal eléctrica.

7. Procesadores de señal eléctrica. El procesado se realiza en dos etapas, una de tratamiento analógico y otra de tratamiento digital.
8. PC con software. Finalmente las señales digitales llegan al ordenador donde se utiliza un software específico para el procesamiento de los datos.

Previo al correcto uso del láser para la medición con las condiciones óptimas, fue preciso realizar tareas de calibrado y puesta a punto bastante exhaustivas, para las cuales fue necesario conocer en profundidad los principios de funcionamiento del láser y las funciones de cada uno de sus componentes.

En el anexo A1 del presente proyecto se explican con más detalle dichos principios y el proceso de calibrado que se siguió para conseguir el óptimo funcionamiento del sistema.

Como se ha dicho anteriormente, los sistemas PDA permiten la medida tanto de velocidad como de diámetro de partículas de un flujo.

Las primeras técnicas para determinar la velocidad de las partículas se basaban en el efecto Doppler, por el cual se produce un desplazamiento en frecuencia en un haz de luz que incide sobre una partícula en movimiento. Debido a que la luz procedente del láser posee una frecuencia con un orden de magnitud de 10^{14} Hz y que el desplazamiento Doppler del haz no suele superar las decenas de MHz, resulta prácticamente imposible medir dicha señal Doppler mediante el análisis directo de la luz difundida por la partícula.

Posteriormente se desarrollaron otras técnicas de medición, como la de doble haz, que actualmente es la más extendida.

Esta técnica se basa en la emisión de dos haces procedentes de una misma fuente (el desdoblamiento del haz se consigue mediante la célula de Bragg), que se cruzan entre sí formando un patrón de interferencias, el cual es una sucesión de planos alternantes de luz y oscuridad, y paralelos a la bisectriz de los haces. Esta zona del espacio, que tiene forma de elipsoide, es llamada volumen de medida.

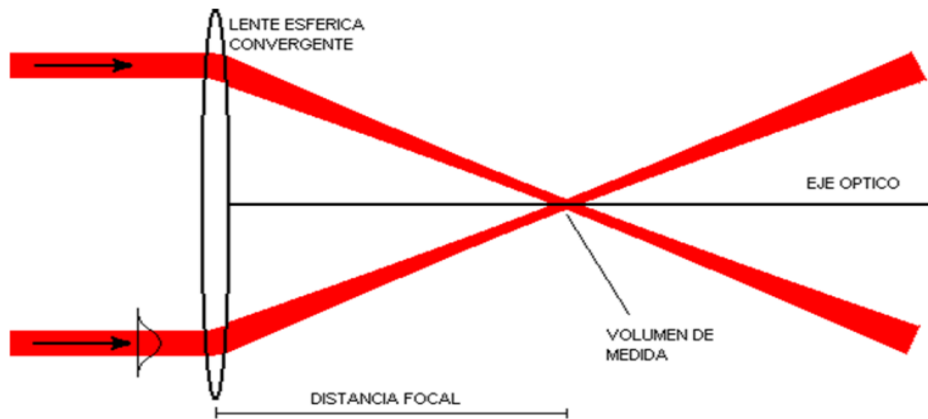


Figura 5. Esquema óptico del cruce de los haces.

2.3.1 Medida de la velocidad

Cuando una partícula atraviesa el volumen de medida, difunde la luz de los dos haces incidentes. La superposición de las dos ondas difundidas es detectada por la óptica de recepción, y es llevada a los fotomultiplicadores, en cuya superficie interfieren y forman una señal (señal Doppler) de intensidad fluctuante, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de la partícula.

La expresión para el cálculo de la velocidad que se obtiene es la siguiente:

$$V_n = \delta \cdot v_D;$$

V_n = Velocidad de la partícula

Así cada par de haces permite obtener una componente de velocidad de la gota o partícula que atraviese el volumen de medida. Obsérvese que no es necesaria calibración.

2.3.2 Medida del diámetro

Para la determinación del diámetro de la partícula es necesaria la utilización de más de un fotodetector ya que el diámetro está relacionado con el desfase existente entre las señales de luz difundida por la partícula que llegan a las distintas posiciones.

En este caso se utilizarán tres detectores. Una pareja de ellos se encargará de abarcar un amplio rango de diámetros y con la otra pareja se conseguirá una buena resolución del diámetro para que éste quede totalmente determinado. Esta situación se puede observar en la siguiente figura:

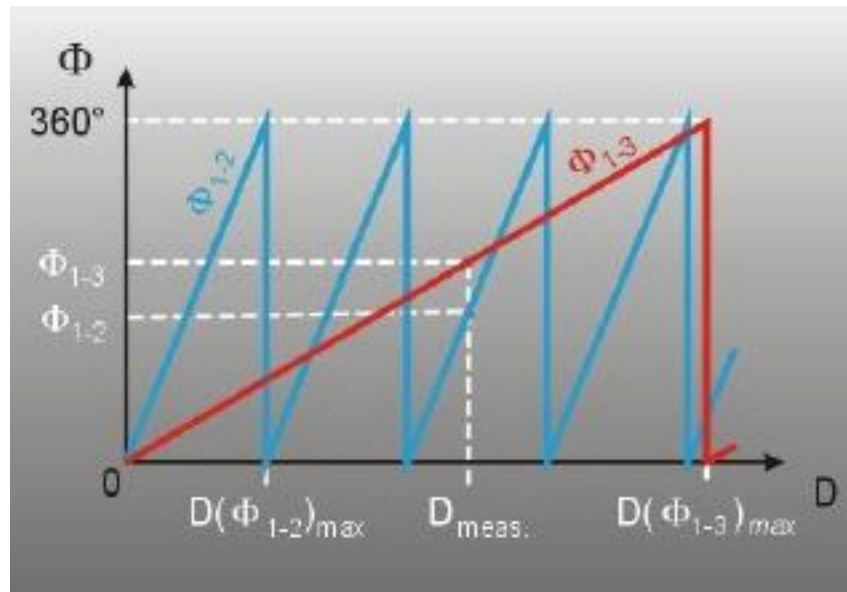


Figura 6. Determinación gráfica del diámetro de partícula.

La diferencia de factor de fase entre la pareja de detectores 1-2 y la pareja 1-3 hace que las pendientes de estas dos parejas sean diferentes.

La relación entre el desfase de dos detectores, $\Delta\Phi_{12}$, y el diámetro de la partícula, D , viene dada por la siguiente expresión:

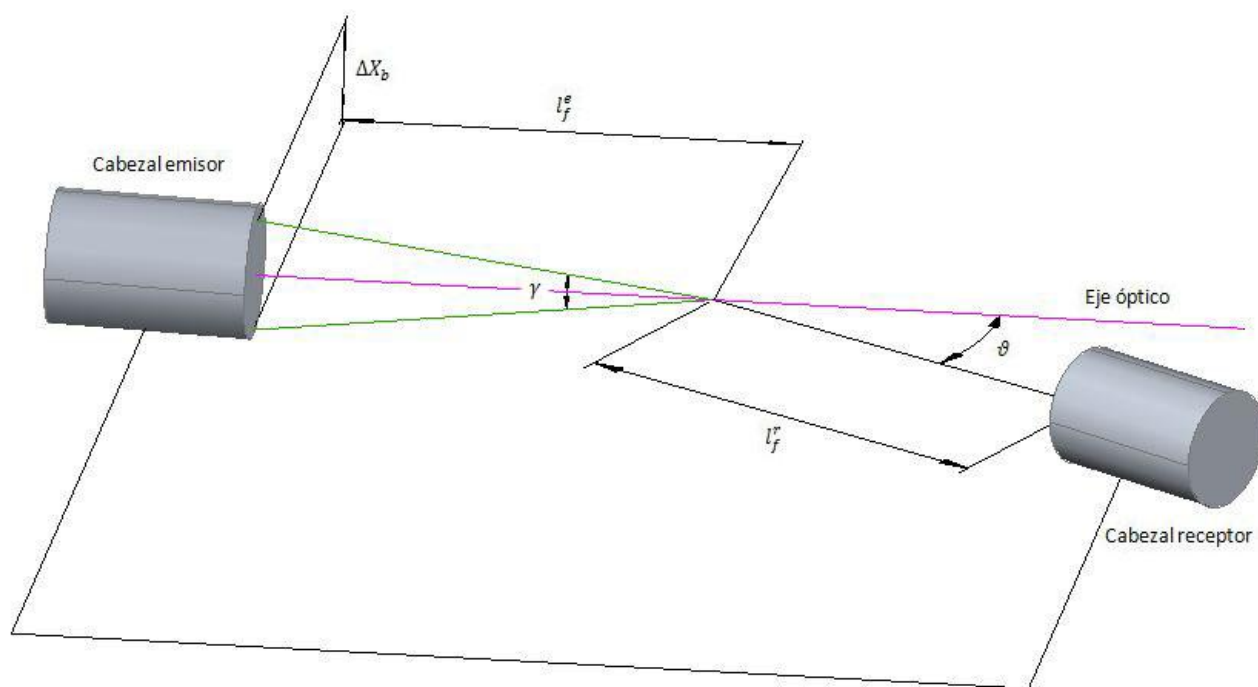
$$\Delta\Phi_{12} = \frac{\pi \cdot m}{\lambda} \beta_{12} D;$$

β_{12} = factor de fase entre los detectores 1 y 2.

m = índice de refracción del fluido.

2.3.3 Disposición óptica de medida.

A continuación se muestra la disposición de los cabezales transmisor y receptor así como las condiciones ópticas con las que se realizaron las medidas.



