



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Área de Mecánica de Fluidos

TRABAJO FIN DE GRADO

Captura de un aerosol de gotas micrométricas mediante electrosprays

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autor: Saníger Pulpillo, Ricardo

Tutor: Dr. González Loscertales, Ignacio

Cotutor: Dr. Hijano Reyes, Antonio Jesús

MÁLAGA, junio de 2023

Resumen

El presente trabajo estudia el proceso físico de la captura de un aerosol de gotas micrométricas de agua mediante electrospray, la cual es una técnica de atomización electro-hidrodinámica. En el presente estudio se ha empleado para generar una nube de gotas monodispersas cargadas eléctricamente de tamaño micrométrico.

El empleo de esta técnica para la captura, recolección o filtración de partículas, bien sólidas o líquidas, ha sido apenas explorado hasta la fecha. Su uso para tal propósito resulta de gran interés debido a que, a diferencia de otras técnicas electro-hidrodinámicas, el electrospray no produce pérdida de presión en la corriente gaseosa ni genera elementos perjudiciales tales como radicales y ozono.

El objetivo del presente trabajo ha sido estudiar el proceso de recolección de las microgotas de agua que componen una corriente de aerosol. Este consiste en lo siguiente: las gotas cargadas de electrospray se depositan en las microgotas de agua, las cuales adquieren carga eléctrica, viéndose empujadas por el campo eléctrico generado hacia un contraelectrodo, donde son capturadas. Para la generación de la corriente de aerosol de gotas micrométricas de agua se ha empleado un nebulizador ultrasónico. Se ha llevado a cabo la caracterización de la corriente, obteniendo su velocidad y concentración.

A lo largo del estudio, se han realizado diversos experimentos modificando parámetros del montaje que podrían tener un impacto significativo en la cantidad recolectada. Por un lado, se han empleado dos disoluciones con distintas conductividades para generar el electrospray. Por otro, se ha variado la velocidad y concentración de la corriente de aerosol.

Se ha concluido que el flujo de masa capturado no se debe sólo a las microgotas de agua que carga el electrospray, sino al cambio en el flujo de gas inducido por estas, más las gotas de agua que son arrastradas por las que sí están cargadas. Además, se determina que resulta crucial garantizar que la totalidad del electrospray generado alcance de manera efectiva la corriente de aerosol. Por último, se considera altamente beneficioso para la eficacia de la recolección lograr una relación óptima entre la velocidad y concentración en la corriente de aerosol de manera que se maximice el número de gotas presentes en la misma.

Palabras clave: electrospray, disolución, cono de Taylor, carga eléctrica, aerosol, captura, conductividad, velocidad, concentración

Abstract

The present study investigates the physical process of capturing an aerosol of micrometric water droplets using electrospray, which is an electro-hydrodynamic atomization technique. In this study, it has been employed to generate a cloud of monodisperse charged droplets of micrometric size.

The use of this technique for the capture, collection, or filtration of solid or liquid particles has been barely explored to date. Its use for such purposes is of great interest because, unlike other electro-hydrodynamic techniques, electrospray does not cause pressure loss in the gas stream or generate harmful elements such as radicals and ozone.

The objective of this study has been to investigate the collection process of the microdroplets composing an aerosol stream. This process involves the following: the charged electrospray droplets are deposited onto the water microdroplets, which acquire electrical charge and are pushed by the generated electric field toward a counter electrode, where they are captured. An ultrasonic nebulizer has been employed to generate the aerosol stream of micrometric water droplets. The characterization of the stream has been carried out, obtaining its velocity and concentration.

Throughout the study, various experiments have been conducted by modifying setup parameters that could have a significant impact on the amount collected. On one hand, two solutions with different conductivities have been used to generate the electrospray. On the other hand, the velocity and concentration of the aerosol stream have been varied.

It has been concluded that the captured mass flow is not solely due to the water microdroplets carried by the electrospray but also to the change in the gas flow induced by them, along with the water droplets entrained by the charged ones. Furthermore, it is determined that ensuring the effective reach of the entire generated electrospray into the aerosol stream is crucial. Lastly, achieving an optimal relationship between velocity and concentration in the aerosol stream is considered highly beneficial for the collection efficiency.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación y objetivo	2
1.3. Estructura del documento	2
2. Estado de la técnica	4
2.1. Técnicas electro-hidrodinámicas. Electrospray.	4
2.1.1. Algunas escalas del electrospray	6
2.2. Generación del aerosol	8
3. Montaje experimental	10
3.1. Montajes	10
3.1.1. Montaje electrospray A	10
3.1.2. Montaje electrospray B	12
3.1.3. Generador del aerosol	14
3.1.4. Montaje global	17
3.2. Disoluciones empleadas para el electrospray	18
3.3. Tamaño de gota del electrospray	19
3.4. Procedimiento experimental	20
4. Resultados	22
4.1. Observaciones iniciales	22
4.2. Reproducibilidad del experimento	24
4.3. Caracterización del aerosol	25
4.4. Primeros experimentos con extractor	27
4.5. Adición del codo. Comparación de distintas disoluciones	29

4.5.1. Disolución B	29
4.5.2. Disolución A	32
4.5.3. Segundo barrido disolución B	34
4.6. Resumen de los resultados	36
4.7. Análisis cualitativo de los resultados	37
5. Conclusiones y trabajo futuro	40
5.1. Conclusiones	40
5.2. Trabajo futuro	40
Anexos	42
I. Medición de la conductividad eléctrica	42
II. Caracterización del aerosol	45

Índice de figuras

1.	Proceso de formación de una gota con la técnica de micro-goteo [10].	4
2.	Filamento líquido emitido desde un cono de Taylor en la técnica de <i>electrospinning</i> [13].	5
3.	Ejemplos de electrospray emitido desde un cono de Taylor estable (izq: [11], centro: [14], derecha: [15]).	6
4.	Esquema del proceso de captura de partículas con electrospray.	6
5.	Rotura de la superficie del líquido en el proceso de atomización ultrasónica [21].	9
6.	Montaje de electrospray A. Ver figura 7 para los detalles.	11
7.	Esquema del montaje A de electrospray.	12
8.	Vista 1 del montaje con extractor.	13
9.	Vista 2 del montaje con extractor.	13
10.	Vista 3 del montaje con extractor.	14
11.	Esquema del montaje B de electrospray con extractor.	14
12.	Generador del aerosol empleado para el presente trabajo.	15
13.	Distribuciones acumulativa y de densidad del tamaño de las gotas del aerosol para distintos voltajes del ventilador.	16
14.	Generador del aerosol empleado sin el codo añadido.	17
15.	Vista 1 del montaje global.	18
16.	Vista 2 del montaje global.	18
17.	Esquema del montaje final.	18
18.	Representación gráfica del valor de conductividad en función del porcentaje en masa de NaCl presente en una disolución de agua destilada + 15% en masa de etanol a una temperatura aproximada de 25°C.	19
19.	Imagen del colector tras 5 minutos cuando no se aplicó electrospray.	23
20.	Imágenes del colector tras 5 minutos cuando se aplicó electrospray.	23
21.	Imagen del cambio de dirección de la corriente de aerosol al interactuar con la nube de gotas de electrospray.	23

22. Velocidad en m/s de las gotas de la corriente de aerosol en función del voltaje de la fuente que alimenta el ventilador.	26
23. Concentración en gotas/m ³ de la corriente de aerosol en función del voltaje de la fuente que alimenta el ventilador.	26
24. Flujo de gotas en la corriente de aerosol por m ² en función del voltaje de la fuente que alimenta el ventilador.	27
25. Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución A y montaje B sin codo en el generador.	28
26. Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución A y montaje B sin codo en el generador.	29
27. Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.	31
28. Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.	31
29. Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución A y montaje B.	33
30. Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución A y montaje B.	33
31. Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.	35
32. Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.	35
33. Representación conjunta de los resultados de todos los experimentos.	36
34. Montaje utilizado para medir la conductividad eléctrica de las disoluciones.	42
35. Esquema del montaje utilizado para medir la conductividad eléctrica de las disoluciones.	43
36. Esquema eléctrico del montaje utilizado para medir la conductividad de las disoluciones.	44
37. Montaje utilizado para grabar la corriente del aerosol.	45
38. Imagen del tubo de acero colocado a la salida del tubo.	46
39. Esquema del montaje utilizado para grabar la corriente del aerosol.	46
40. (a) Ejemplo de una imagen sin procesar. (b) Ejemplo de la imagen tras haber pasado el proceso de binarización.	47

Índice de tablas

1.	Diámetro estimado de las gotas de electrospray en función de la disolución utilizada.	20
2.	Resultados obtenidos en los experimentos de reproducibilidad.	24
3.	Valores de gramos por minuto y gotas por segundo de la corriente de aerosol.	37
4.	Análisis de la captura con la disolución A.	39
5.	Análisis de la captura con la disolución B.	39

1. Introducción

1.1. Introducción

El presente trabajo estudia el proceso físico de la captura de un aerosol de gotas micrométricas de agua mediante electrospray.

La técnica de electrospray es un método utilizado para la producción de partículas cargadas eléctricamente de tamaño muy pequeño, tanto sólidas como líquidas. Su aplicación principal se encuentra en la espectrometría de masas [1], si bien también se utiliza en la fabricación de materiales avanzados [2] y en la industria farmacéutica [3], entre otros. Sin embargo, una rama hasta ahora apenas explorada es la utilización de electrospray para la recolección o filtración de partículas, bien sólidas o líquidas, suspendidas en gas.

El uso de la técnica de electrospray para tal propósito resulta de gran interés debido a que, a diferencia de otros métodos empleados en la filtración de corrientes de gases, las técnicas electro-hidrodinámicas no producen pérdida de presión en la corriente gaseosa. Entre ellas, la técnica habitualmente utilizada es la generación de descarga de corona en el gas, la cual da lugar a la formación de elementos perjudiciales tales como radicales y ozono. El electrospray, por el contrario, carece de esta desventaja, lo que lo convierte en una técnica sumamente prometedora.

Uno de los primeros en proponer el electrospray para la recolección de determinadas partículas fue John B. Fenn en 2004 [4]. Su patente describe un dispositivo de muestreo de aire que utiliza la técnica de electrospray para ionizar moléculas polares presentes en la corriente de aire y recogerlas dirigiéndolas hacia una superficie cargada eléctricamente, permitiendo la detección de contaminantes y agentes biológicos en situaciones de seguridad pública.

En 2007, Gary Tepper [5] presentó una nueva tecnología de purificación de aire basada en electrospray que no produce ozono como subproducto ni caída de presión. El proceso es similar al patentado por John B. Fenn. El electrospray genera una nube de microgotas cargadas eléctricamente. Estas se depositan en las especies polares y polarizables de la corriente de aire contaminado, transfiriéndoles así la carga. Una vez cargadas, son extraídas gracias al campo eléctrico, depositándose sobre una superficie metálica. Las pequeñas gotitas acuosas de electrospray se evaporan completamente, de modo que el proceso es esencialmente seco y no se recoge ni se recircula disolvente líquido. Los resultados de las mediciones indican que el sistema proporciona una elevada eficacia de purificación del aire en una amplia gama de tamaños de partículas y de caudales de aire. Gracias a su bajo consumo de energía y líquido, puede ampliarse para purificar cantidades de aire arbitrariamente grandes.

Posteriormente, en 2012, la NASA publicó otro artículo [6], el cual se centra en la utilización de electrospray para la captura de polvo lunar. En dicho estudio, se examinan las posibilidades de esta técnica para recolectar partículas de tamaño microscópico en ambientes de baja gravedad, como la superficie lunar. Se

destaca que aunque algunos procesos de filtración de alta eficiencia, como los filtros HEPA, pueden eliminar una fracción mayor (>99.9 por ciento) de las partículas, esto puede no ser apropiado desde el punto de vista general, especialmente en vista de los grandes requerimientos de energía que demandan dichos filtros. La nueva tecnología de captura de partículas por electrospray se describe como una variante de la precipitación electrostática que elimina las desventajas actuales de esta técnica. El enfoque reemplaza el campo propenso a la corona con una niebla de microgotas altamente cargadas generadas por electrospray como el mecanismo por el cual las partículas entrantes son atraídas y capturadas.

Recientemente fue publicado otro estudio [7] en el cual, tras haber puesto de manifiesto la pandemia COVID-19 la necesidad de mejorar la capacidad de vigilancia de las enfermedades infecciosas transmitidas por el aire, se propone un sistema de alerta temprana para pandemias que utiliza una red distribuida de muestreadores de aire. En este estudio, se demuestra la eficacia del electrospray en la recolección de nanopartículas de oro y plata, lo que sugiere que esta técnica podría ser una opción efectiva para recoger y analizar muestras de aire en busca de patógenos y otros contaminantes.

1.2. Motivación y objetivo

Aunque el uso de la técnica de electrospray para la captura de partículas ha sido limitado hasta la fecha, se reconoce que es un método prometedor para esta tarea. Tiene el potencial de ser utilizado no solo en la captura de polvo lunar y partículas contaminantes, sino para recolectar polvo biológico, para filtración, e incluso para aplicaciones militares.

Por todo lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo se pretende estudiar el proceso de recolección de partículas suspendidas en aire mediante la técnica de electrospray. Para ello, se ha forzado a que se crucen las gotas del electrospray con una corriente de un aerosol de gotas micrométricas de agua, las cuales se pretende capturar. Para la generación de dicha corriente se ha utilizado un nebulizador ultrasónico. Cuando las gotas de electrospray se depositan en la superficie de las gotas de agua, estas adquieren carga eléctrica, viéndose empujadas por el campo eléctrico hacia el contraelectrodo o colector, donde son capturadas.

Se han realizado diversos experimentos modificando distintos parámetros del montaje que podrían tener un impacto significativo en la cantidad de partículas capturadas, como la conductividad de la disolución empleada para la formación del electrospray o la velocidad de la corriente del aerosol.

1.3. Estructura del documento

En el siguiente capítulo 2, se desarrolla el estado de la técnica. En él se definen y explican algunas de las técnicas electro-hidrodinámicas más utilizadas hoy en día, profundizando en el electrospray (capítulo 2.1), incluyendo un breve apartado teórico (capítulo 2.1.1) en el que se exponen las ecuaciones que rigen aproximadamente la técnica. Además, se discuten distintos métodos de generación de aerosoles (capítulo 2.2).

En el capítulo 3, se ofrece una descripción de los montajes experimentales empleados en el transcurso de la investigación. En esta sección se detallan los equipos y elementos utilizados, así como las metodologías y procedimientos implementados en la ejecución de las pruebas experimentales.

En el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos durante el estudio, los cuales se exponen y discuten en profundidad.

Finalmente, en el capítulo 5, se exponen las conclusiones y las posibles líneas de investigación futuras que surgen a partir de este trabajo.

2. Estado de la técnica

2.1. Técnicas electro-hidrodinámicas. Electrospray.

Las diferentes técnicas de atomización electro-hidrodinámica son hoy en día de uso común en numerosos campos de la tecnología y su interés aumenta, además, porque su uso permite obtener estructuras de dimensiones nanométricas que son de aplicación directa en Nanotecnología y en campos relacionados, como la Biotecnología y la Tecnología de Materiales.

El proceso de atomización electro-hidrodinámica (EHD) se observa cuando un líquido conductor se alimenta a través de una aguja muy fina, que se encuentra conectada a alto voltaje respecto a un contra-electrodo [8]. El campo eléctrico generado induce fuerzas electrostáticas lo suficientemente intensas en el líquido como para llegar a vencer a las fuerzas de tensión superficial, dando lugar en la punta de la aguja a un menisco electrificado.

La forma y rotura del menisco electrificado depende de propiedades del líquido, como la tensión superficial, la viscosidad, la densidad y la conductividad eléctrica, así como del diámetro del capilar, el potencial eléctrico y el caudal [9]. Diferentes rangos de estas magnitudes permiten la generación de determinados modos de EHD, como el modo de *microdripping* o micro-goteo o el modo *cone-jet*, que da lugar a su vez al electrohilado o *electrospinning* y al electrospray, entre otros.

En el modo de micro-goteo (figura 1) el menisco se alarga hasta romperse formando una gota de diámetro menor que el diámetro del conducto en el que está anclado, repitiéndose este evento periódicamente [10], dando lugar a un tren de gotas de similar tamaño.

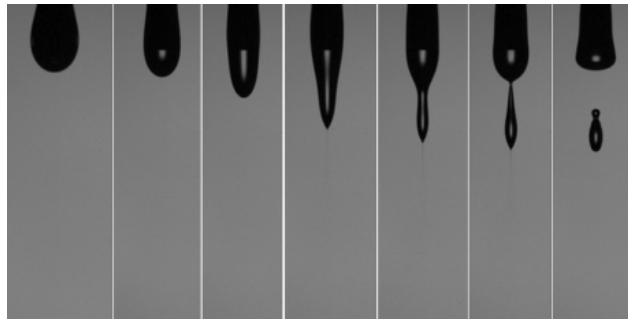


Figura 1: Proceso de formación de una gota con la técnica de micro-goteo [10].

Determinadas condiciones favorecen la aparición del modo *cone-jet*, en el cual el menisco adopta una forma cónica, denominada cono de Taylor, del cual se emite un chorro muy fino que termina rompiéndose, formando una nube de gotas cargadas monodispersas de tamaño micrométrico o incluso nanométrico (figura 3) [11].

El modo *cone-jet* puede dar lugar al *electrospinning*, en el cual se utiliza una disolución polimérica. Si

la evaporación del disolvente es más rápida que el tiempo que tarda el chorro emitido del cono en romperse, se forma un hilo sólido de polímero, dando como resultado fibras más finas que el diámetro del conducto utilizado [12](figura 2). Aunque existen muchos métodos para fabricar nanofibras, este es quizás el proceso más versátil, consiguiéndose fabricar nanofibras de materiales compuestos que incorporan polímeros.

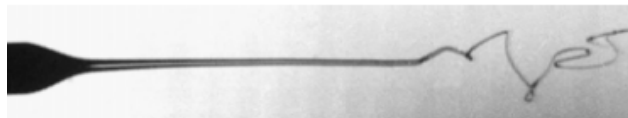


Figura 2: Filamento líquido emitido desde un cono de Taylor en la técnica de *electrospinning* [13].

Como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo se ha empleado la técnica de electropray, en la que, a diferencia del *electrospinning*, siempre se genera una nube de gotas micrométricas cargadas, derivada de la rotura del fino chorro emitido desde el cono de Taylor.

El electropray es una herramienta que ha sido ampliamente utilizada y sigue siendo de interés en varios campos de la comunidad científica. Como publica Matthias Wilm [1], la ionización por electropray es hoy en día la técnica de ionización más utilizada en el análisis químico y bioquímico. Interconectada con un espectrómetro de masas permite la investigación de la composición molecular de muestras líquidas. Con el electropray se puede ionizar una gran variedad de sustancias químicas. No hay limitación de masa lo que permite incluso la investigación de grandes complejos proteicos no covalentes.

Por otra parte, cuando se utiliza una solución que contiene polímeros, se obtienen partículas sólidas de tamaño reducido, desde la escala micrométrica hasta la nanométrica, dependiendo de las propiedades del líquido y de las condiciones de funcionamiento. Por ello, el electropray está ganando interés en la investigación en campos como el farmacéutico. Por ejemplo, Woojin Kim y Sang Soo Kim [3], describen un sistema de electropray que incorpora un dispositivo de capilaridad triaxial para fabricar cápsulas biodegradables de varias capas para su uso como sistema de suministro de fármacos.

En el presente trabajo se empleó el electropray para capturar un aerosol de microgotas de agua. Con dicho fin, se ha forzado a que se crucen las gotas del electropray con la corriente del aerosol de gotas micrométricas de agua. Cuando las gotas de electropray se depositan en la superficie de las gotas de agua, estas adquieren carga eléctrica, viéndose empujadas por el campo eléctrico hacia el contraelectrodo o colector, donde son capturadas (figura 4).

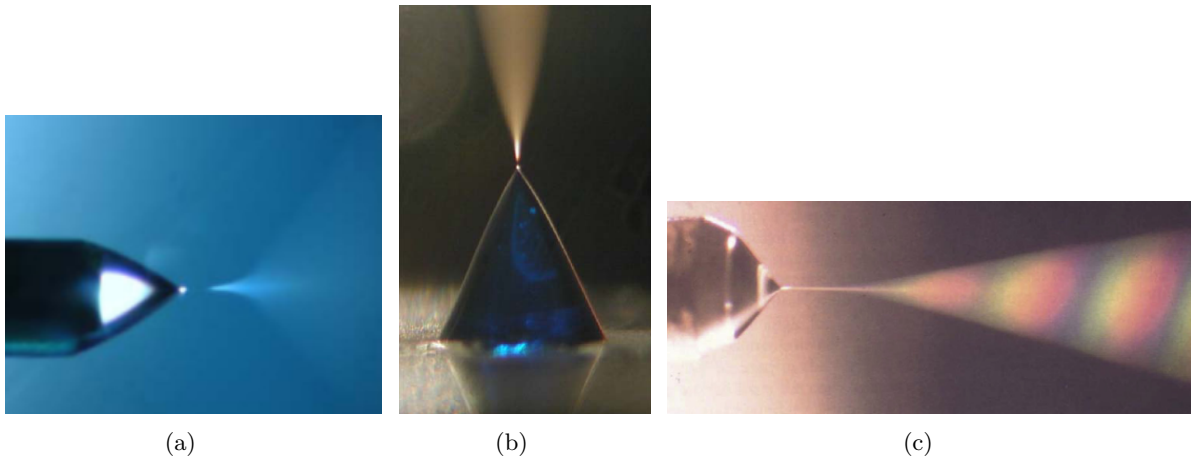


Figura 3: Ejemplos de electrospray emitido desde un cono de Taylor estable (izq: [11], centro: [14], derecha: [15]).

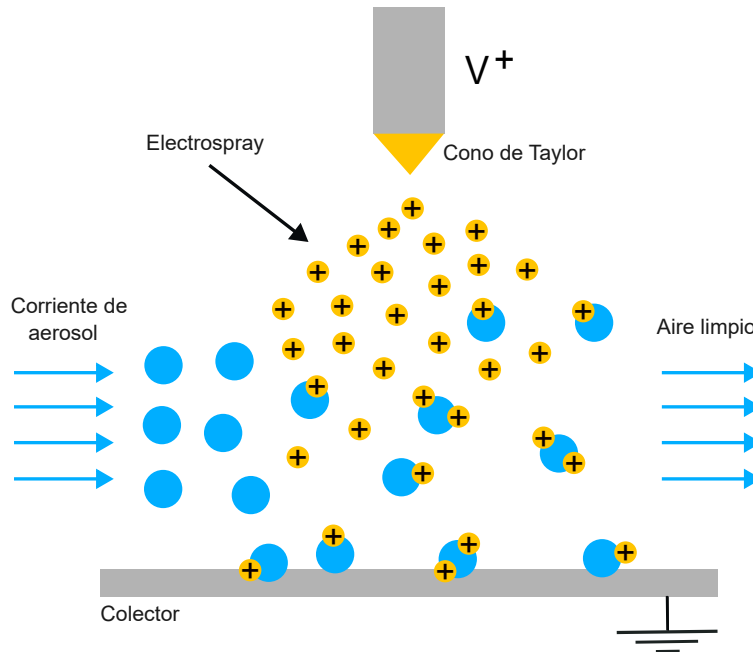


Figura 4: Esquema del proceso de captura de partículas con electrospray.

2.1.1. Algunas escalas del electrospray

En este capítulo se presenta una breve exposición de las ecuaciones que gobiernan aproximadamente los parámetros más significativos en el electrospray, justificando así determinados cambios realizados en el montaje a lo largo del estudio.

Con el propósito de mejorar la eficiencia de la captura por medio de electrospray, resulta imprescindible garantizar que el tamaño de las gotas producidas sea significativamente menor al de las partículas

del aerosol, con una diferencia de al menos 10 veces. La justificación de este requisito radica en que, en caso de que las microgotas generadas sean similares en tamaño a las partículas del aerosol, se dificulta la colisión entre ellas en mayor medida que si las gotas son más pequeñas. Por ende, el diámetro de las gotas emitidas por el cono del electrospray juega un rol fundamental y debe ser rigurosamente controlado. No obstante, la generación de gotas tan pequeñas con electrospray conlleva ciertas desventajas, como la necesidad de un caudal extremadamente bajo, difícil de lograr mediante bombas de jeringa convencionales y que se traduce en una producción muy limitada. Asimismo, los montajes para caudales tan reducidos resultan complejos, requiriendo elementos de dimensiones mínimas para evitar volúmenes muertos que den lugar a procesos transitorios demasiado largos.

El caudal y el tamaño de gotas generado se relacionan a través de la siguiente ley de escala (1), obtenida por J. Fernández de la Mora e Ignacio G. Loscertales en 1994 [16], que establece la relación aproximada entre el radio r de las gotas de spray, el caudal Q y el tiempo de relajación eléctrica t_e :

$$r^* \sim (Q t_e)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

donde el tiempo de relajación eléctrica t_e es inversamente proporcional a la conductividad de la disolución utilizada según la siguiente expresión:

$$t_e = \frac{\epsilon \epsilon_0}{K}, \quad (2)$$

donde,

ϵ : constante dieléctrica del líquido

ϵ_0 : permitividad dieléctrica del vacío = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

K : conductividad eléctrica del líquido, en S/m

El tiempo de relajación eléctrica en un volumen de líquido se define como el tiempo necesario para que, sometido este a una carga eléctrica en un punto determinado, las cargas eléctricas se distribuyan a lo largo del mismo logrando la equipotencialidad. Aplicado al presente caso, es el tiempo que tardan las cargas eléctricas en alcanzar toda la superficie del menisco, provocando que el campo en el interior de este sea nulo.

Por otro lado, con el objetivo de tener un valor referencia del caudal, se tiene la segunda ley de escala (3), de la que se obtiene una aproximación del caudal mínimo necesario para que se forme el cono de Taylor en función de las propiedades de la disolución:

$$Q_{min} \sim \frac{\gamma}{\rho} t_e \sim \frac{\gamma \epsilon \epsilon_0}{\rho K}, \quad (3)$$

donde,

γ : tensión superficial de la disolución, en N/m

ρ : densidad de la disolución, en kg/m³

Se puede afirmar que el tamaño de las gotas para líquidos conductores poco viscosos está determinado por el caudal y el tiempo de relajación eléctrica, los cuales a su vez dependen de diversas propiedades de la disolución. En general, muchas de estas propiedades, como la tensión superficial o la densidad, son relativamente constantes en disoluciones compuestas principalmente por agua destilada. No obstante, la conductividad es una excepción a esta regla. Esta propiedad es altamente variable y puede hacerlo ampliamente, lo que permite que el tamaño de las gotas también varíe significativamente. Al agregar una pequeña cantidad de sal a la disolución, se aumenta significativamente su conductividad, lo que disminuye el caudal necesario para formar el cono de Taylor y resulta en gotas más pequeñas.

En resumen, la conductividad de la disolución se considera un factor esencial para la carga de las microgotas de agua del aerosol y, en consecuencia, para la captura de las mismas, ya que el tamaño de las gotas producidas por el electro spray, fundamental en la captura, depende del valor de dicha propiedad.

2.2. Generación del aerosol

El aerosol objeto del trabajo estará formado por una nube de gotas micrométricas, cuya generación es relativamente sencilla. En la producción de este tipo de aerosoles es necesario utilizar un método de atomización que permita la creación de microgotas y aumente su velocidad para crear una corriente. En este contexto, se mencionan brevemente en esta sección los métodos más utilizados de atomización y se explica la selección del que se ha empleado para el presente trabajo.

El proceso de atomización consiste en disgregar un volumen de líquido en gotas. Es de gran importancia en numerosos procesos industriales y otras aplicaciones. Entre sus usos se puede citar la dispersión de combustibles líquidos para su posterior combustión, la pulverización de pintura, el secado por aspersión, y muchos otros [17]. Existen muchos métodos de atomización, buena parte de ellos basan su funcionamiento en lograr una elevada velocidad relativa entre el líquido y una corriente de aire o gas que le rodea, mientras que otros utilizan la generación de movimiento vibratorio o de campos electrostáticos [18]. Los más utilizados son los atomizadores por presión, por aire, de rotación y los ultrasónicos.

En el caso de los atomizadores de presión, se aplica una alta presión sobre el líquido, esta se convierte en energía cinética, aumentando su velocidad. El líquido es descargado al ambiente a través de una pequeña abertura, pulverizándose en su expansión. Este tipo de sistema de atomización es bastante sencillo pero poco flexible para trabajar en amplios rangos de funcionamiento, ya que las variaciones de caudal se relacionan con una variación del cuadrado de la presión [18].

Una variante de los atomizadores por presión son los atomizadores de rotación. Este método se utiliza para líquidos con alta viscosidad y se basa en la aplicación de fuerza centrífuga al líquido a través de un rotor

giratorio. El líquido se dispersa en pequeñas gotas debido a la fuerza centrífuga [19].

También se puede lograr la atomización de un líquido mediante el uso de una corriente de aire con una velocidad significativa, lo cual ocasiona la ruptura de la superficie del líquido en partículas de menor tamaño (fenómeno conocido como atomización por aire) [20].