Montaje óptico	
Longitud focal de la lente del cabezal emisor	$l_f^e = 500 \text{ mm}$
Longitud focal de la lente del cabezal receptor	$l_f^r = 500 \text{ mm}$
Distancia de separación entre haces	$\Delta X_b = 40 \text{ mm}$
Ángulo entre haces	$\gamma = 4,6^\circ$
Orientación del conjunto receptor	$\vartheta = 30^\circ$

Figura 7. Montaje óptico de medida.

El ángulo de orientación del receptor tiene una gran importancia. Cuando la luz se encuentra con una gota de líquido como la glicerina, se producen cambios en la dirección del haz en cuestión de varias formas: reflexión, 1ª refracción, 2ª refracción... Existe una dirección óptica en la que una o varias de estas formas de difusión de luz es dominante, y es la que se debe elegir para poder obtener una relación lineal entre el desfase y el diámetro.

El ángulo de orientación del conjunto receptor respecto del eje óptico escogido es de 30° tras consultar el manual del propio PDA, que recomendaba el montaje con dicho ángulo para fluidos de trabajo con índices de refracción similares al de la glicerina. Como se observa en la figura 8, hasta valores de diámetro de 110-120 micras la relación es lineal tanto para los detectores 1-2 como para 1-3.

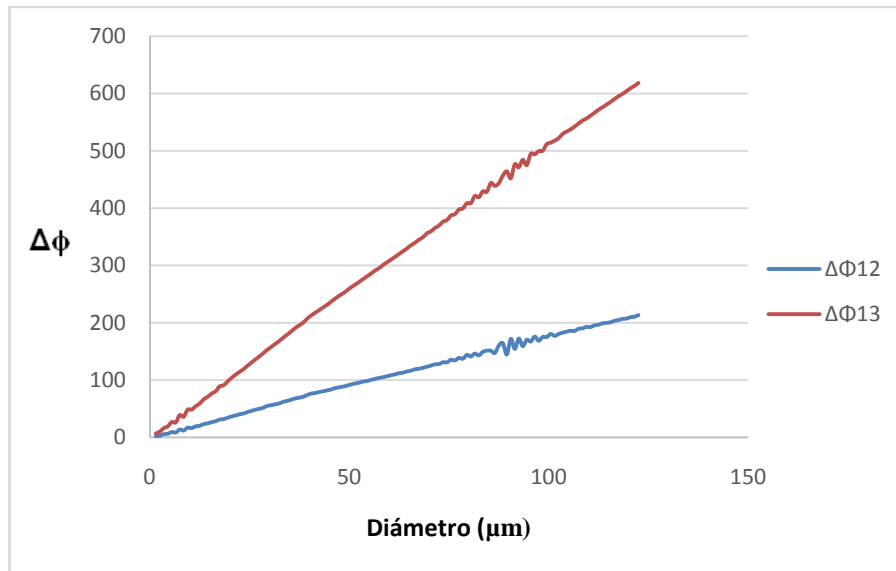


Figura 8. Curva desfase-diámetro.

Ambos conjuntos ópticos fueron montados y fijados en un sistema de desplazamiento de 3 ejes (X, Y, Z) a través de barras metálicas con guías, asegurando así que no hubiera movimiento relativo entre ambos cabezales. De este modo se pudo determinar de forma precisa la localización del volumen de medida. La disposición de los cabezales de emisión y recepción con respecto al dispositivo de atomización es la que se observa en la figura 9:

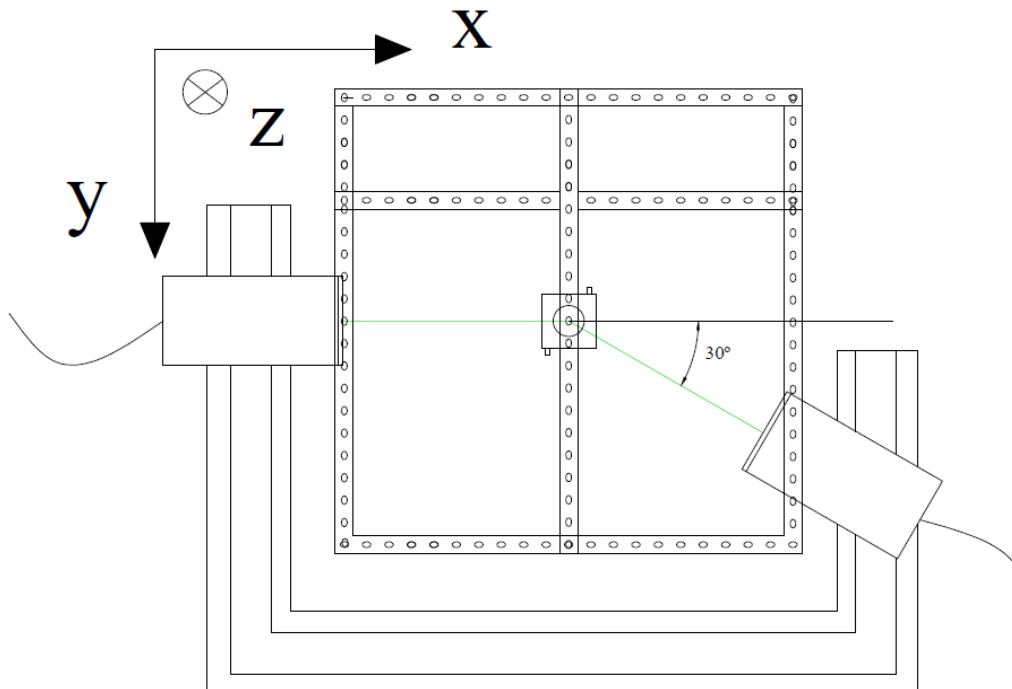


Figura 9. Disposición de los cabezales en la instalación.

3. Ensayos

El objetivo de los ensayos era recopilar la mayor cantidad de datos posible para lograr una buena caracterización del aerosol de glicerina.

En un primer momento se pensó en medir, a partir del dispositivo PDA, dos componentes de la velocidad: una en la dirección vertical y la otra en la perpendicular a esta, además del diámetro de las partículas del fluido atomizado. Sin embargo durante la puesta a punto del láser se comprobó que el correspondiente a la longitud de onda de 488 nm (color azul) no tenía suficiente intensidad, y éste es el encargado de la medida de las velocidades radiales.

Así pues, se optó por la decisión de prescindir de esta componente de velocidad y se midió con el láser de color verde (componente vertical de la velocidad), que además es el que utiliza el sistema para la obtención de los diámetros.

Para una mayor simplicidad y claridad se tomó como punto de referencia para realizar las medidas el centro del orificio de salida del atomizador. Las medidas se tomaron en distintas secciones transversales situadas a 20, 40, 60 y 80 mm de dicho orificio (figura 10).

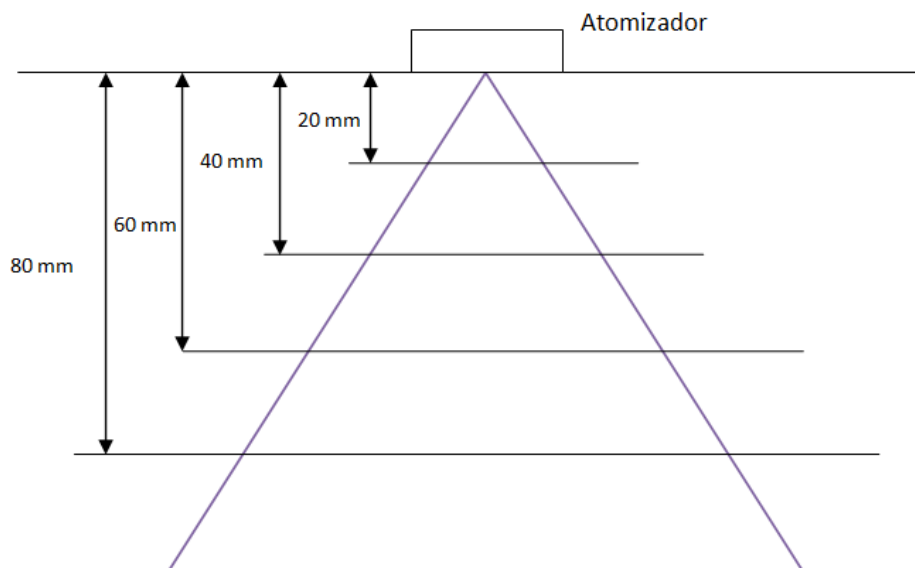


Figura 10. Secciones de medida en el spray.

En cada una de las secciones se tomaron medidas a lo largo de dos direcciones perpendiculares entre sí:

- **Diámetro 1:** Desplazándonos en el eje X con $Y = \text{cte.}$: en esta dirección se barrió el diámetro completo de la sección.
- **Diámetro 2:** Desplazándonos en el eje Y con $X = \text{cte.}$: se tomaron medidas de una sola mitad de la sección debido a que el racor del tubo de entrada de glicerina al atomizador se interponía en la trayectoria del láser por la otra mitad.

Las medidas de esta segunda dirección se utilizaron, como se verá más adelante, para comprobar si el flujo de salida del atomizador es axisimétrico.

En cada sección se tomaron medidas cada 4 mm. En punto donde comenzar a tomar las medidas en cada sección se determinó observando que la velocidad media era prácticamente nula. A partir de ahí se barrió la sección hacia el cono de salida del aerosol y hasta salir de él y detectar una velocidad de partículas también nula.