En el presente estudio se ha utilizado la atomización ultrasónica, la cual consiste en aplicar al líquido energía ultrasónica generada por un material piezoeléctrico excitado con una señal eléctrica a frecuencias en el rango de MHz. En este proceso, las ondas ultrasónicas viajan a lo largo del líquido hasta que alcanzan la superficie, donde se focalizan, rompiendo la misma, y generando las gotitas (figura 5) [21].

La atomización ultrasónica es muy conveniente para este trabajo porque puede generar gotas con diámetros de unas pocas micras, lo que favorece que puedan ser fácilmente arrastradas por una corriente de aire, y con una distribución de tamaños relativamente estrecha. Además, a diferencia de las boquillas de fluido gemelas, en la atomización ultrasónica, la generación de gotas y el transporte son procesos desacoplados. Las gotitas se expulsan de la superficie del líquido a velocidades muy bajas, por lo que conducir las con una corriente de gas es relativamente sencillo [22]. Otro de los motivos por los que se ha decidido emplear un atomizador ultrasónico es su fácil ensamblaje, para el cual se requieren elementos no demasiado complicados comparados con los necesarios para montar otros tipos de atomizadores.

En el capítulo 3.1.3, se presenta el atomizador utilizado durante el estudio, detallando los distintos elementos que lo componen.

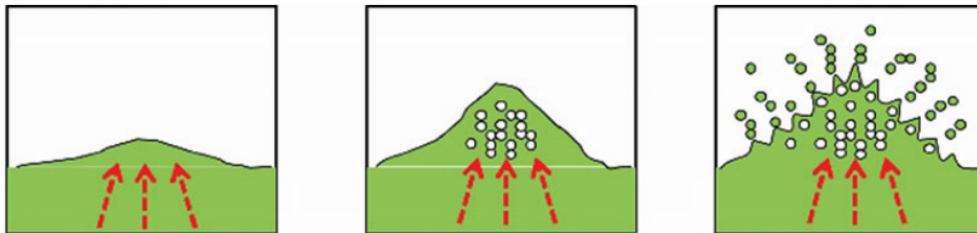


Figura 5: Rotura de la superficie del líquido en el proceso de atomización ultrasónica [21].

3. Montaje experimental

En el presente apartado se describe de manera detallada el montaje experimental principal utilizado para la captura de las gotas de agua así como las disoluciones empleadas para hacer el electrospray. El resto de montajes, como los utilizados para las medidas de la conductividad de la disolución o la velocidad de las gotas del aerosol, se describen en los anexos correspondientes.

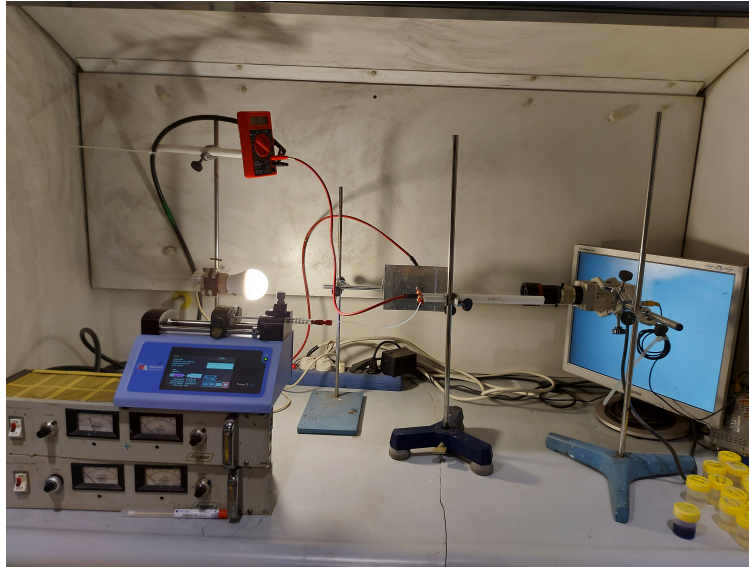
3.1. Montajes

Se ha determinado dividir la descripción del montaje en tres partes, una primera en la que se detalla lo necesario para los dos montajes de electrospray utilizados, una segunda parte donde se describe el sistema empleado para la generación de las gotas de agua y, finalmente, una tercera que abarca el montaje global compuesto por los dos anteriores.

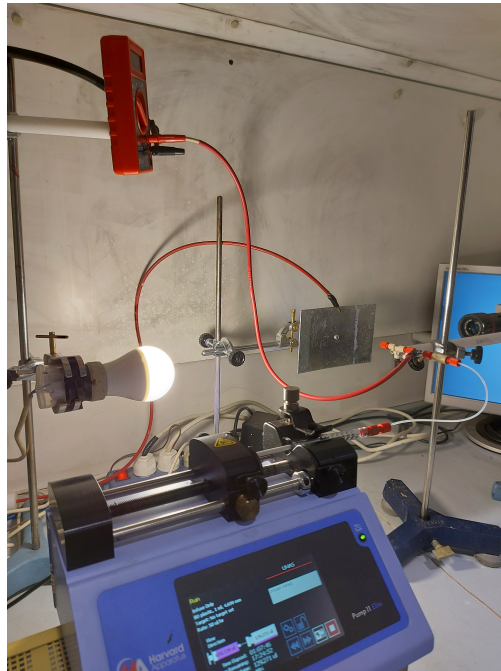
3.1.1. Montaje electrospray A

El montaje necesario para llevar a cabo la técnica de electrospray está compuesto por los siguientes elementos fundamentales: una bomba de jeringa que proporcione el caudal deseado, una fuente de alto voltaje para cargar eléctricamente la disolución y un contraelectrodo, que en este caso actuará como colector, vital para la creación del campo eléctrico. Además, para que sea posible la visualización del cono de Taylor es imprescindible una cámara de vídeo, situando en frente de ella una fuente de luz de tal manera que la cámara capte la sombra proyectada por el cono. Con el fin de medir la intensidad de corriente transportada por el electrospray, se coloca en serie con la fuente de voltaje un polímetro.

A continuación se muestran dos fotos del montaje A (figura 6), acompañadas de la figura 7, en la que se muestra un esquema simple del mismo. Se puede observar como se conecta el voltaje positivo de la fuente de alto voltaje al polímetro, el cual, a su vez, está conectado en serie a un tubo metálico por el que circula la disolución proveniente de la jeringa debidamente colocada en la bomba. La disolución llega a la aguja, en cuya punta se forma el cono de Taylor y, posteriormente, las gotas monodispersas, transportadas por el campo eléctrico, se depositan en el colector, conectado al voltaje negativo o tierra de la fuente. Cabe mencionar que, aunque las fotos muestran el electrospray aplicado de manera horizontal, en el esquema se muestra en posición vertical debido al cambio realizado para los posteriores experimentos de captura.



(a)



(b)

Figura 6: Montaje de electrospray A. Ver figura 7 para los detalles.

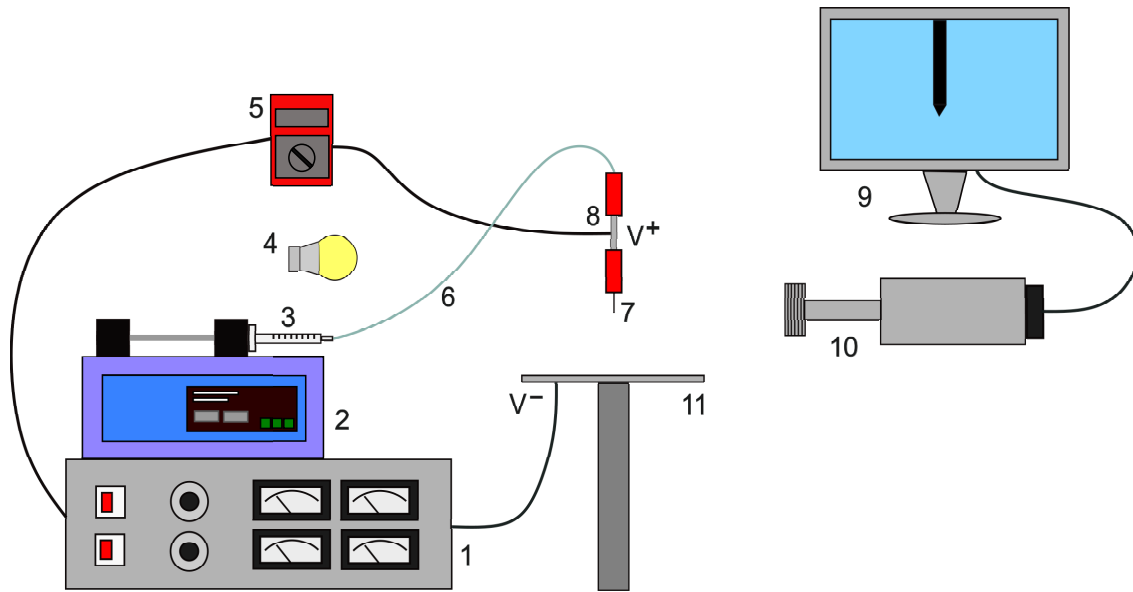


Figura 7: Esquema del montaje A de electro spray.

Lista de elementos del montaje:

- 1: Fuente de alto voltaje. Marca *Acopian*, modelo fuente positiva: *PO30HP1-230*, modelo fuente negativa: *NO30HP2-230*
- 2: Bomba de jeringa. Marca: *Harvard Apparatus*, modelo *Pump 11 Elite*
- 3: Jeringa de 1 mL
- 4: Fuente de luz (bombilla)
- 5: Polímetro
- 6: Tubo de sílica de diámetros interior/exterior 100/363 μm
- 7: Aguja de acero de diámetros interior/exterior 159/312 μm
- 8: Tubo de acero AISIS 304. Diámetros interior/exterior 500/800 μm
- 9: Monitor para visualizar el cono
- 10: Cámara de vídeo
- 11: Colector o contraelectrodo: lámina de metacrilato recubierta de papel de aluminio

3.1.2. Montaje electro spray B

Con el propósito de mejorar el proceso de captura, se pretendió aislar la formación del electro spray de la nube de gotas del aerosol. En otras palabras, se ha buscado asegurar que el cono de Taylor siempre esté

montado y que la generación de gotas de electropray sea constante, independientemente de si la corriente de aerosol está activa o no.

Para alcanzar esta meta, se decidió incorporar al montaje previo un componente adicional que se denominará extractor. El extractor es una pieza idéntica al colector, pero con un pequeño agujero de 1 cm de diámetro. Se conecta a tierra y se ubica a la misma altura que la aguja del electropray, haciendo coincidir el agujero con la aguja (figura 8), permitiendo que las gotas del electropray pasen. De esta manera, el extractor es el único elemento encargado de que el cono de Taylor se monte correctamente, sin que interfiera el colector, a la vez que se protege la punta de la aguja de posibles gotas del aerosol que pudieran perturbar la estabilidad del cono. Otra razón fundamental por la que se dispuso el extractor es que el colector se conecta a alto voltaje negativo, creando un campo eléctrico entre él y el extractor, conectado a tierra, en la zona donde las gotas de electropray se cruzan con las del aerosol, para que estas, una vez cargadas, se sigan viendo transportadas hacia el colector.

Finalmente, se añade otro polímetro para medir la intensidad de corriente que se escapa al extractor. Al estar la aguja tan cerca de él, es probable que algunas gotas de electropray se vean atraídas y no lleguen a cruzarse con la corriente de aerosol, sino que tras pasar por el agujero, se vean atraídas hacia el extractor. Ello significa que la corriente que emite el cono de Taylor será mayor que la que posteriormente tengan las microgotas de electropray que se cruzan con las de agua. Es esencial conocer este dato con el fin de saber qué parte de la corriente total se está perdiendo y no llega a interactuar con el aerosol.

Las imágenes del montaje del extractor y el esquema del mismo (11), ilustran claramente esta nueva configuración.

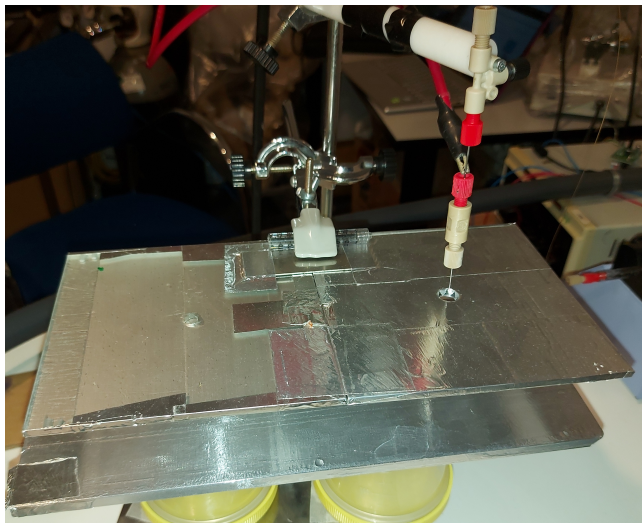


Figura 8: Vista 1 del montaje con extractor.

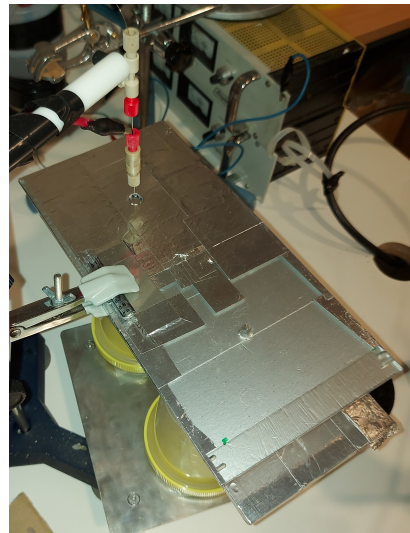


Figura 9: Vista 2 del montaje con extractor.

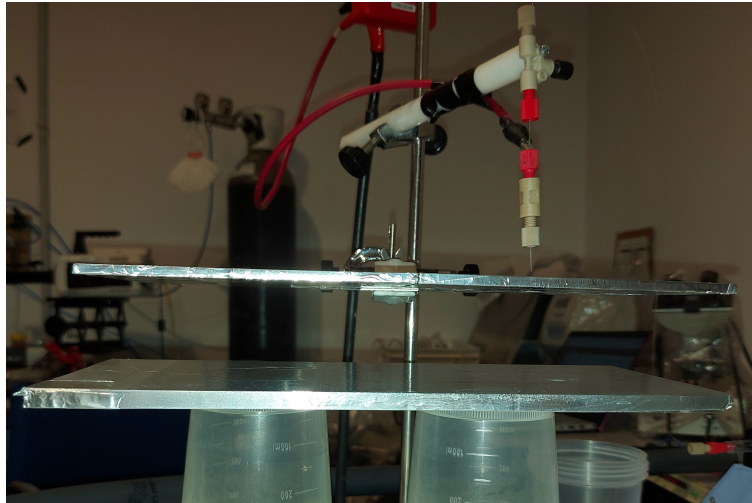


Figura 10: Vista 3 del montaje con extractor.