3.1 Propiedades del fluido

El fluido que se utilizó en los ensayos de dicho proyecto es la glicerina, también llamada glicerol o 1,2,3-propanotriol, según la nomenclatura sistemática.

Es una sustancia que a temperatura ambiente (25°C) se encuentra en estado líquido, es incolora e higroscópica, es decir, que tiene la capacidad de absorber humedad.

Posee una densidad de 1261 Kg/m^3 y es el fluido newtoniano con la viscosidad más alta: alrededor $1,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (a 20°C), por lo tanto resulta un fluido muy interesante para ser estudiado en un estado atomizado.

El índice de refracción de la glicerina es 1,473.

Tanto la glicerina natural como la industrial son perfectamente asimilables por el ser humano, incluso en grandes cantidades. Así pues no resulta peligroso inhalar la glicerina que queda en suspensión en el aire tras la atomización.

Cabe destacar que la bibliografía sobre la atomización de glicerina es prácticamente nula, por lo que no fue posible tener a priori una idea de los resultados que se iban a obtener.

3.2 Fases de un ensayo

A continuación se describe el procedimiento a seguir a la hora de realizar un ensayo en esta instalación:

- 1) Encendido de los aparatos: del láser, tras el que es necesario dejar que se estabilice durante unos minutos, del módulo que alimenta la célula de Bragg, del software de recopilación de datos y del sistema de desplazamiento de los cabezales.
- 2) Comprobación del nivel de glicerina del recipiente: para evitar que en mitad de un ensayo quede demasiado bajo y el tubo succione aire.
- 3) Afinado de la potencia del láser: es conveniente que cada vez que se enciende el láser se utilicen los manipuladores que focalizan los haces a las entradas de las fibras ópticas para maximizar la potencia de salida.
- 4) Colocación del volumen de medida: en la sección adecuada y en la posición requerida en el ensayo en cuestión, a través del sistema de desplazamiento por coordenadas.
- 5) Encendido del sistema de extracción de aire: a través del ventilador actuando como succionador.
- 6) Apertura del circuito de aire comprimido.
- 7) Arranque del software y toma de datos: el software utilizado para la recogida de datos es Data NT-View. Durante este proceso es preciso observar el voltaje asignado por el programa a los fotomultiplicadores para que las señales que recibe no saturen, ya que ello podría llevar a la toma de datos erróneos. En las medidas en que fue necesario se modificó dicho voltaje.

Cuando el software termina de recoger las muestras de un punto, se desplaza el volumen de medida a través del sistema de desplazamiento y se vuelve a arrancar el programa.

4. Medidas y análisis

La extracción de los datos de velocidades y diámetros a través de PDA se basa en el análisis de las señales generadas por una población de gotas que pasan por cada punto de medida.

El tamaño de la población de gotas medidas en cada punto se limitó a un tamaño máximo de 100000 muestras recogidas y a un valor mínimo de muestras tomadas en un tiempo límite de 120 s.

El estudio se ha realizado tanto por población global de gotas como distinguiendo por clases de tamaño. Se comprobó que la mayor parte de las gotas medidas no superaban los 30 μm , por lo que se plantearon y estudiaron 6 clases diferentes de tamaños:

- Clase 1 o D_{0-5} : Diámetros entre 0 y 5 μm ,
- Clase 2 o D_{5-10} : Diámetros entre 5 y 10 μm ,
- Clase 3 o D_{10-15} : Diámetros entre 10 y 15 μm ,
- Clase 4 o D_{15-20} : Diámetros entre 15 y 20 μm ,
- Clase 5 o D_{20-25} : Diámetros entre 20 y 25 μm ,
- Clase 6 o D_{25-30} : Diámetros entre 25 y 30 μm .

Respecto de las velocidades se muestran velocidades axiales medias de partículas en cada punto de medida separadas por clases de diámetros y valores de desviación típica.

A partir de las señales tomadas con el dispositivo PDA, se extrajo de cada experimento las siguientes magnitudes: velocidad de partícula, v_i (m/s), diámetro de partícula, d_i (μm) y tiempo de tránsito, tt_i (μs).

4.1 Análisis de velocidades

Para el correcto análisis de las velocidades se realizó una corrección de éstas por el tiempo de tránsito (tt). El tiempo de tránsito es el tiempo que le cuesta a una partícula atravesar el volumen de medida, por lo que cuando la velocidad del flujo es más elevada se toman mayor cantidad de datos. Esto hace que al calcular una velocidad

media aritmética, ésta pueda resultar un valor más elevado del real. Para dicha corrección se utilizó la siguiente expresión:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i * tt_i)}{\sum_{i=1}^n tt_i}$$

Cabe destacar que también se estudió la corrección de las velocidades por el inverso de éstas, pero se obtuvieron unos resultados que no tenían sentido, a diferencia del método de corrección por tiempo de tránsito.

Se calcularon las velocidades promedio de cada clase de diámetros y global en cada punto de medida. El perfil de velocidades promedio global a lo largo de la coordenada “x” en la sección Z= 20 mm es el que se muestra en la figura 11. En la figura 12 se muestran los perfiles de velocidades promedio globales para las 4 secciones estudiadas.

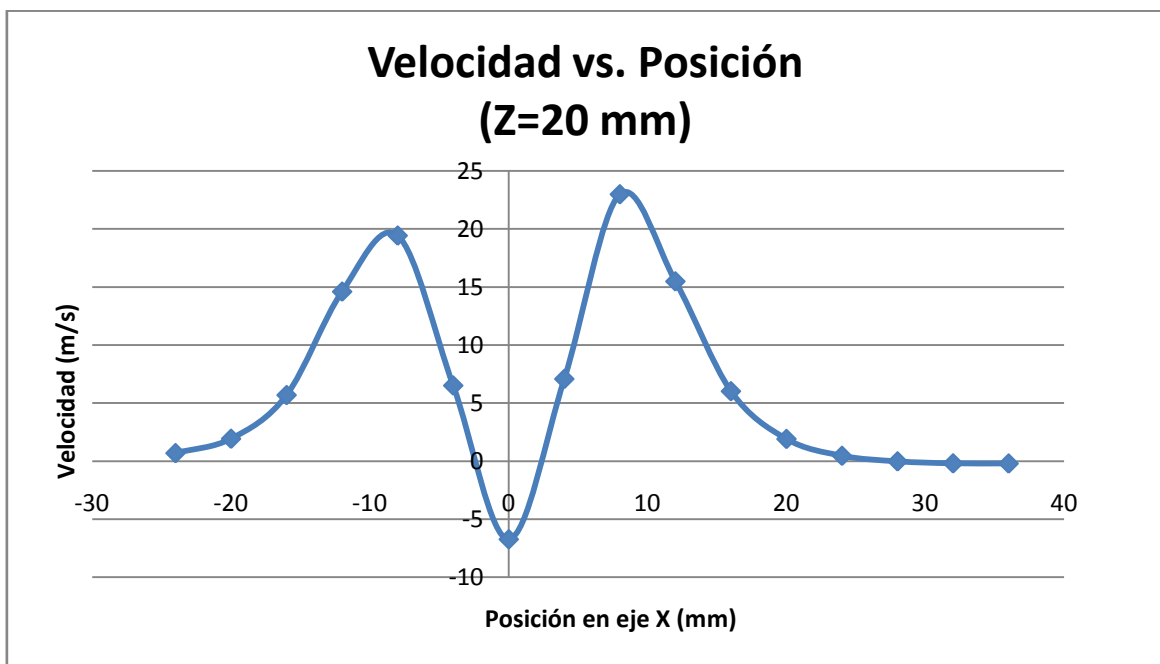


Figura 11. Perfil de velocidad promedio global en la sección Z=20 mm

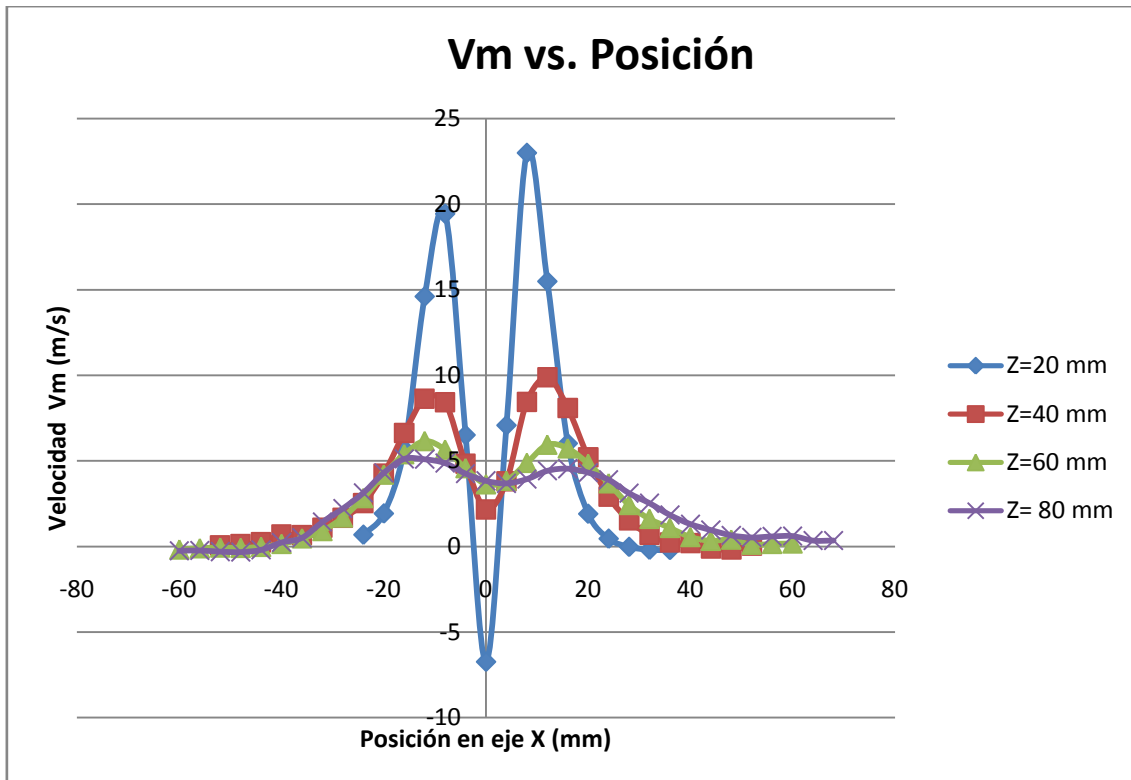


Figura 12. Perfiles de velocidad promedio global en las distintas secciones.

Se puede observar que en la sección más cercana a la salida del aerosol la velocidad aumenta desde la periferia hacia el centro hasta un nivel máximo alrededor de la posición $X=12-16$ mm (tanto en el lado negativo como en el positivo), pero en los puntos más cercanos al centro se produce un descenso muy pronunciado de la velocidad, consiguiéndose incluso velocidades negativas, con un mínimo absoluto en la posición centro ($X=0$ mm). Esto se debe a que existe una recirculación de aire hacia el centro debido a que en este tipo de dispositivos de atomización se produce una depresión a la salida.

Conforme nos alejamos de la salida del atomizador, este mínimo de la velocidad en los puntos centrales se va suavizando, así como los picos de velocidad máxima de las posiciones $X=12-16$ mm de ambos lados.

Cabe esperar que en secciones aún más alejadas de las estudiadas, el perfil de velocidad tienda hacia una curva con un solo máximo en la posición $X=0$ mm.

4.1.1 Comprobación de la simetría axial del flujo.

Se representaron los semi-perfiles de velocidad en las dos direcciones medidas (Diámetros 1 y 2), tal y como muestra la figura 13, en la que se puede comprobar que el flujo es prácticamente axisimétrico.

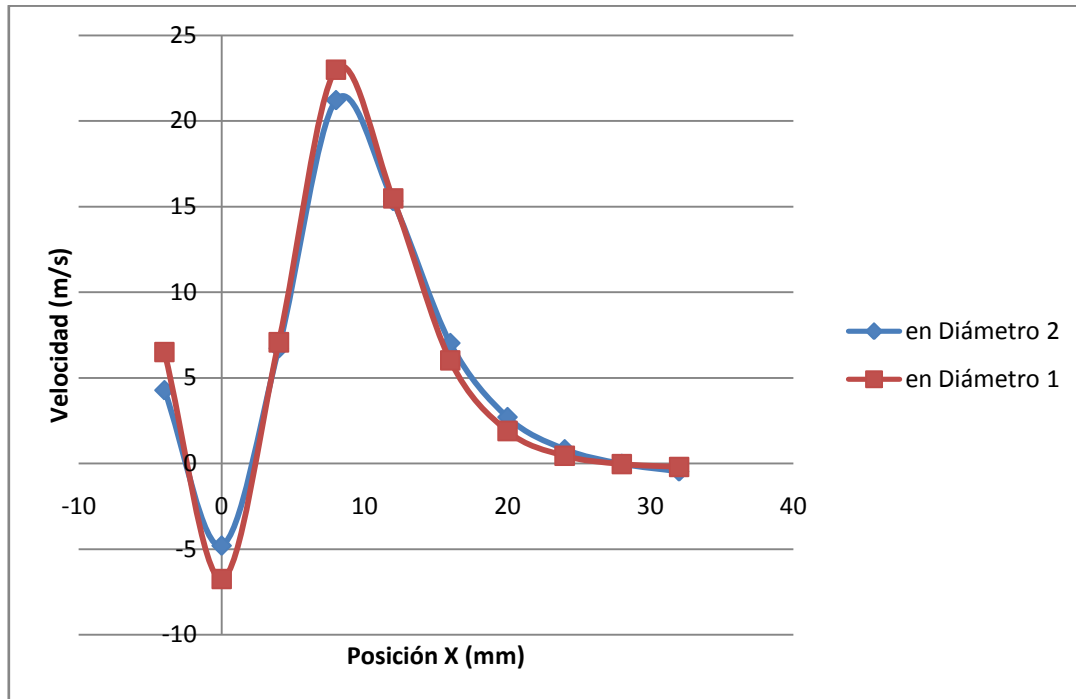


Figura 13. Comparación de perfiles de velocidad en las dos direcciones.

4.1.2 Correlación velocidad - diámetro

Se comprobaron posibles correlaciones velocidad – diámetro en todas las secciones. En las figuras 14 a 17 se representa la evolución de la velocidad con la clase de tamaño en algunos puntos de las cuatro secciones.

Comparando estas cuatro figuras se puede ver que todas las clases de partículas se deceleran a lo largo de la trayectoria del flujo.

Si bien en la figura 14 correspondiente a la sección Z=20 mm se observa que prácticamente la velocidad entre clases no varía, comparando con las secciones Z=40 mm y Z= 60 mm se ve que la disminución de la velocidad es más pronunciada en las clases de gotas pequeñas que en las grandes.

Este hecho es posiblemente debido a que las gotas de glicerina salen con mayor velocidad que la fase continua de aire, y las gotas de menor tamaño se adaptan más rápidamente al flujo de aire, siendo frenadas antes que las partículas de mayor tamaño.