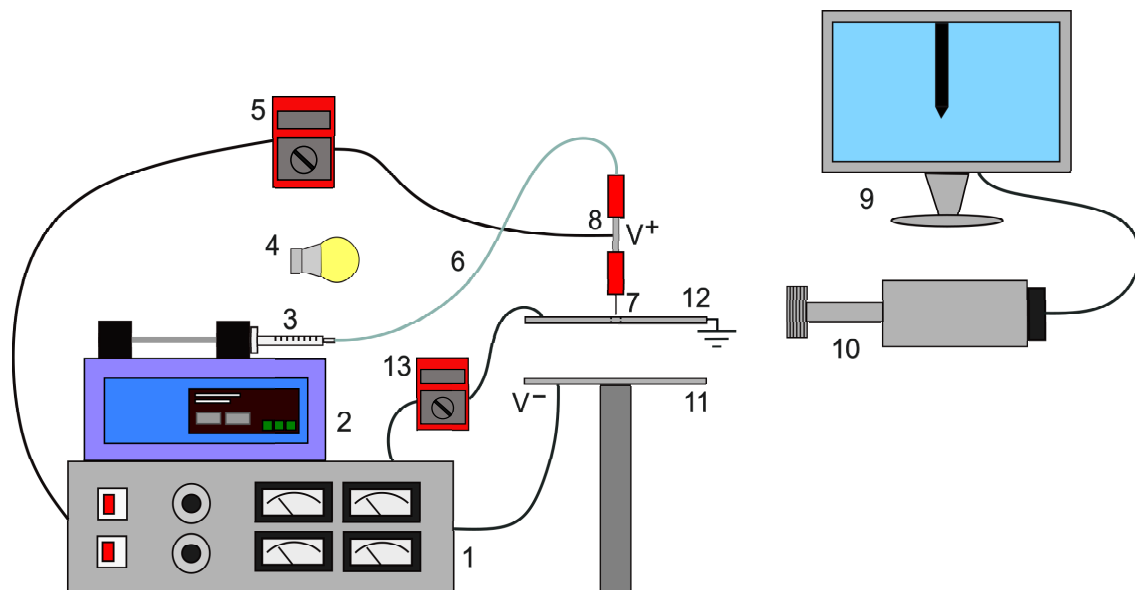


Figura 11: Esquema del montaje B de electro-spray con extractor.

Elementos añadidos:

- 12: Extractor
- 13: Polímetro

3.1.3. Generador del aerosol

En este apartado se describe en detalle el sistema utilizado para la generación del aerosol.

La teoría fundamental de un atomizador ultrasónico se basa en la generación de ondas ultrasónicas por medio de un componente piezoeléctrico. Dichas ondas viajan hasta la superficie del fluido, donde se enfocan para romper la misma, lo cual da origen a las gotas. En el contexto del presente estudio, se implementó un atomizador en el cual el transductor piezoeléctrico (marca *Johnson Matthey*, modelo *LIQUIFOG*) se ubica en el fondo de un pequeño depósito de agua. Este diseño facilita la generación de gotas, aunque se requiere de una corriente gaseosa para la creación del aerosol.

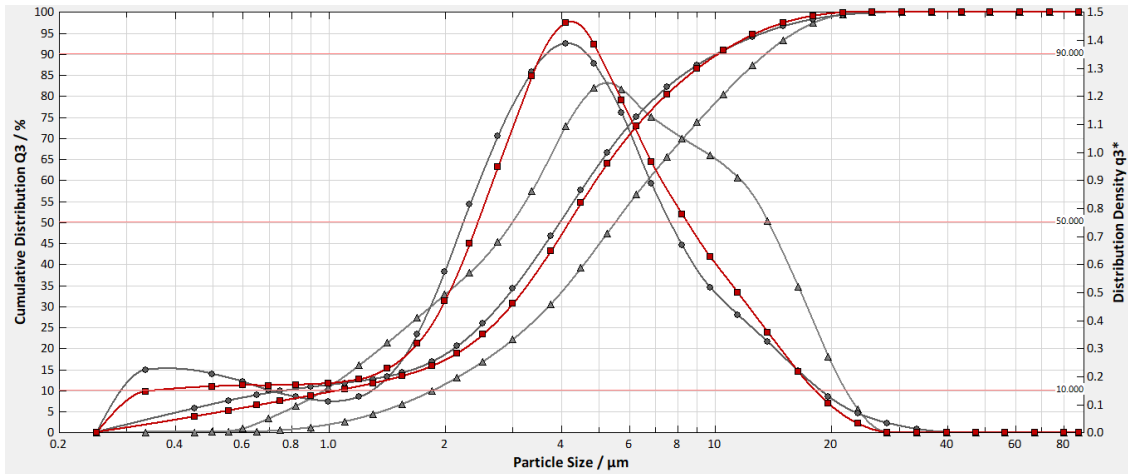
Con ese fin, se incorporaron un ventilador (marca *Micronel Ag*, modelo *D301L-024GK-2*) y un tubo de diámetro interior de 1 cm, en la parte superior del depósito. Una vez se producen las gotas, estas son arrastradas por el ventilador hacia el tubo, donde salen al exterior. El principal beneficio de esta configuración es que las gotas más pesadas no son arrastradas por la fuerza del aire del ventilador. De este modo, se logra que la corriente de aerosol se componga predominantemente de gotas de tamaño muy reducido. En este caso, se midió el tamaño de las gotas empleando un láser de difracción de la empresa SYMPATEC, modelo HELOS/KF. Como se puede observar en la figura 13, se tomaron medidas para distintos voltajes del ventilador lo que equivale a distintas velocidades de las gotas del aerosol. Se puede apreciar como la variación de voltaje y, de forma indirecta la velocidad del aire impulsado por el ventilador, no tiene un impacto significativo, obteniéndose un tamaño de gota de unos 4 μm .

Cabe mencionar que el ventilador opera mediante su conexión a una fuente de voltaje (marca *MLINK*, modelo *PS3005-3D*), que permite controlar la velocidad de rotación del mismo. El rango de voltaje disponible para este propósito abarca desde 0 a 24 voltios. A medida que se incrementa el voltaje aplicado, se aumenta la velocidad del ventilador, lo que se traduce en una mayor velocidad de salida de las gotas a través del tubo.

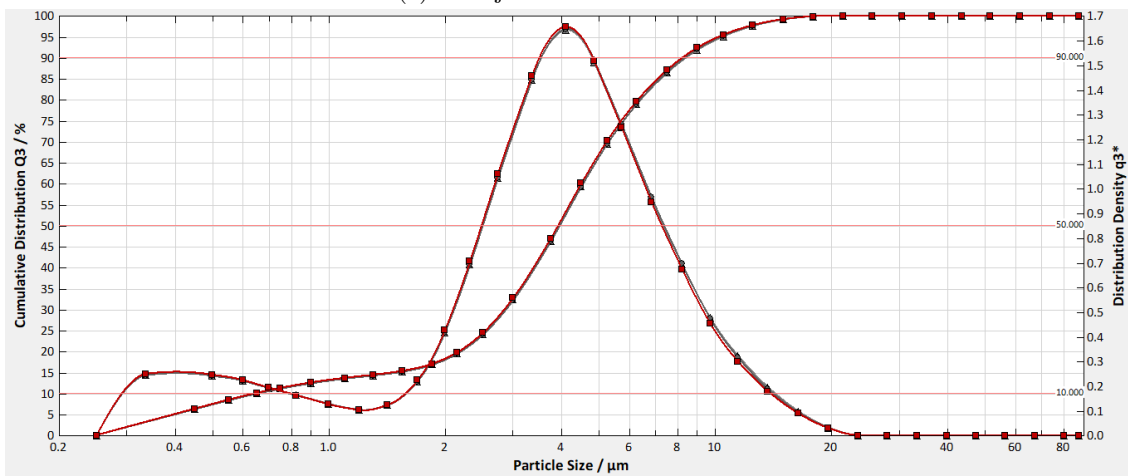
Es preciso destacar que, tal como se puede apreciar en la imagen 12, se ha delimitado una línea discontinua en el depósito con el fin de indicar el nivel aproximado de agua requerido para optimizar el desempeño del generador y garantizar la uniformidad en el tamaño de las gotas en todo momento.



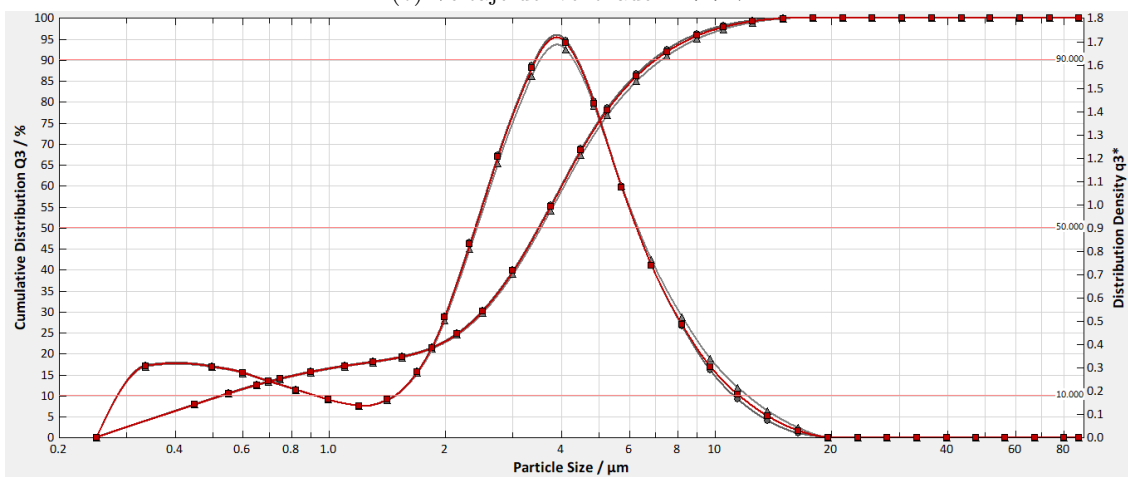
Figura 12: Generador del aerosol empleado para el presente trabajo.



(a) Voltaje del ventilador: 6.3 V



(b) Voltaje del ventilador: 17.7 V



(c) Voltaje del ventilador: 21.8 V

Figura 13: Distribuciones acumulativa y de densidad del tamaño de las gotas del aerosol para distintos voltajes del ventilador.

Si bien esta configuración del generador tal y como se muestra en la imagen 12 fue utilizada en la mayoría de los experimentos, es importante señalar que en un principio el tubo se insertaba directamente en el depósito, no se había añadido el codo, como se puede observar en la imagen 14. En algunos casos, para colocar el tubo en la posición deseada, se debía ajustar doblándolo, lo que cambiaba su pendiente y provocaba una corriente del aerosol de diferentes características. Es decir, la concentración de gotas dependía de la posición relativa del tubo. Con la finalidad de evitar esta variación y establecer unas condiciones de salida de la corriente del aerosol que dependieran únicamente del voltaje del ventilador, se añadió el codo al montaje, lo que permitía ajustar el tubo siempre de la misma forma.



Figura 14: Generador del aerosol empleado sin el codo añadido.

3.1.4. Montaje global

En este apartado se muestran las imágenes correspondientes al montaje final (figuras 15 y 16), en el cual se terminan de acoplar todos los elementos requeridos para el experimento. Por razones de claridad y simplicidad, en el esquema del montaje (figura 17) aparecen solo los elementos principales.

Las distancias comprendidas entre determinados elementos del montaje deben ser tenidas en cuenta dado que pueden hacer variar los resultados de los experimentos. A excepción de algún experimento en concreto en el cual las medidas fueron cambiadas y será debidamente explicado en el apartado 4 de resultados, las distancias y posiciones de elementos más significativas fueron las siguientes: aproximadamente 4.5 cm de distancia vertical entre extractor y colector. El tubo del nebulizador ultrasónico se colocaba entre el extractor y el colector, haciendo coincidir su final con el comienzo de estos, tal y como se muestra en el esquema (figura

17), de manera que la distancia entre el tubo y la aguja fuera siempre la misma, 7.3 cm. La aguja se colocó en el medio del agujero del extractor y a una distancia vertical (altura) del mismo de aproximadamente el radio de este, es decir, unos 0.5 cm.

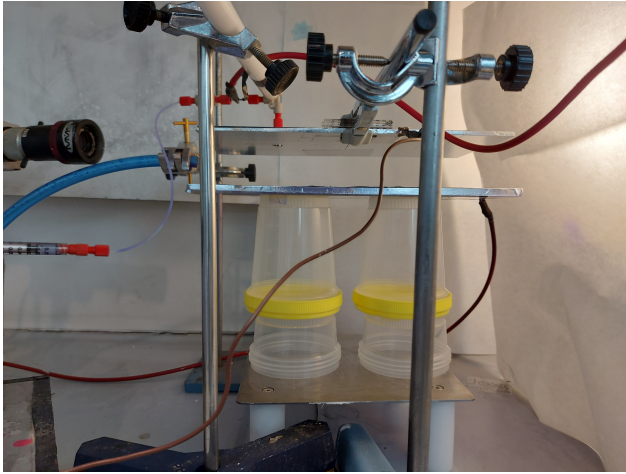


Figura 15: Vista 1 del montaje global.



Figura 16: Vista 2 del montaje global.

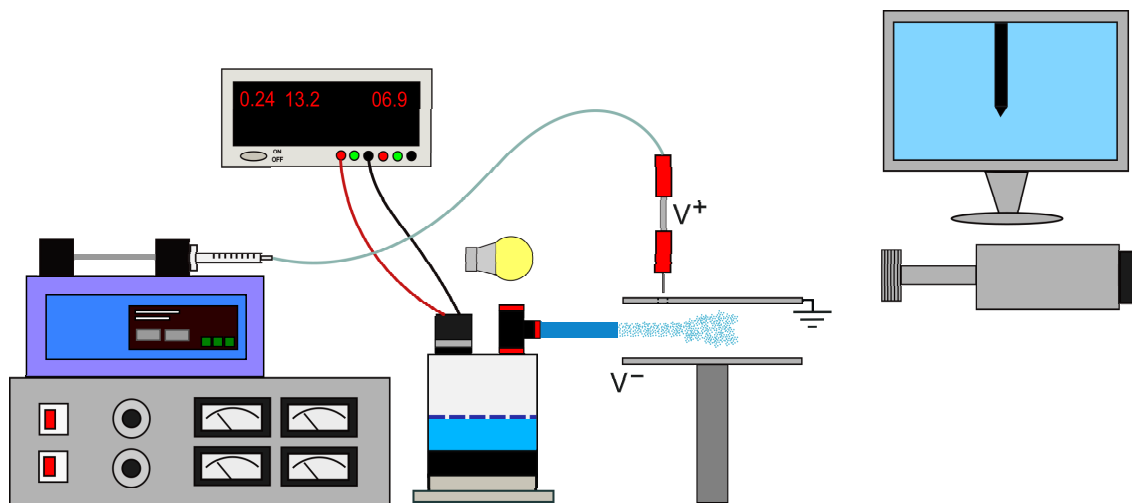


Figura 17: Esquema del montaje final.