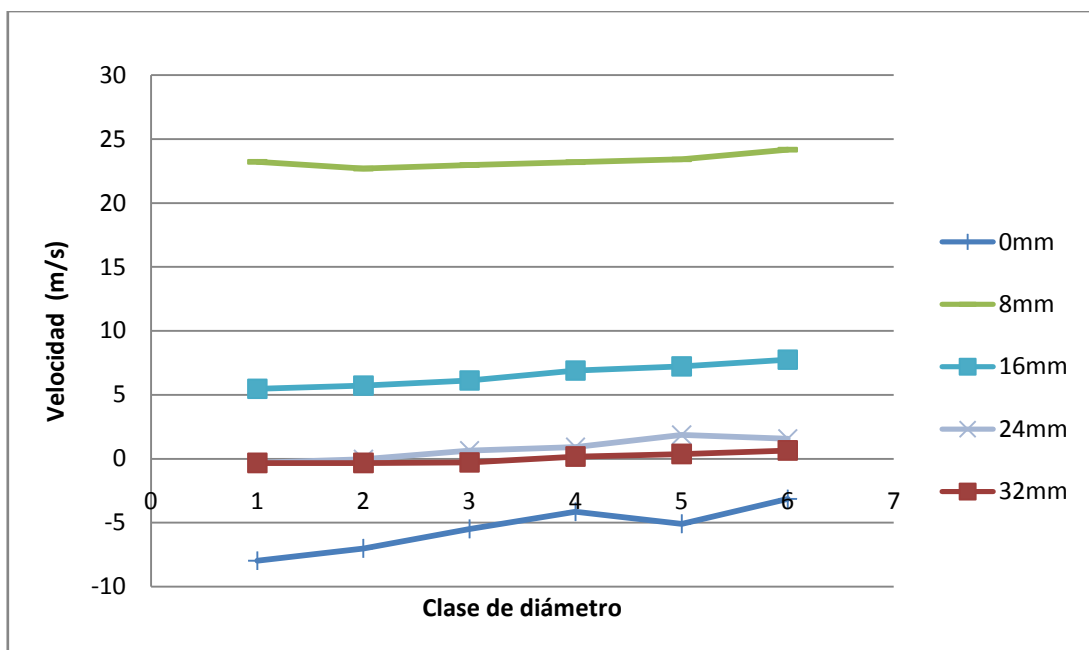


Figura 14. Evolución de la velocidad con el diámetro en Z=20 mm

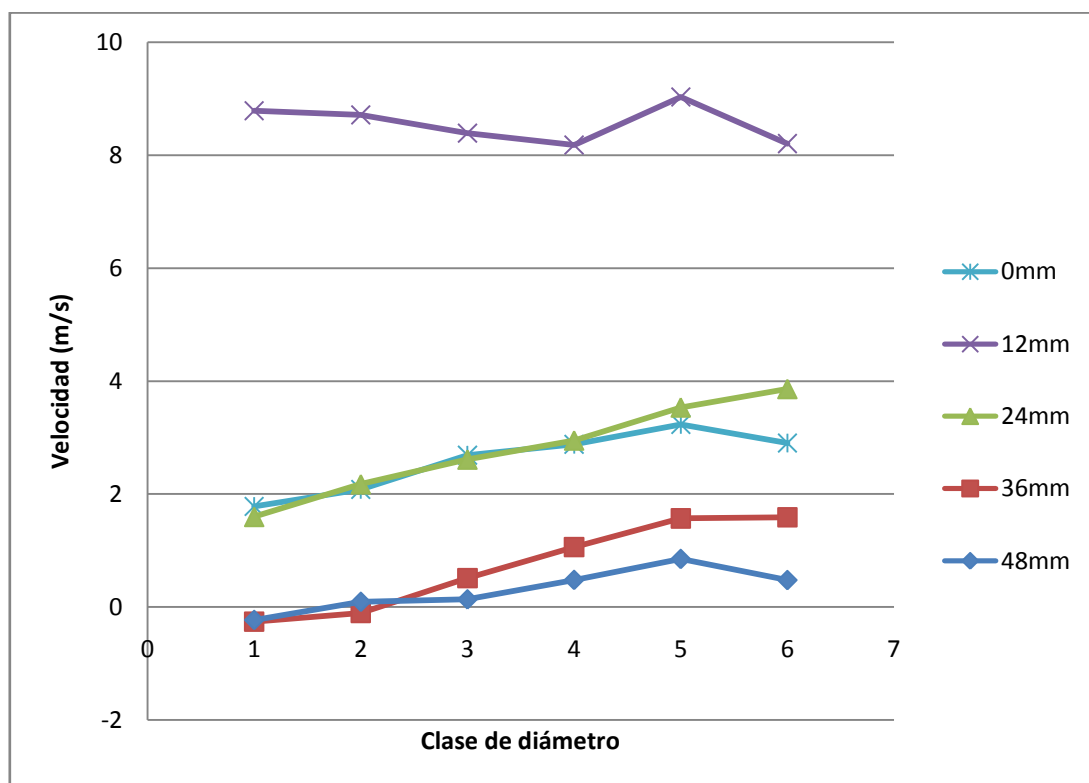


Figura 15. Evolución de la velocidad con el diámetro en Z=40 mm

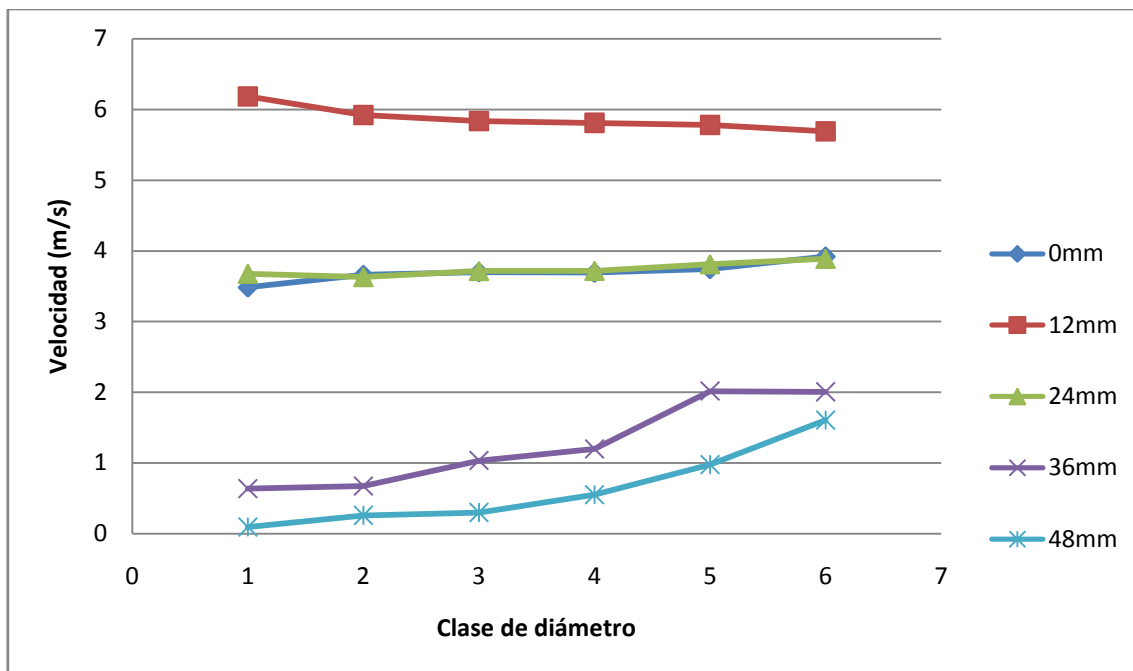


Figura 16. Evolución de la velocidad con el diámetro en Z=60 mm

En cambio en la sección de Z= 80mm, se puede observar que, sobre todo en los puntos más centrados e intermedios de la sección, el descenso de velocidad en partículas pequeñas desde Z= 60mm a Z=80 mm es menos pronunciado que en las grandes, lo que provoca que, como se ve en la figura 17, las gotas pequeñas sean más rápidas en esta sección que las grandes, resultado que en un principio no parecía lógico.

Finalmente se creyó que el motivo de este comportamiento fue la actuación del sistema de aspiración de aire que, como ya se ha comentado en el apartado 2.2.3 de la presente memoria, tuvo que ser elevado a una posición más cercana a la salida del atomizador para evitar una formación de niebla abundante.

De este modo, el aire aspirado por el tubo de extracción arrastraría, como cabría esperar, en mayor medida las gotas de menores tamaños.

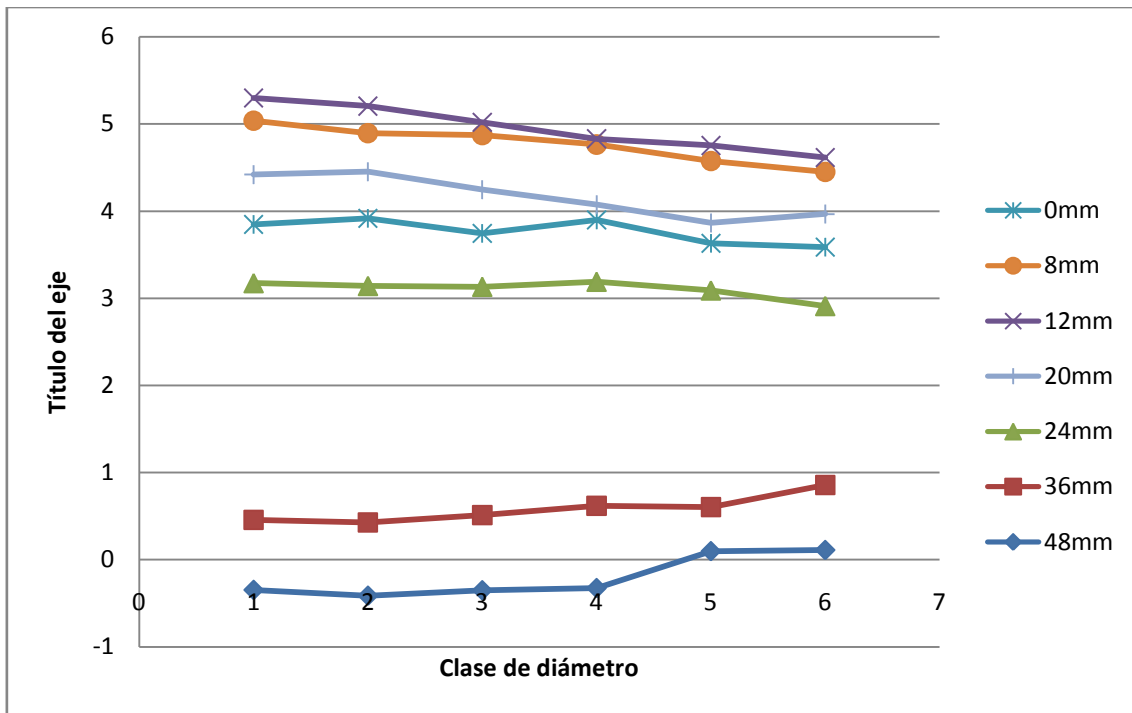


Figura 17. Evolución de la velocidad con el diámetro en Z=80 mm

4.1.3 Desviación típica de la velocidad

Se estudió la desviación típica que presentaba la velocidad para cada clase de diámetro y en las 4 secciones de medida.

Para el cálculo de las desviaciones típicas se utilizó como velocidad media la velocidad promedio corregida por tiempo de tránsito, ya presentada anteriormente.

Tal y como muestran las figuras 18 a 21 (perfiles de desviación típica) se comprueba que los valores de desviación en términos globales se van reduciendo conforme nos alejamos del atomizador, para todas las clases de diámetro.

Así, en la sección más cercana a la salida encontramos en los puntos centrales valores de desviación entre 80 y 200, mientras que en la sección Z= 40 mm se encuentran entre 35 y 65 aproximadamente, bajan entre 10 y 50 en la siguiente sección y todavía más en la última.

Esto es entendible ya que conforme se aleja el flujo de fase dispersa de la salida, mayor es el grado de acoplamiento de éste con la fase continua, y por tanto el flujo de gotas es más estable.

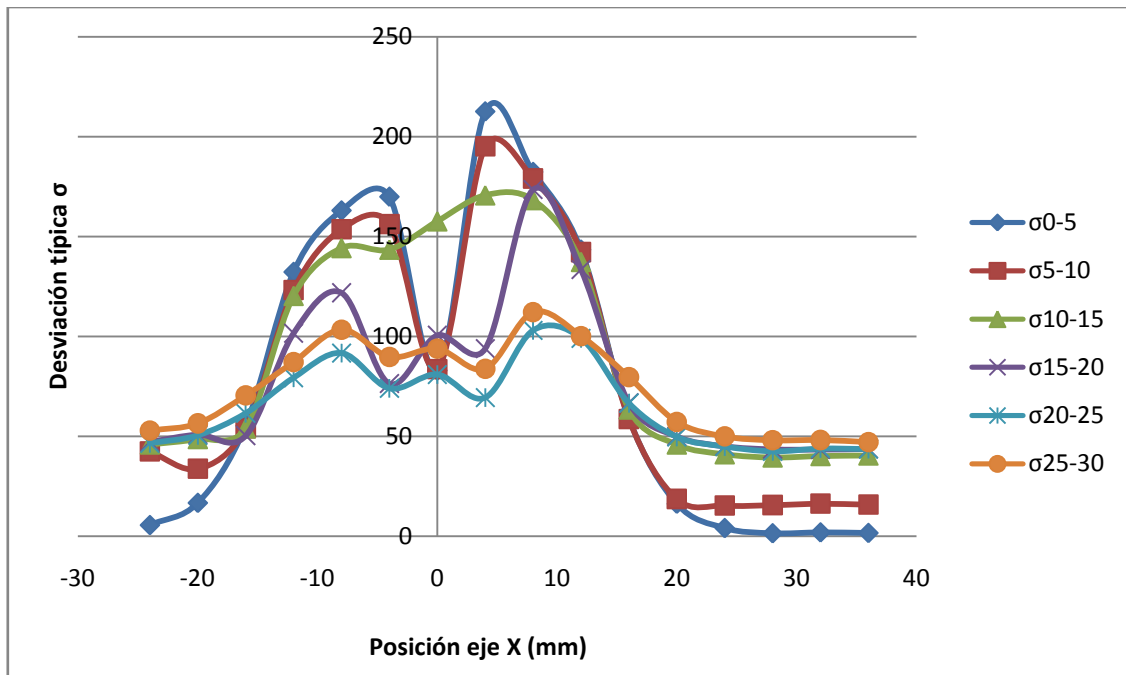


Figura 18. Perfil de desviación típica en Z= 20 mm

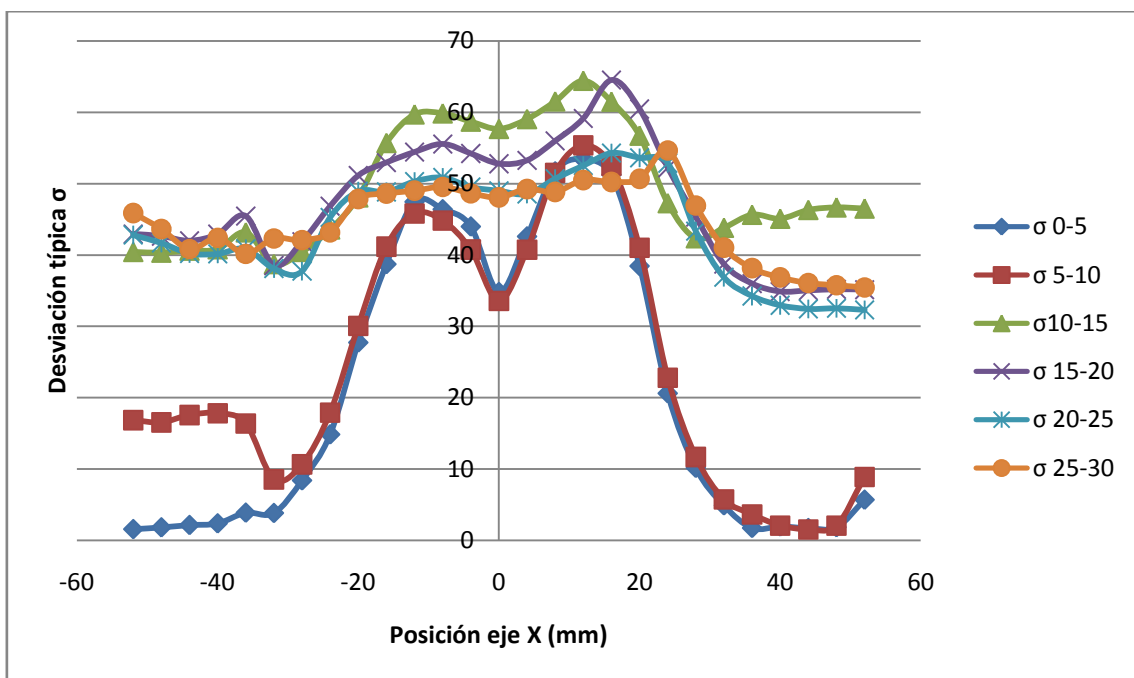


Figura 19. Perfil de desviación típica en Z= 40 mm

Además, sobre todo en las partículas más pequeñas (clases D_{0-5} y D_{5-10}), se observa una disminución de la desviación en la zona central, debida seguramente a la recirculación de aire hacia el centro, característica de este dispositivo atomizador ya comentada en el análisis de velocidades.

Las gotas más grandes son menos afectadas por la recirculación de aire al ser más pesadas, y siguen en mayor medida con su trayectoria. Como se ve en la sección $Z = 20$ mm (figura 18), la desviación es bastante estable en los puntos más centrados para partículas grandes.

Por el contrario, las gotas pequeñas son arrastradas con más facilidad por el flujo de aire recirculado, adaptándose a éste y consiguiendo que en la zona central existan velocidades de gotas pequeñas mucho más homogéneas.

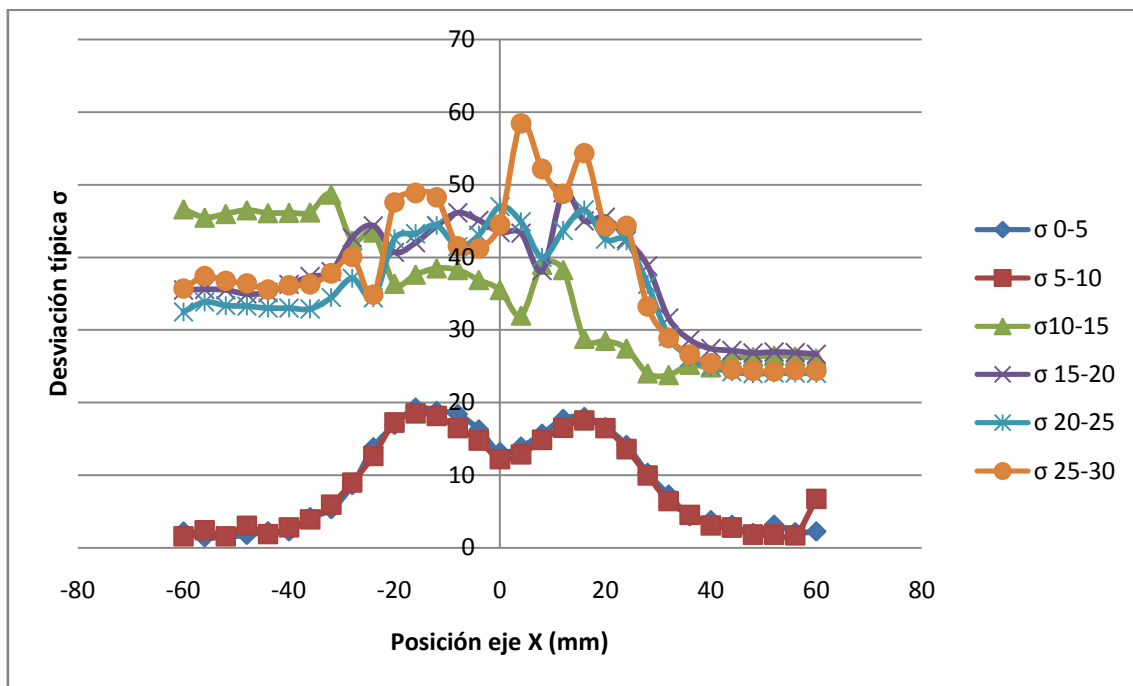


Figura 20. Perfil de desviación típica en $Z = 60$ mm

Otro fenómeno atípico que destaca es la asimetría de la colas laterales de los perfiles que se aprecia para partículas más grandes conforme nos alejamos del atomizador, además de la creciente irregularidad en los valores, como por ejemplo la curva para D_{25-30} tanto en la sección $Z = 60$ mm como en $Z = 80$ mm (figuras 20 y 21).

De nuevo se cree que la extracción de aire es la posible causa de estas asimetrías, observables en las secciones próximas a ella.