3.2. Disoluciones empleadas para el electrospray

De acuerdo con la explicación previamente expuesta en el capítulo 2.1.1, es esencial que las propiedades de la disolución utilizada para producir el electrospray posean valores específicos, a fin de obtener gotas de un tamaño deseado. En todos los experimentos llevados a cabo, se empleó como disolución base una mezcla compuesta por un 15% en masa de etanol en agua destilada, cuya tensión superficial de 42 mN/m a una temperatura de 25°C satisface los valores requeridos y permite una fácil atomización por electrospray. El valor de la tensión superficial ha sido obtenido en el artículo publicado por Gonzalo Vázquez, Estrella

Álvarez y Jose M. Navaza en 1994 [23], en el cual se enuncian los valores de la tensión superficial de una disolución de agua destilada y etanol en función del porcentaje en masa de etanol presente en la misma.

Se agregó una cantidad determinada de cloruro sódico (NaCl) a la disolución para lograr la conductividad deseada. Con el fin de estimar la conductividad en función de la cantidad de sal, se realizaron mediciones de la conductividad en distintas disoluciones que contenían diferentes porcentajes en masa de sal. Las mediciones realizadas proporcionaron los datos que se muestran en la figura 18. En el anexo I, se detalla con profundidad el montaje utilizado y el procedimiento experimental llevado a cabo para medir la conductividad eléctrica de la disolución.

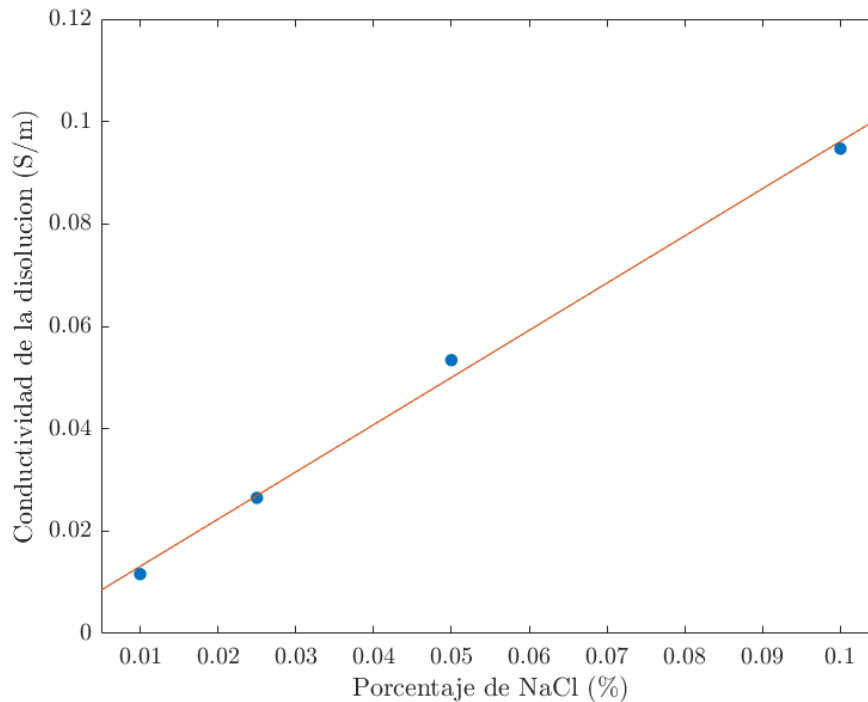


Figura 18: Representación gráfica del valor de conductividad en función del porcentaje en masa de NaCl presente en una disolución de agua destilada + 15% en masa de etanol a una temperatura aproximada de 25°C.

3.3. Tamaño de gota del electrospray

A lo largo del presente estudio, se trabajó fundamentalmente con dos valores de conductividad de la disolución, 0.01 y 0.1 S/m y, por tanto, dos tamaños de gota del electrospray. El objetivo era comparar los resultados obtenidos para cada caso con el fin de saber si la conductividad y el tamaño de gota eran factores que afectaban significativamente a la captura y en qué medida.

En la tabla 1, se muestra el valor aproximado del tamaño de las gotas en función de la disolución utilizada según la ley de escala (1) previamente expuesta. Los valores de los caudales son con los que se

consiguió establecer un cono de Taylor estable. Pueden no coincidir con la ley de escala (3) dado que esta proporciona simplemente un valor aproximado y en los experimentos suele tener valores un poco más elevados. Como valor orientativo de la constante dieléctrica, se ha usado el del agua. La constante dieléctrica de la disolución será algo menor y no se ha medido.

Se observa como un mayor porcentaje en masa de sal supone una mayor conductividad y por tanto un tamaño de gota más pequeño.

Disolución	Porcentaje en masa de NaCl	Conductividad (S/m)	Caudal ($\mu\text{L/h}$)	Constante dieléctrica ϵ	Diámetro estimado de gotas (μm)
A	0.01	0.01	50	80	0.99
B	0.1	0.1	5	80	0.21

Tabla 1: Diámetro estimado de las gotas de electrospray en función de la disolución utilizada.

3.4. Procedimiento experimental

Con el propósito de medir la eficacia del método de electrospray en la captura de microgotas de aerosol, se llevó a cabo un experimento que consistió en colocar una fina lámina de papel de aluminio sobre el contraelectrodo, que sirvió como colector y había sido previamente pesada. Posteriormente, se activó el generador de aerosol y se mantuvo durante un periodo de tiempo determinado, típicamente 5 minutos, sin poner en funcionamiento el electrospray. Una vez transcurrido este tiempo, se pesó la lámina de papel de aluminio para determinar la cantidad de aerosol capturado sin el uso del electrospray.

Posteriormente, se repitió el mismo proceso con la misma lámina de papel de aluminio, esta vez utilizando el electrospray durante otros 5 minutos. Después de esto, se volvió a pesar la lámina de papel para medir la cantidad de aerosol capturado con el uso del electrospray. Con este procedimiento fue posible obtener la cantidad de aerosol capturado tanto con como sin el uso del electrospray, para su posterior comparación y análisis. El valor de interés en este caso fue la eficacia del electrospray, es decir, la cantidad de aerosol capturado cuando se utiliza este método en comparación con la cantidad capturada sin su uso.

Previo a este proceso principal de pesaje el cual proporciona los resultados, se requieren distintos pasos para poner el montaje en marcha. Con respecto a la preparación del montaje para el electrospray, en primer lugar, si se estaba utilizando una nueva disolución, se llenaba de esta una jeringa que no hubiera sido previamente usada. En el proceso de llenado se debe prestar especial atención para que no se generen burbujas de aire, las cuales pueden dificultar el proceso de montaje del cono de Taylor, haciendo que sea complicado lograr su estabilidad. Seguidamente, se conectaba la jeringa con el tubo de sílica y manualmente se presionaba para dejar salir por la aguja algunas gotas, llenando así todo el recorrido. Finalmente se encajaba la jeringa en la bomba de manera correcta, cerciorándose de que el elemento que empujaba la jeringa estaba en pleno contacto con ella. Si se iba a usar la misma disolución en días posteriores, se mantenía la jeringa debidamente colocada en la bomba.

Si se quería llevar a cabo el electrospray, se ponía en marcha la bomba de jeringa con un caudal relativamente alto para que el proceso fuera más rápido y se esperaba hasta que se formara un menisco en la punta de la aguja. Usualmente se aprovechaba este tiempo para hacer las conexiones eléctricas necesarias, como la conexión entre la fuente de voltaje positiva y el tubo de acero, entre la fuente de voltaje negativa y el colector y entre la tierra y el extractor. Una vez que el menisco había adquirido un volumen adecuado se activaban las fuentes de voltaje. En este momento se debían ir variando no solo los voltajes, sino el caudal, este siempre estando alrededor de los valores calculados con las leyes de escala, hasta lograr montar el cono de Taylor. Se debía esperar entonces determinado tiempo para asegurar la estabilidad del mismo. Este proceso de espera hasta lograr un cono de Taylor estable puede ser tedioso en determinadas ocasiones, debido a transitorios relativamente largos desde que se cambia el voltaje o el caudal hasta que ello tiene un efecto real en el electrospray dados los caudales tan pequeños con los que se trabaja.

A la hora de desactivar el electrospray, se procedía en primer lugar a apagar las fuentes de voltaje, anulando así el campo eléctrico entre extractor y colector, permitiendo el manejo del montaje de manera segura. Seguidamente se paraba la bomba de jeringa.

En lo que respecta al proceso de activación del aerosol, se procedía inicialmente a poner en funcionamiento el transductor piezoeléctrico. Una vez estaban siendo generadas las microgotas de agua en el depósito, se activaba el ventilador con el voltaje adecuado para generar la corriente de gotas.

4. Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en los experimentos en orden cronológico.

4.1. Observaciones iniciales

Al inicio del estudio, se llevaron a cabo una serie de experimentos preliminares con el propósito de observar de manera cualitativa la capacidad del electro spray para capturar una cantidad significativa de gotas del aerosol. Con dicho fin, se añadieron 70 mg de tinte (violeta de cristal) al volumen de agua contenido en el depósito. De esta manera, el agua adquiriría un tono violeta, lo que permitía saber, a simple vista, si se había depositado mayor o menor cantidad en el colector.

En estas primeras pruebas se empleó la disolución A (menor conductividad, mayor tamaño de gota) y el montaje A, no había por tanto extractor. Se estableció una separación entre la aguja y el colector de unos 6.2 cm, mientras que el tubo se situó 3.7 cm por encima del colector. El voltaje de la fuente que alimenta al ventilador se ajustó a 10.3 V, un valor intermedio dentro del rango de actuación.

Los resultados obtenidos fueron puramente cualitativos y se registraron con fotografías del colector tomadas después de un determinado tiempo. En estas primeras pruebas no se empleó todavía el papel de aluminio para recolectar, sino que se utilizó el mismo colector.

En la figura 19, se muestra una imagen del colector tomada tras 5 minutos de actuación del aerosol pero sin activar el electro spray. Se puede observar como la deposición de agua en el mismo es mínima, apreciándose un suave tono violeta en la zona de la derecha del colector. El contraste es elevado en comparación con las imágenes mostradas en la figura 20, las cuales fueron tomadas tras la aplicación de electro spray durante 5 minutos.

En la imagen 21, se puede apreciar el claro efecto del electro spray sobre la corriente del aerosol. Las gotas de la misma cambian la dirección, dirigiéndose hacia el colector, al interactuar con la región en la que se encuentra el electro spray.

Estos resultados confirmaron que el uso del electro spray mejoraba significativamente la eficacia de captura y se tomó la decisión de proceder a la obtención de resultados cuantitativos.

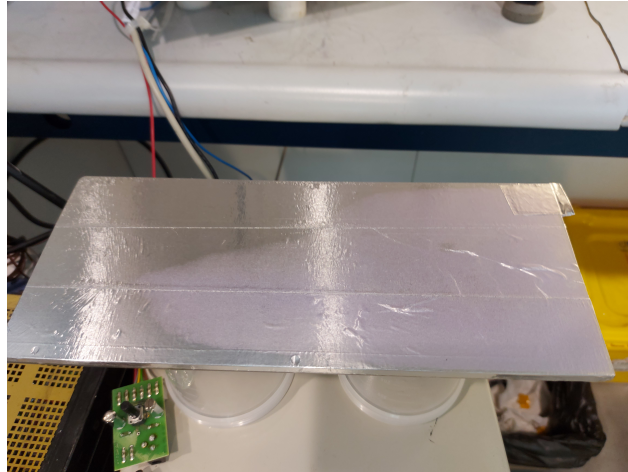
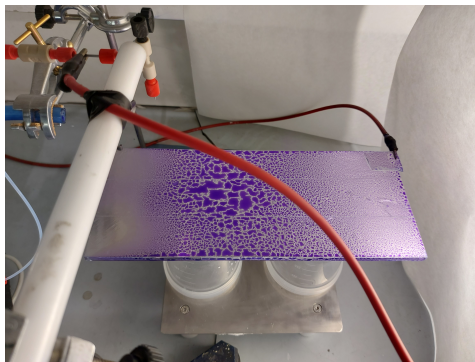
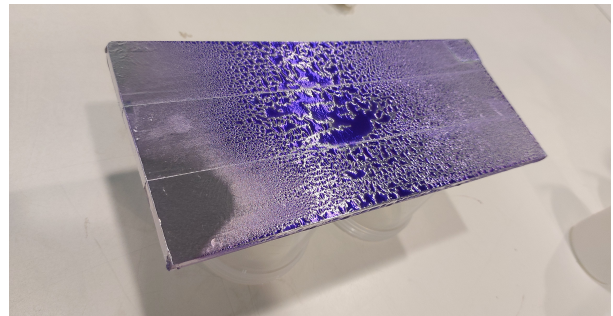


Figura 19: Imagen del colector tras 5 minutos cuando no se aplicó electrospray.



(a)



(b)

Figura 20: Imágenes del colector tras 5 minutos cuando se aplicó electrospray.

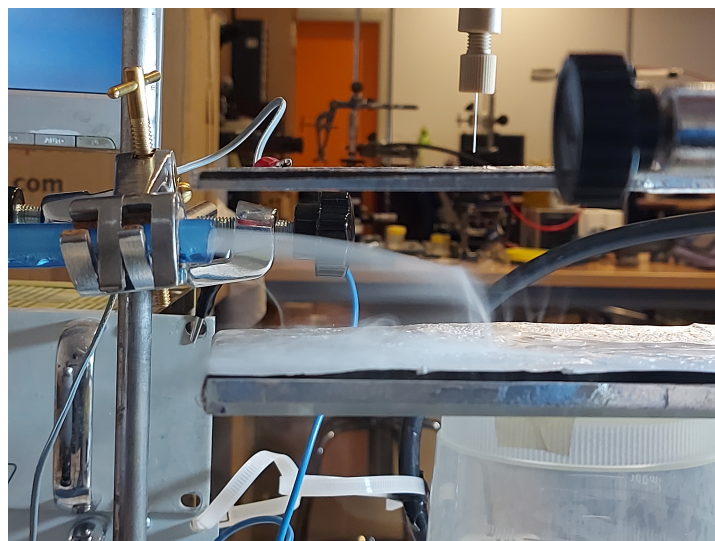


Figura 21: Imagen del cambio de dirección de la corriente de aerosol al interactuar con la nube de gotas de electrospray.

4.2. Reproducibilidad del experimento

Se llevó a cabo la repetición del experimento 6 veces en las mismas condiciones con el fin de estudiar su reproducibilidad. En estos sí se cuantificó la cantidad de agua capturada con electrospray. Sin embargo, no se pesó la lámina de aluminio previo a comenzar el experimento, por lo que no se obtuvo la cantidad capturada sin electrospray.

Se empleó el montaje A (3.1.1) y la disolución A (ver tabla 1). La distancia entre la punta de la aguja y el colector se estableció en 11 cm y para conseguir montar el cono de Taylor las fuentes de alto voltaje positiva y negativa proporcionaban aproximadamente 7 kV y -7 kV, respectivamente. El voltaje del ventilador fue 11 V en los 6 experimentos. El codo no había sido añadido a la configuración del generador de aerosol. Solo se utilizó un polímetro, el cual se conectó al tubo por el que es conducida la disolución, proporcionando así la corriente eléctrica emitida por el cono de Taylor.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 2.

Nº experimento	Gramos capturados por minuto empleando electrospray (g/min)	Medida polímetro (μA)
1	0.286	0.14
2	0.338	0.19
3	0.264	0.20
4	0.324	0.21
5	0.304	0.20
6	0.294	0.20
Media	0.3017	0.19
Desviación típica	0.0266	0.0253

Tabla 2: Resultados obtenidos en los experimentos de reproducibilidad.

Como ha sido mencionado previamente, conviene señalar que no se efectuó la medición de la masa de la lámina de aluminio utilizada en cada ensayo. Por ende, no es posible comparar la cantidad de agua capturada con electrospray con la cantidad depositada durante el período sin su uso. No obstante, ello no era el propósito de estas primeras medidas. Lo que se perseguía era tan solo verificar la capacidad de reproducción del experimento. Los resultados obtenidos muestran que la cantidad de agua capturada por minuto con electrospray en cada prueba es similar, presentando una desviación típica inferior al 10% de la media, lo que indica una adecuada reproducibilidad del experimento.

4.3. Caracterización del aerosol

Una vez se confirmó la alta influencia del electrospray en la captura, la posibilidad de cuantificarla de forma precisa y la reproducibilidad del experimento, se procedió a la caracterización del aerosol en función de la fuente de voltaje que alimentaba el ventilador, ya que se llevarían a cabo experimentos variando la corriente de gotas de agua a través de dicho voltaje. El objetivo era traducir los voltajes en valores de velocidad y concentración, las cuales son las dos características más relevantes de la corriente.

Para la medición de ambas propiedades se utilizó una cámara de alta velocidad, la cual enfocaba a la salida del tubo. El análisis de las imágenes se llevó a cabo con el software *MATLAB*. Los detalles del montaje utilizado y el procedimiento completo para la obtención de los resultados se encuentran descritos de manera detallada en el anexo II. Cabe mencionar que esta caracterización de la corriente del aerosol se llevó a cabo una vez había sido implementado el codo en el montaje, por lo que los resultados no son válidos para los experimentos en los cuales este no había sido añadido todavía.

Las figuras 22 y 23 presentan la relación entre la velocidad media de las gotas y la concentración de la corriente, respectivamente, en función del voltaje aplicado a la fuente que alimenta el ventilador. Los resultados indican una tendencia evidente: el aumento del voltaje implica un incremento en la velocidad de las gotas, debido al incremento en la velocidad de giro del ventilador, mientras que la concentración disminuye.

Se buscó determinar el voltaje óptimo con el que se lograba la máxima producción de gotas por unidad de área y tiempo. Para ello, se generó la figura 24, que representa el número de gotas por metro cuadrado y segundo en función del voltaje aplicado. La figura muestra que se alcanzan los valores máximos en torno a los 10-15 V. Para voltajes bajos, se observa una concentración muy alta pero una velocidad reducida, lo que resulta en una menor cantidad de gotas liberadas por unidad de tiempo. En contraste, para voltajes altos, las microgotas son expulsadas a una velocidad elevada y se obtiene un alto número de ellas por unidad de tiempo, pero la concentración es notablemente más baja.

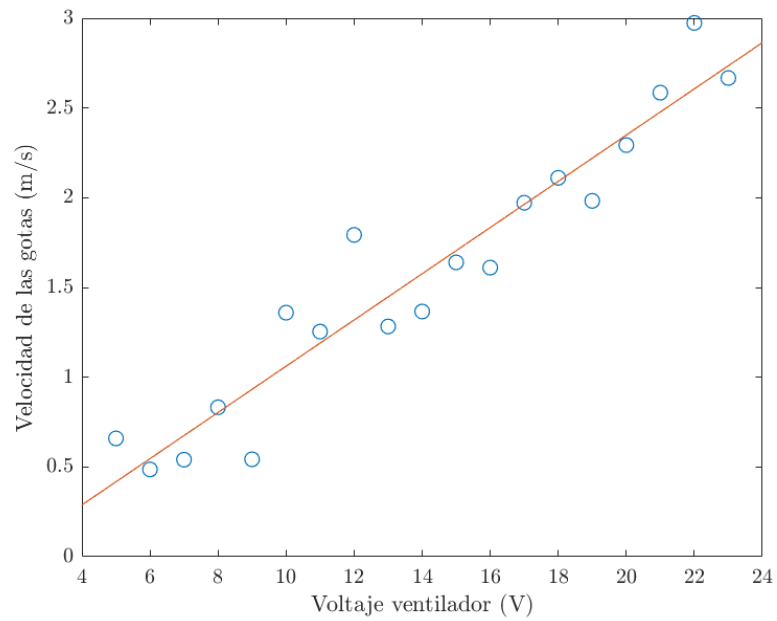


Figura 22: Velocidad en m/s de las gotas de la corriente de aerosol en función del voltaje de la fuente que alimenta el ventilador.

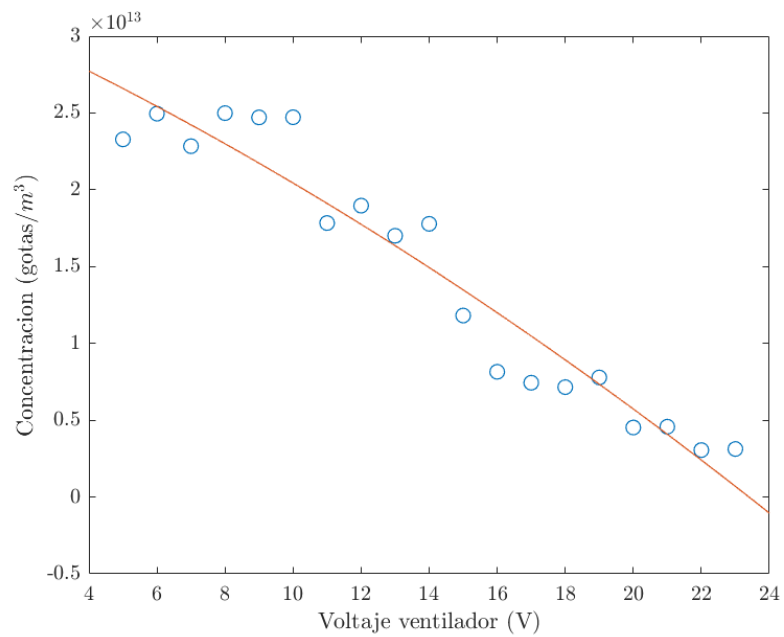


Figura 23: Concentración en gotas/m³ de la corriente de aerosol en función del voltaje de la fuente que alimenta el ventilador.

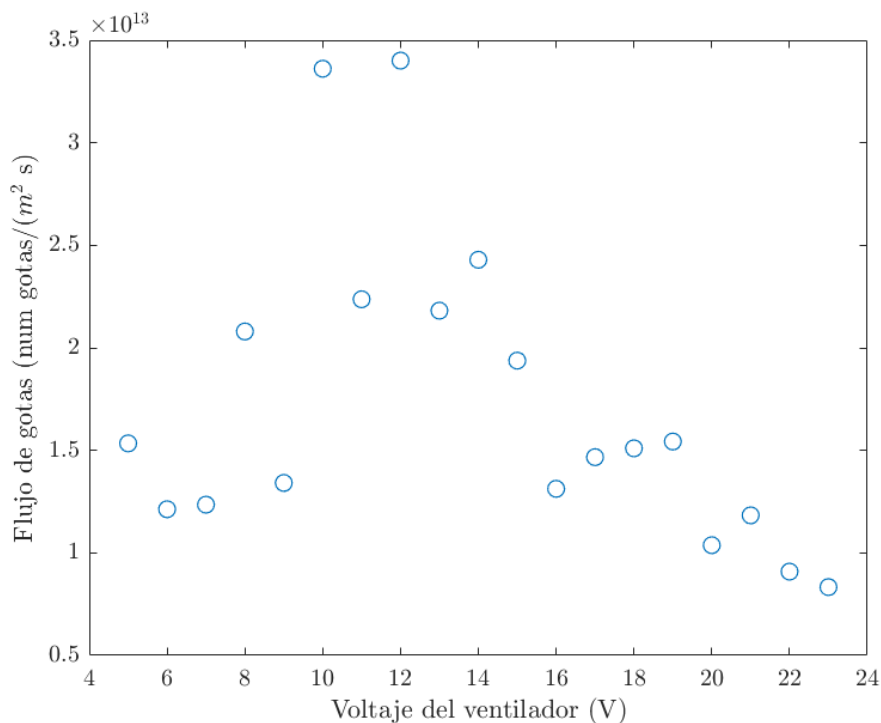


Figura 24: Flujo de gotas en la corriente de aerosol por m^2 en función del voltaje de la fuente que alimenta el ventilador.

4.4. Primeros experimentos con extractor

Se procedió con experimentos con el montaje de electrospray B (3.1.2), el cual incluye extractor, pero sin codo en el depósito. Se recuerda que en esta configuración, la distancia entre extractor y colector es de 4.5 cm, mientras que la distancia horizontal entre el final del tubo y la aguja del electrospray es de 7.3 cm. Se utilizó la disolución A (ver tabla 1).

Se llevó a cabo un barrido de voltaje de la fuente que alimenta al ventilador, o lo que es lo mismo, diferentes experimentos para distintas velocidades y concentraciones de salida de las gotas del aerosol.

Se muestran en la figura 25 los resultados obtenidos. Los asteriscos rojos representan los gramos por minuto que se depositaron en el colector cuando no se usó electrospray, mientras que los círculos azules representan los gramos capturados cuando sí se empleó este. Dado que el dato de interés es la diferencia de estos dos valores, es decir, el beneficio real del electrospray (cuánto más se consigue capturar que cuando no se usa), se elaboró la figura 26. En ella se representa la diferencia entre el valor del círculo azul y el del asterisco rojo de la figura 25.

Se observa como se consigue capturar más entre los 17 V y 20 V.

En estos experimentos no se había colocado todavía el segundo polímetro, por lo que solo se tiene el

valor de la carga eléctrica en el cono de Taylor, que en este caso fue prácticamente constante y de valor $0.18 \pm 0.01 \mu\text{A}$.

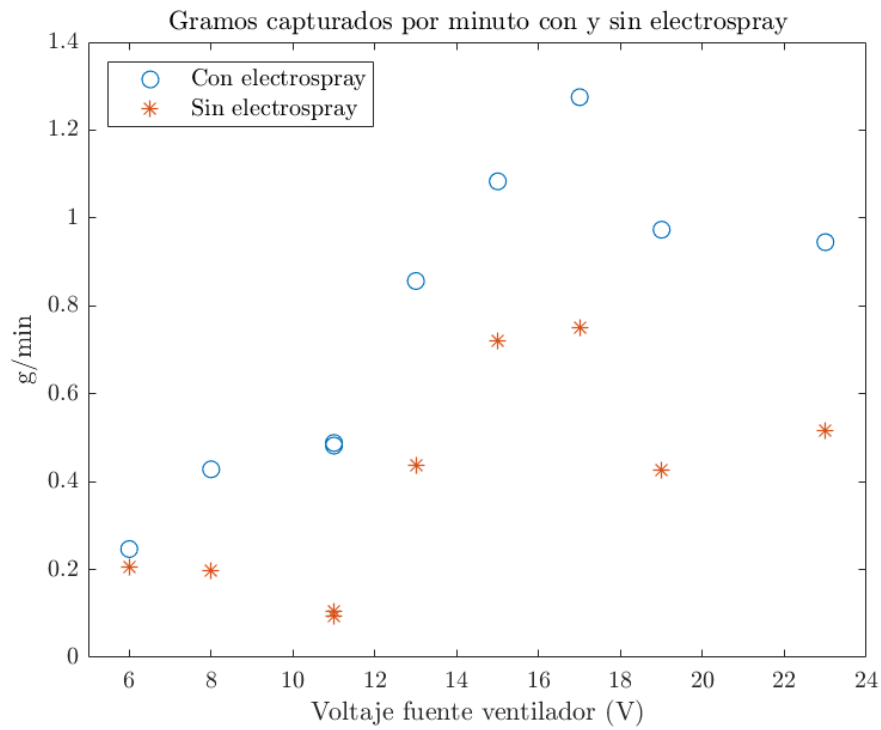


Figura 25: Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución A y montaje B sin codo en el generador.

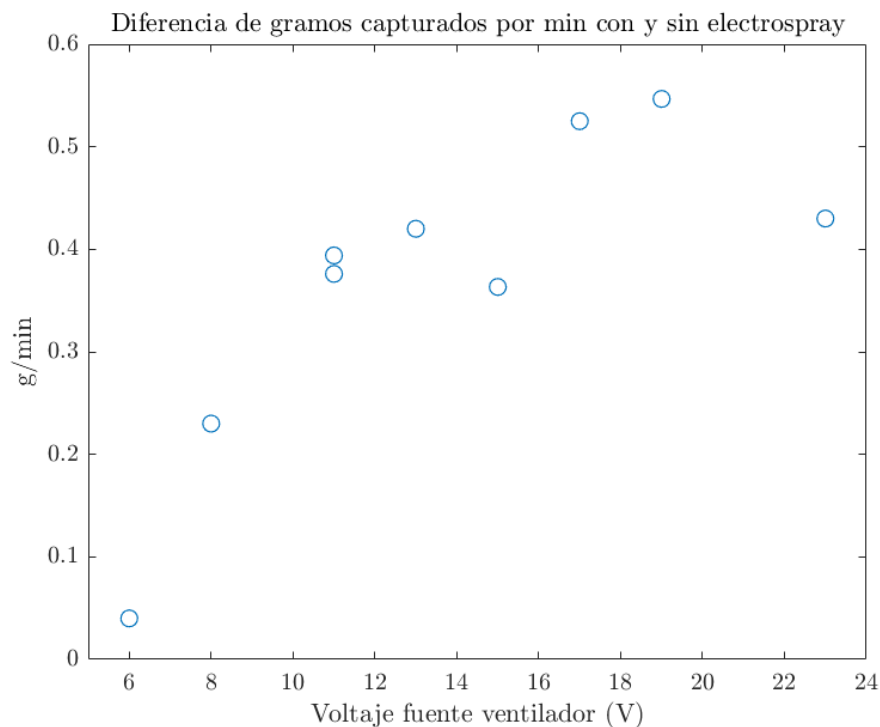


Figura 26: Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electro spray empleando la disolución A y montaje B sin codo en el generador.