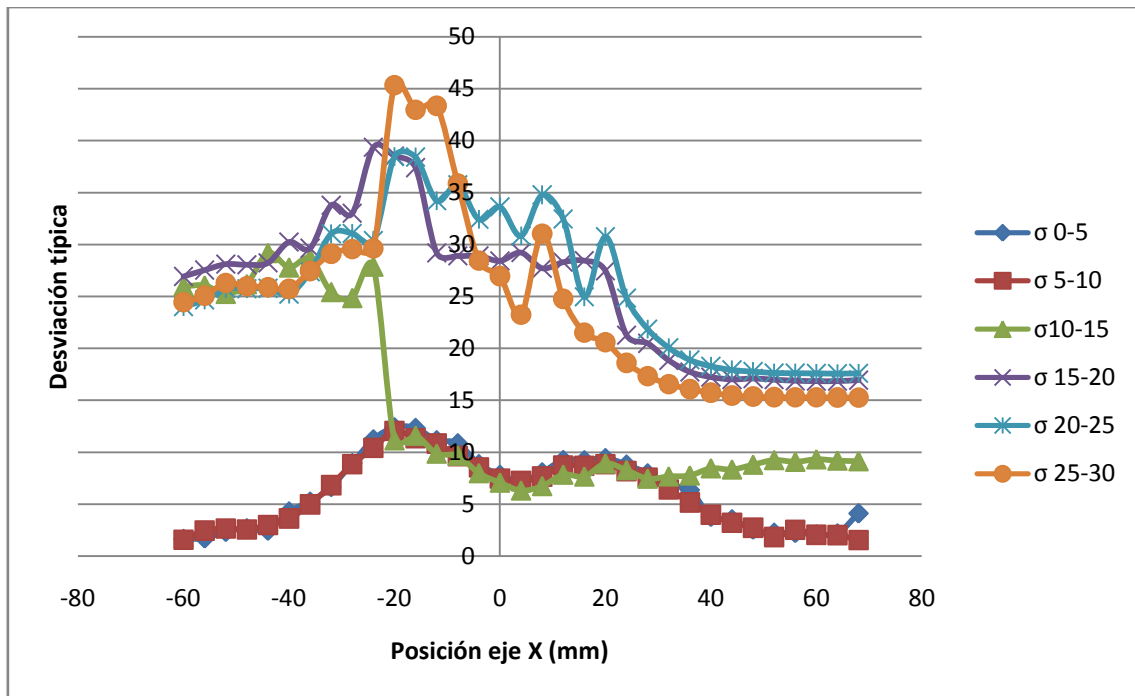


Figura 21. Perfil de desviación típica en Z= 80 mm

4.2 Análisis de diámetros

Como ya se ha comentado se dividió la población de partículas en seis clases de tamaños. En cada sección y para cada punto de medida se estudió la distribución del número de partículas de cada una de las clases. En el anexo A2 se pueden consultar los histogramas de distribución de partículas por diámetros de todos los puntos medidos.

4.2.1 Perfiles de concentración de partículas por clases

Se representaron los perfiles de número de partículas para cada clase de diámetro que se encuentran en las figuras 22 a 25. A partir de estos perfiles se comprobó que la clase de gotas con mayor población en todas las secciones es la de diámetros comprendidos entre 5 y 10 μm .

Analizando con cuidado la sección Z= 40 mm (figura 23), se observa claramente que para partículas pequeñas la concentración de la zona central tiende a nivelarse, debido a que la recirculación del aire produce la homogeneización del flujo de dicha zona central.

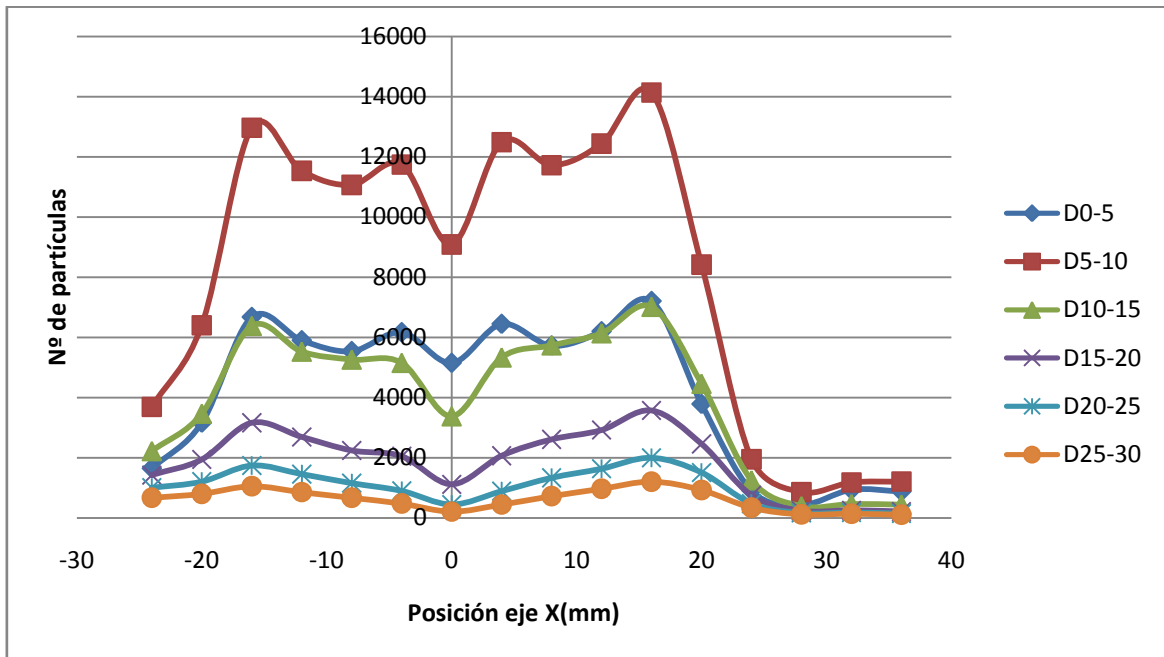


Figura 22. Perfil de concentración de partículas en Z= 20 mm

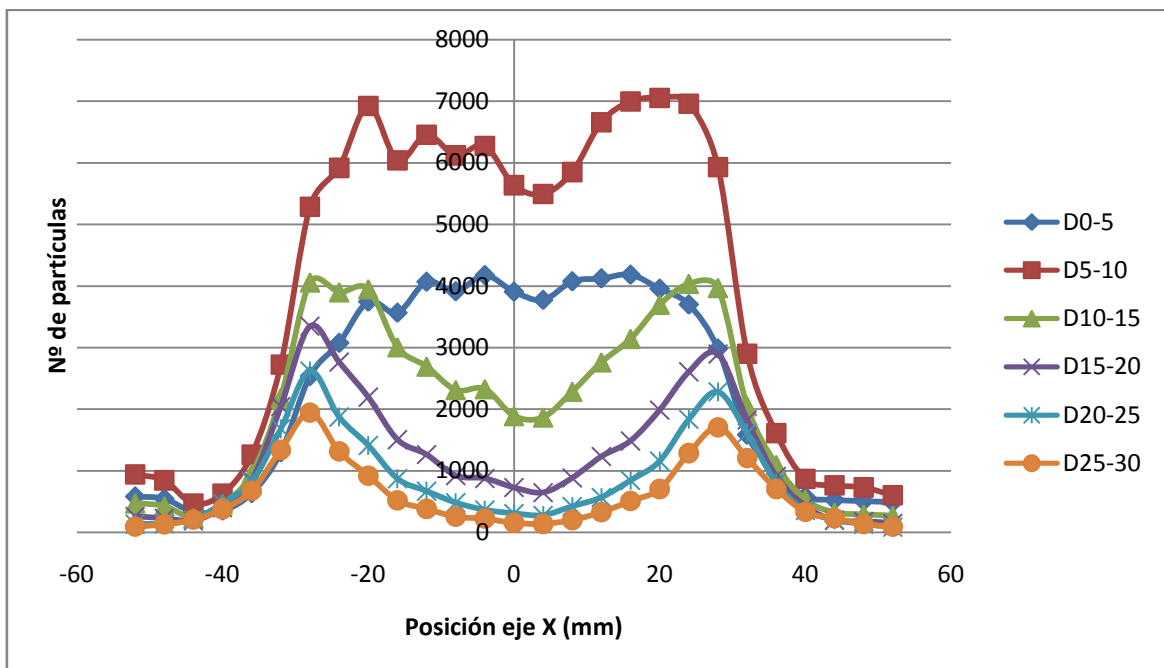


Figura 23. Perfil de concentración de partículas en Z=40 mm

Sin embargo, para las partículas grandes (D_{15-20} , D_{20-25} y D_{25-30}) se produce un descenso pronunciado de la concentración en la zona central por la ya comentada menor facilidad de arrastre de estos tamaños en la corriente de recirculación.

Conforme se avanza de sección se puede observar que los efectos de la recirculación central van disminuyendo y la concentración de gotas grandes en los puntos centrales va siendo cada vez mayor.

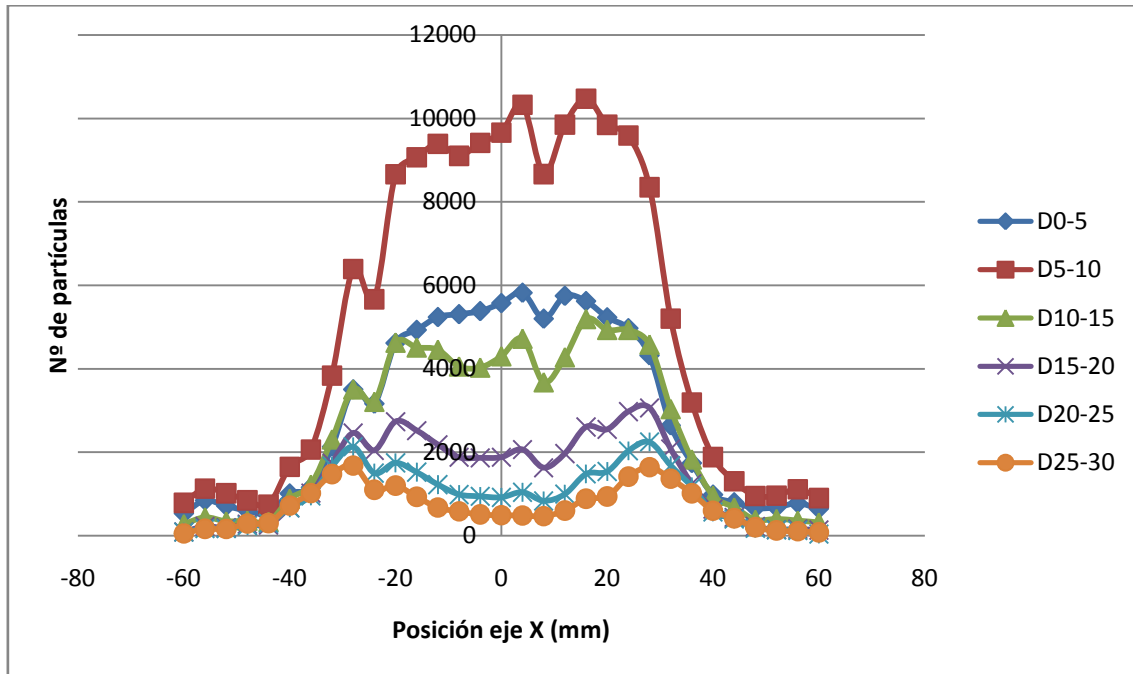


Figura 24. Perfil de concentración de partículas en Z= 60 mm

Por último cabe destacar que de Z= 20 mm a Z= 40 mm y de éste a Z= 60 mm los máximos de concentración de partículas se van abriendo desde la posición X= 16mm hasta X= 28 mm para todas las clases de diámetro aproximadamente.