4.5. Adición del codo. Comparación de distintas disoluciones

Después de llevar a cabo los experimentos previos, fue cuando se tomó la determinación de incorporar el codo al generador del aerosol. De ahora en adelante, todos los experimentos expuestos se hicieron exactamente con la misma configuración, montaje B (3.1.2), variando únicamente la composición de la disolución utilizada en el proceso de electro spray. El propósito principal consistió en establecer condiciones completamente uniformes en todos los barridos experimentales, manteniendo constante la configuración instrumental y modificando únicamente la conductividad de la disolución. Esto se hizo con el fin de facilitar una comparación más directa y simplificada de los resultados obtenidos.

4.5.1. Disolución B

Se empezó empleando la disolución B (ver tabla 1). Ello conllevaba un caudal muy pequeño, por lo que conseguir estabilizar el cono de Taylor resultó complicado. Los valores del montaje para los que se logró son los siguientes:

- $V^+ \approx 3 \text{ kV}$
- $V^- \approx -5 \text{ kV}$

- Caudal: 5 $\mu\text{L}/\text{h}$
- Medida polímetro: $0.20 \pm 0.01 \mu\text{A}$

Los resultados de captura se presentan en las figuras 27 y 28. Debido a que eran las primeras pruebas que se realizaban con el codo instalado en el depósito del generador, no se comenzó el barrido directamente, sino que se tomaron algunas medidas con valores intermedios del voltaje de la fuente que alimenta el ventilador. Como se puede observar, en estas primeras pruebas la captura fue bastante más baja comparada a cuando no se había instalado el codo en el generador, no llegando a superar los 0.3 g/min para ninguno de los tres voltajes.

Se debía asegurar que esta pérdida de eficacia de captura había sido debida efectivamente a la adición del codo. Para ello, se intentaron replicar exactamente las condiciones del experimento anterior que se había llevado a cabo sin codo. Las diferencias más reseñables entre ambos experimentos eran tres. Las distancias, las cuales eran similares pero no iguales. La tinta, la cual para este experimento no se utilizó y previamente podría haber cambiado la composición del agua del depósito haciéndola más conductora. El nivel de agua en el depósito: en el último experimento sin codo el nivel de agua estaba demasiado abajo respecto del nivel óptimo del nebulizador atómico y ello podría también haber provocado una mayor captura.

Se repitió el experimento tres veces. La primera con las mismas distancias que en los experimentos sin codo, la segunda con las mismas distancias y añadiendo al agua del depósito 70 mg de NaCl simulando el aporte de conductividad de la tinta previamente utilizada, y la tercera y última con los dos cambios de las anteriores y además se rebajó el nivel de agua del depósito. Sin embargo, los resultados no cambiaron, por lo que se concluyó que la captura debía ser más baja por la adición del codo, el cual debía cambiar las características de la corriente del aerosol.

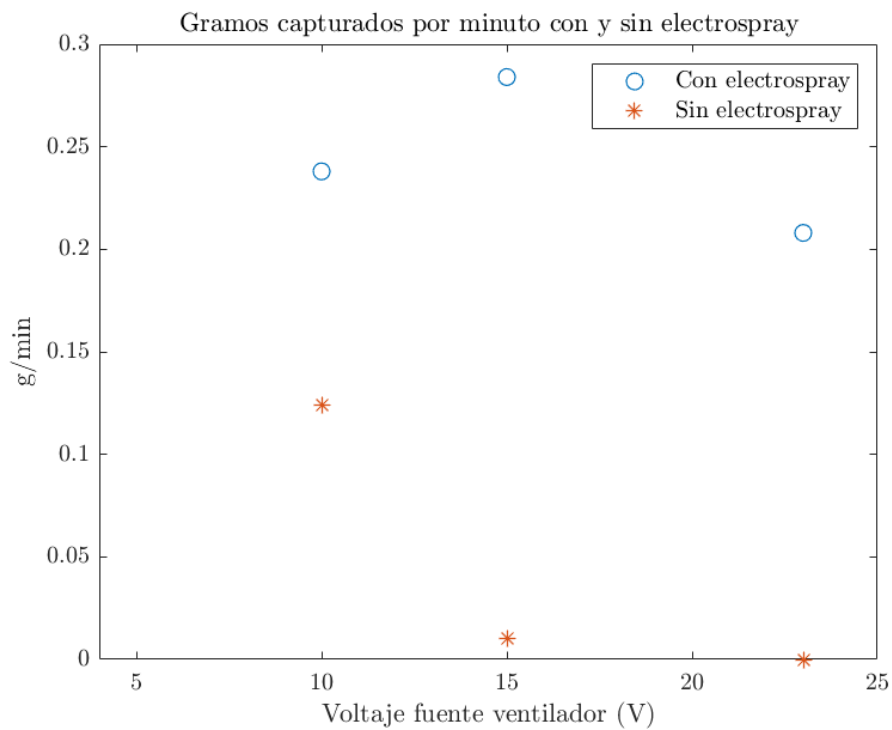


Figura 27: Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.

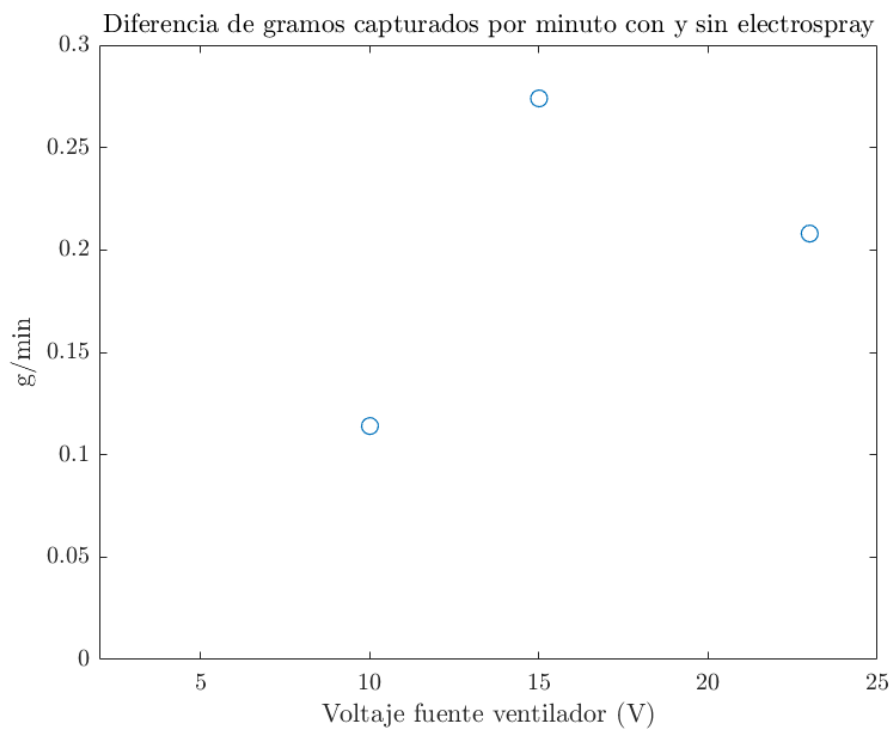


Figura 28: Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.

4.5.2. Disolución A

Tras los resultados anteriores se decidió cambiar a la disolución A (ver tabla 1). Los valores del montaje para los que se logró montar el cono son los siguientes:

- $V^+ \approx 4$ kV
- $V^- \approx -5$ kV
- Caudal: $50 \mu\text{L/h}$
- Medida polímetro cono de Taylor: $0.19 \pm 0.01 \mu\text{A}$
- Medida polímetro extractor: $0.13 \pm 0.01 \mu\text{A}$

Durante todas las pruebas los valores que marcaban ambos polímetros fueron prácticamente constantes. La lectura extraída del polímetro que indicaba la corriente del cono de Taylor fue de unos $0.20 \mu\text{A}$, mientras que del polímetro conectado al extractor unos $0.13 \mu\text{A}$. Ello quiere decir que, tras romperse el hilo que formaba el cono, bastante gotas se veían atraídas de nuevo hacia el extractor y no llegaban a interactuar con la corriente del aerosol. Se estaba perdiendo casi un 70% de la corriente.

En la figura 29 se muestran los resultados obtenidos en el barrido. De nuevo, en la figura 30, se ha representado la diferencia entre lo capturado cuando se emplea electrospray y cuando no. Cabe destacar que, a partir de los 13 V, la velocidad de salida de las microgotas de la corriente de aerosol es demasiado alta, haciendo que estas se escapen del rango que ocupa el extractor y por ende depositándose en él una cantidad prácticamente despreciable cuando no se emplea electrospray.

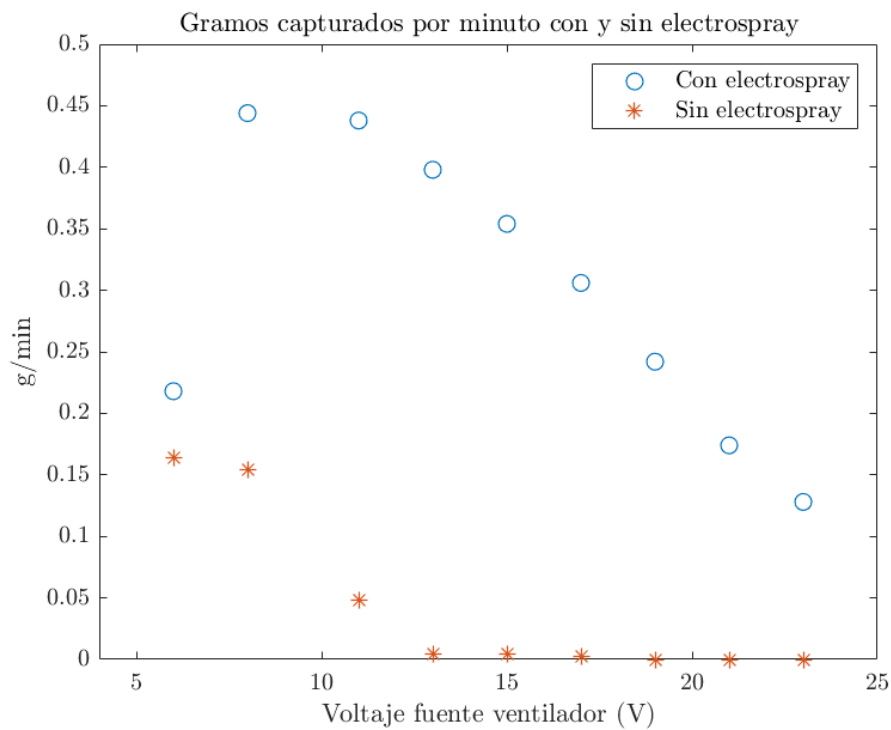


Figura 29: Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución A y montaje B.

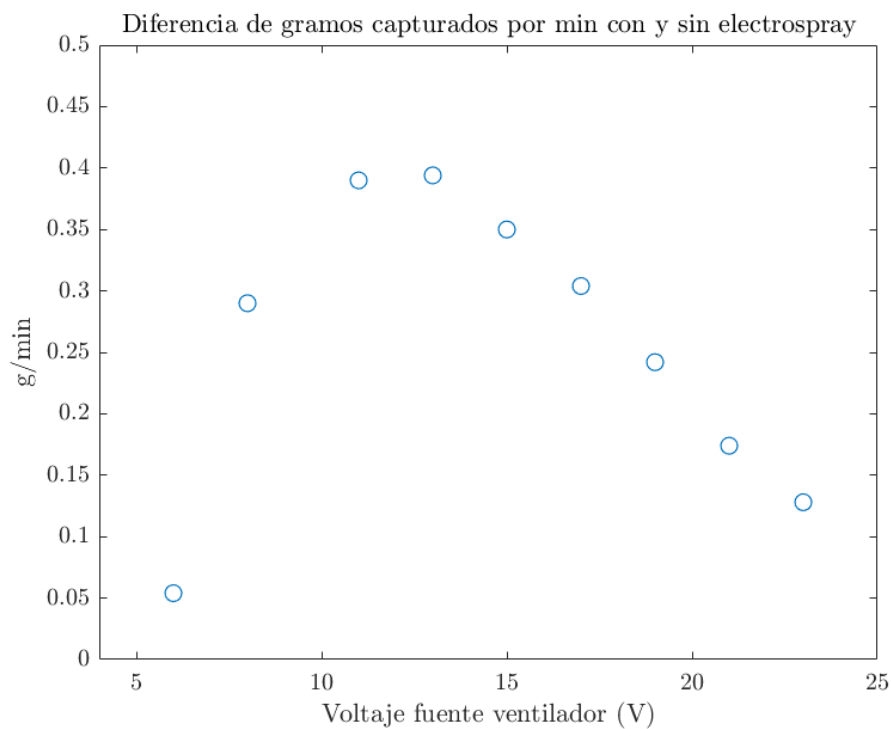


Figura 30: Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución A y montaje B.

4.5.3. Segundo barrido disolución B

Se finalizó repitiendo el barrido empleando la disolución B (ver tabla 1) y el montaje B (3.1.2). Los valores del montaje para los que se consiguió montar un cono de Taylor estable fueron los siguientes:

- $V^+ \approx 3.2 \text{ kV}$
- $V^- \approx -6 \text{ kV}$
- Caudal: $5 \mu\text{L/h}$
- Medida polímetro cono de Taylor: $0.21 \pm 0.01 \mu\text{A}$
- Medida polímetro extractor: $0.11 \pm 0.01 \mu\text{A}$

Estas medidas de los polímetros fueron tomadas cuando no se había activado la corriente del aerosol. Fueron las obtenidas cuando se consiguió estabilizar el cono de Taylor.

A continuación se muestran los resultados en las figuras 31 y 32.

Se puede observar como en las primeras medidas (6, 8 y 11 V), los resultados seguían una tendencia relativamente clara. A partir de la cuarta medida (13 V), la captura sorprendentemente aumenta. Debe ser mencionado que dicho aumento coincidió con una subida repentina de la lectura extraída del polímetro del cono de Taylor, entre 0.23 y $0.25 \mu\text{A}$, a la vez que el valor mostrado por el polímetro conectado al extractor era muy oscilante y más bajo que en las medidas anteriores, situándose por debajo de los $0.10 \mu\text{A}$. Se desconoce el motivo del cambio de los valores de los polímetros. Aunque la aguja se colocó con respecto al agujero del extractor aproximadamente siempre a la misma distancia, se cree que podría ser una manera de controlar las gotas que se ven atraídas por el extractor.