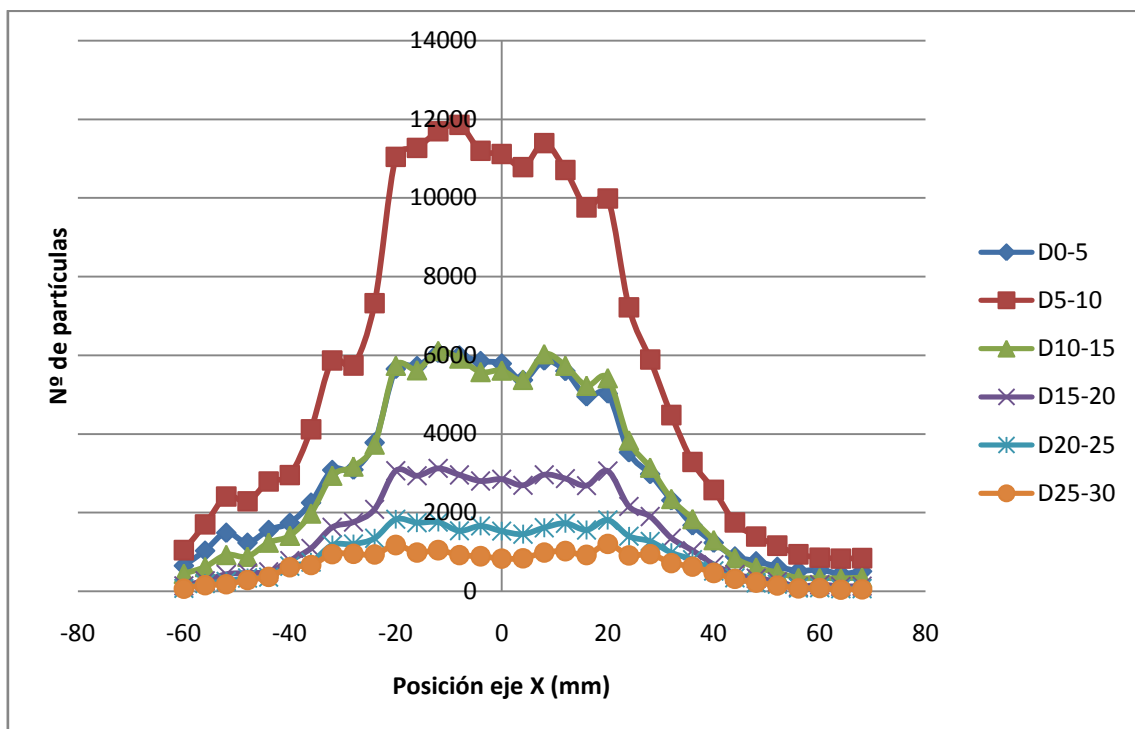


Figura 25. Perfil de concentración de partículas en X=80 mm

4.2.2 Fenómenos de ruptura y coalescencia

A partir de todos los datos de números de partículas se realizó la integral en coronas circulares para obtener la tasa de partículas que atraviesan cada sección. Los datos se reflejan como porcentajes para normalizar los resultados entre secciones.

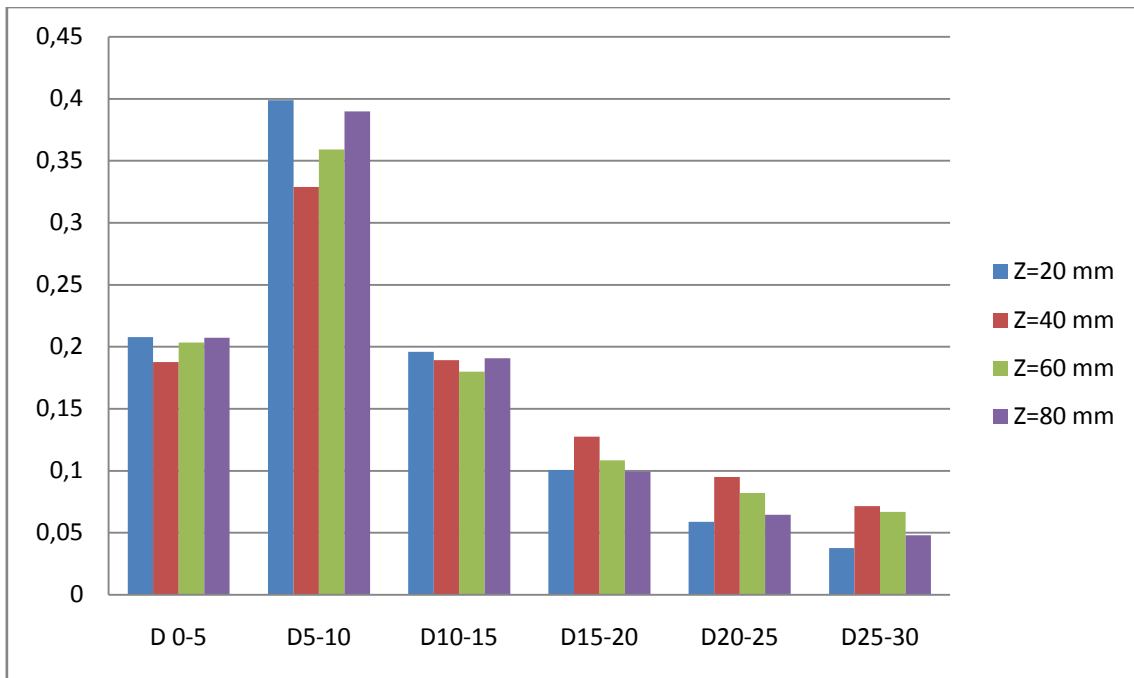


Figura 26. Evolución de % de partículas a lo largo de las secciones y por clases de diámetro

De este modo, tal y como muestra la figura 26, se puede observar que:

- De Z= 20mm a Z= 40 mm, la tendencia dominante es la disminución del número de partículas pequeñas y el aumento del número de partículas grandes, por lo que se puede concluir que en esta zona se pueden estar produciendo fenómenos de coalescencia, es decir, existen gotas pequeñas que se encuentran de forma no violenta con otras, fusionándose y formando una gota de mayor tamaño.
- Entre Z= 40 mm, Z= 60 mm y Z= 80mm, la tendencia dominante es el aumento de gotas de pequeño tamaño y la disminución de gotas grandes, por tanto se podría decir que existen fenómenos de ruptura, donde dos partículas chocan violentamente provocándose una división en partículas más pequeñas.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Este trabajo ha pretendido obtener una primera aproximación del comportamiento de un fluido viscoso (glicerina) en estado de aerosol generado por un atomizador Venturi-Vórtice, caracterizándolo a través de magnitudes como la velocidad y el diámetro de las gotas.

Las conclusiones más destacables de este trabajo son:

- Se ha comprobado que se produce una considerable recirculación de flujo hacia la zona central en este dispositivo atomizador, que influye en gran medida tanto en los perfiles de velocidades como en la concentración de gotas a lo largo de una sección, sobre todo en zonas cercanas a la salida.
- Un alto porcentaje de las gotas del aerosol de glicerina son de pequeño tamaño (inferior a $10\ \mu\text{m}$), hecho que puede ser muy favorable en muchas aplicaciones.
- La posición del tubo de extracción del aire ha podido ser una fuente de errores de medida tanto en velocidades como en concentraciones de flujo en las secciones más cercanas a este.

Trabajo futuro

Sería conveniente que se rediseñara el sistema de extracción de la instalación, para poder descartar esos posibles errores introducidos por el tubo de aspiración, consiguiendo que la zona de medición se vea menos afectada por elementos externos.

Además se podrían estudiar distintas mezclas de agua/glicerina para comprobar cómo influye la viscosidad en el funcionamiento del dispositivo atomizador.

Bibliografía

[1] Esteban Calvo; Juan A. García; José Luis Santolaya; Ignacio García; Luis Aísa. A framework about flow measurements by LDA#PDA as a spatio-temporal average: application to data post-processing. MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY. 23 - 5, pp. 050101 - 059501. 2012. ISSN 0957-0233

[2] L. Aisa; J.A. Garcia; L.M. Cerecedo; I. Garcia Palacin; E. Calvo. Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Applications to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet. INTERNATIONAL JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW. 28 - 2, pp. 301 - 324. 2002. ISSN 0301-9322

[3] Bardin et al. US4201276. May 6, 1980. "Vortex-type oil mist generator"

[4] Bardin et al. US4335804. Jun 22, 1982. "Vortex-type oil mist generator".