En los 11 V se pueden apreciar dos medidas distintas. La más alta se tomó al final, cuando se había completado el barrido y se estaban observando los comportamientos extraños previamente mencionados de los polímetros. En esta segunda medida con 11 V, el polímetro del cono de Taylor llegó a marcar un valor de $0.29 \mu\text{A}$, y el valor del polímetro del extractor oscilaba entre los 0.03 y $0.07 \mu\text{A}$. Ello podría justificar una mejor captura, ya que la mayor parte de las gotas de electrospray llegaban a cruzarse con el aerosol y solo algunas se veían atraídas por el extractor.

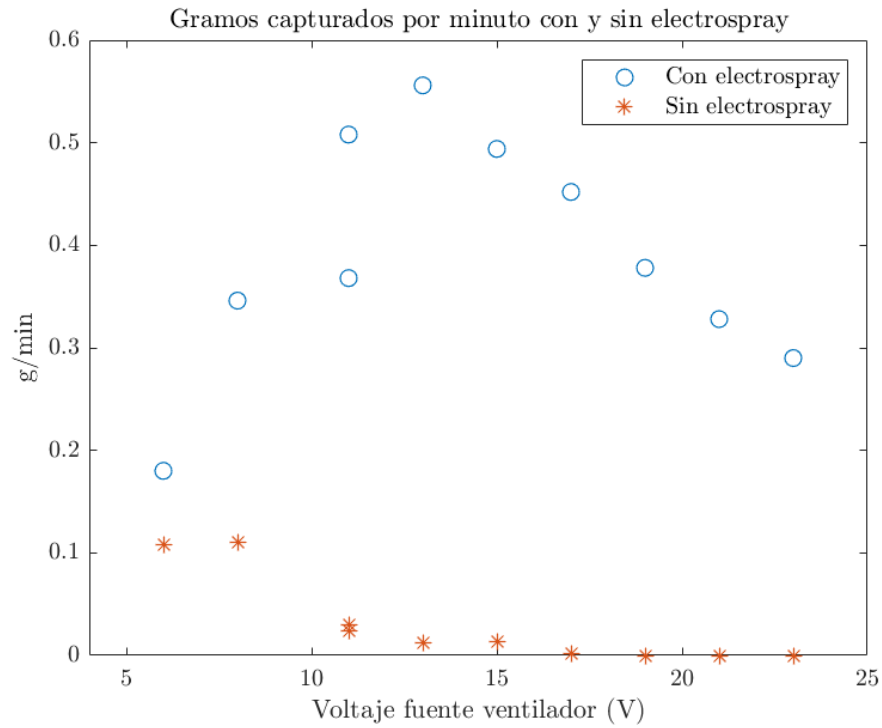


Figura 31: Gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.

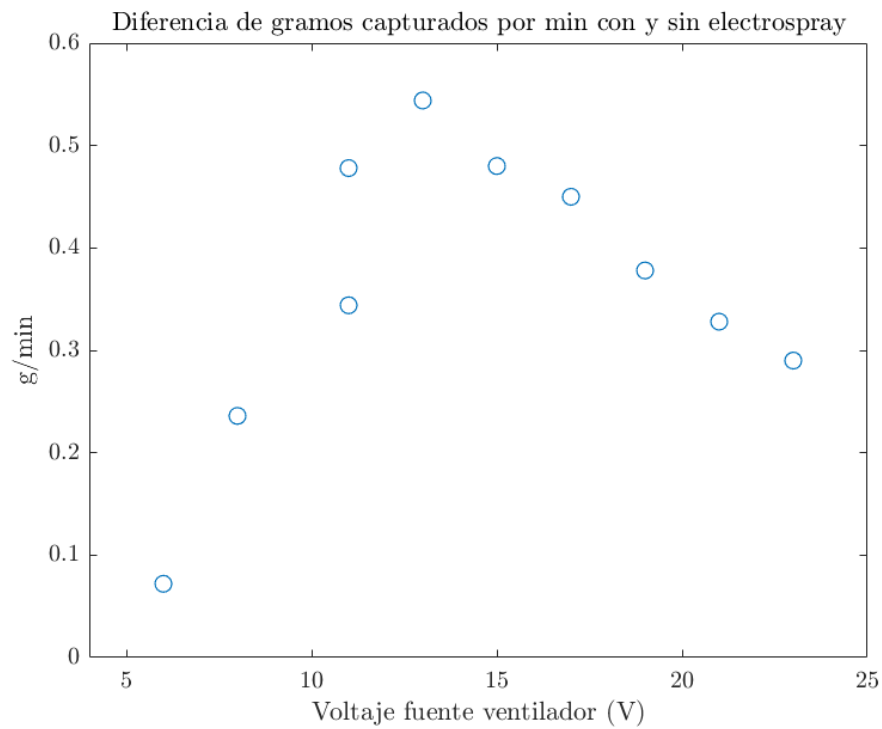


Figura 32: Diferencia de gramos capturados por minuto con y sin electropray empleando la disolución B y montaje B.

4.6. Resumen de los resultados

En este apartado se presentan todos los resultados obtenidos a lo largo del estudio en una misma gráfica (figura 33) con el fin de poder compararlos de manera más sencilla.

Brevemente, se recuerda que la disolución A se corresponde con una menor conductividad y un tamaño de gota más grande, mientras que con la disolución B se generan gotas más pequeñas pero más conductoras.

Se pueden comentar varios aspectos observando la gráfica. En primer lugar, se aprecia un pico de mayor captura a valores de voltaje medios, entre los 11 y 15 V, excepto en los experimentos cuando no se había instalado codo. Si uno observa la figura 24, entre dichos voltajes, el número de gotas presentes en la corriente del aerosol es máximo. Esto parece lógico, ya que se está obteniendo una mayor captura cuando hay un mayor número de gotas en la corriente, produciéndose este hecho para valores de concentración y velocidad intermedios, entre $1.5 \cdot 10^{13}$ y $2 \cdot 10^{13}$ gotas/m³ y 1.25 m/s, respectivamente.

En segundo lugar, los puntos negros, los cuales representan el segundo barrido llevado a cabo con la disolución B, se sitúan ligeramente por encima de los amarillos (disolución A), a partir de los 13 V. Ello coincide cuando, como se ha comentado previamente, se obtuvieron valores de corriente mayores en el polímetro del cono y menores en el del extractor. Mientras que para valores del voltaje más bajos, se consigue capturar una cantidad similar independientemente de la disolución empelada.

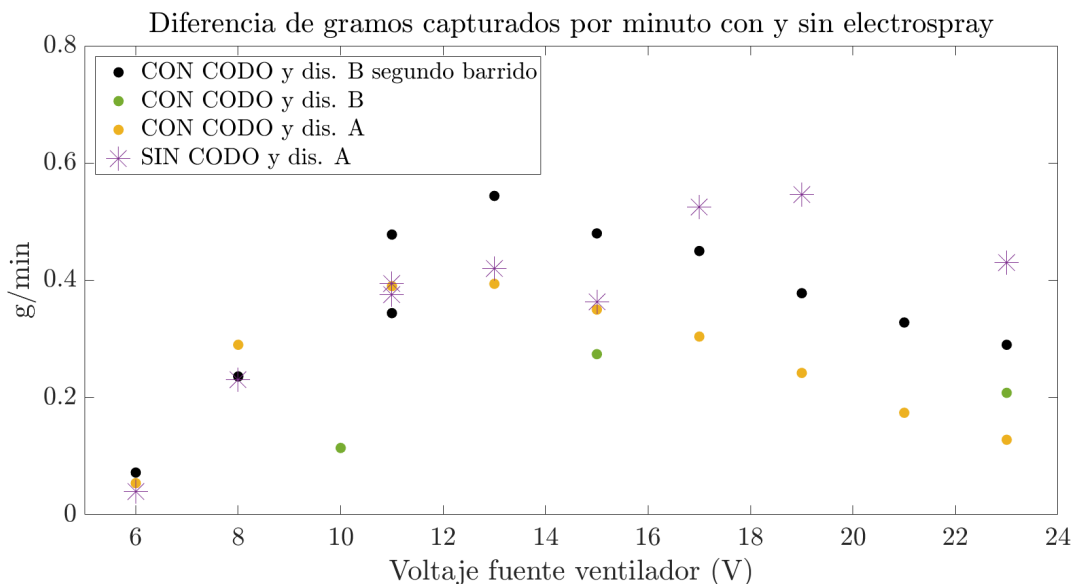


Figura 33: Representación conjunta de los resultados de todos los experimentos.

4.7. Análisis cualitativo de los resultados

Se ha llevado a cabo un análisis cualitativo de los resultados. En primer lugar, se ha hecho un cálculo aproximado de los gramos por minuto así como del número de microgotas de agua por segundo de la corriente de aerosol (tabla 3). Como valor medio del flujo de gotas (ver figura 24), se ha tomado $1.5 \cdot 10^{13}$ gotas/(m²s). Se ha multiplicado este flujo por el área interior del tubo, por el volumen de una gota y finalmente por la densidad del agua, obteniendo los gramos por minuto. Para estimar el número de gotas por segundo, basta con multiplicar el flujo por el área interior del tubo.

Diámetro interior del tubo (m)	0.01	Gramos de aerosol por minuto (g/min)
Densidad (kg/m³)	1000	2.37
Diámetro de gota del aerosol (m)	$4 \cdot 10^{-6}$	Microgotas de agua por segundo (gotas/s)
Flujo gotas (gotas/m² s)	$1.5 \cdot 10^{13}$	$1.8 \cdot 10^9$

Tabla 3: Valores de gramos por minuto y gotas por segundo de la corriente de aerosol.

A continuación se realizan una serie de cálculos con cada tipo de disolución empleada teniendo en cuenta los resultados obtenidos experimentalmente.

Antes de ello, se considera oportuno definir el concepto de carga de Rayleigh. La carga de Rayleigh, en este caso para una supuesta gota esférica, se define como la carga eléctrica a la que puede estar sometida dicha gota sin que llegue a explotar. Normalmente la carga eléctrica de una gota de electro spray suele estar entre el 50 % y el 60 % de la carga de Rayleigh [11]. Su expresión es la siguiente:

$$Q_{Rayleigh} = (8\pi^2 \gamma \epsilon_0 D_{gota}^3)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

donde,

γ : tensión superficial de la disolución, en N/m

ϵ_0 : permitividad dieléctrica del vacío = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

D_{gota} : diámetro aproximado de gota, en m

Disolución A

En los experimentos llevados a cabo con esta disolución se tiene un caudal de 50 μ L/h y que la intensidad de corriente emitida por el cono de Taylor es de 0.19 μ A. Asumiendo que el diámetro de las gotas

de electropray calculado con las leyes de escala (capítulo 2.1.1) es realmente de 0.99 micras (ver tabla 1), se puede obtener el número de gotas por segundo simplemente dividiendo el caudal entre el volumen de una gota (tabla 4).

La intensidad total entre el número de gotas proporciona la carga eléctrica que, según ese tamaño, llevaría cada gota. El resultado es inviable, ya que se obtiene una carga por gota un 30 % superior a la de Rayleigh. Ello quiere decir que el tamaño de gota, calculado con las leyes de escala, no es correcto. Esto es debido a que las leyes de escala previamente expuestas en el capítulo 2.1.1 incluyen coeficientes de orden unidad que dependen de la disolución. Para las disoluciones empleadas en el presente trabajo estos coeficientes son desconocidos, por lo que los valores de los tamaños calculados sin dichos coeficientes podían no ser suficientemente precisos.

Para una mejor estimación del tamaño de gota se supondrá que la carga presente en la gota está entre el 50 % y el 60 % de la carga de Rayleigh. El tamaño de gota que cumple con este requisito es de aproximadamente 0.55 micras, su carga de Rayleigh asociada es de $2.21 \cdot 10^{-15}$ C, por lo que una gota de electropray generada con la disolución A debería tener una carga de $1.19 \cdot 10^{-15}$ C, aproximadamente.

Assumiendo este como el tamaño aproximado de las gotas de electropray, del valor del caudal se obtiene un número de gotas por segundo de $1.59 \cdot 10^8$. Sin embargo, debe ser tenido en cuenta que el polímetro del extractor marcaba $0.13 \mu\text{A}$, es decir, el 70 % de las gotas se ven atraídas por el extractor, y es solo el 30 % restante el que llega a interactuar con la corriente de aerosol. Por tanto, son solo $4.78 \cdot 10^7$ gotas de electropray las que podrían depositarse en las microgotas de agua de la corriente. En conclusión, en la región en la que interactuaba el electropray con la corriente de aerosol, el número de gotas de electropray era de solo un 4 % del número de microgotas de agua. Suponiendo que cada gota de electropray fuese capaz de cargar una microgota de agua y que esta termina impactando en el colector, se capturaría el 4 % de los 2.37 gramos por minuto de la corriente de aerosol (ver tabla 3); esto es, aproximadamente, 0.0962 g/min.

Como es evidente, este resultado es muy inferior al obtenido experimentalmente, donde se capturan en torno a los 0.3 g/min (ver figura 29). En principio, el electropray en el mejor de los casos sólo es capaz de cargar una fracción pequeña de microgotas de agua, incapaces de sumar la masa que se recoge. La explicación más plausible de por qué se recoge tanto es que esas pocas gotas de agua cargadas, en su camino hasta el colector, cambian el flujo de gas presente en la zona de interacción arrastrándolo hacia el colector. Este nuevo flujo arrastra a otras microgotas de agua sin cargar hacia el colector, a la vez que las propias gotas de agua cargadas chocarán con otras sin cargar, acentuando el transporte hacia el colector. Es decir, el flujo de masa no sólo es debido a las pocas gotas de agua que carga el electropray, sino al cambio en el flujo de gas inducido por estas, más las gotas de agua que son arrastradas por las que sí están cargadas.

Cabe mencionar que este hecho ya se ha observado en experimentos previos con electropray llevados a cabo en el departamento. En ellos se podía apreciar la formación de vórtices que modificaban la corriente de gas.

Gotas/seg electrospray	$1.59 \cdot 10^8$	Solo el 30 % interactúan con la corriente de aerosol	→	Gotas/seg que interactúan con la corriente	$4.78 \cdot 10^7$
Gotas/seg de electrospray que interactúan con gotas/seg de aerosol (%)	4				
g/min que se deberían capturar	0.0962				

Tabla 4: Análisis de la captura con la disolución A.

Disolución B

De igual manera se ha procedido con la disolución B, cuya conductividad se recuerda que es mayor que en la disolución A pero el tamaño de las gotas generadas por electrospray es menor. El caudal proporcionado para montar el cono era de $5 \mu\text{L/h}$. La corriente en el cono de Taylor era de $0.20 \mu\text{A}$, mientras que en el extractor era de $0.11 \mu\text{A}$, es decir, un 50 % aproximadamente.

El caso es prácticamente idéntico a lo ocurrido con la disolución A. Si para los cálculos se utiliza el tamaño de gota dado por las leyes de escala, en este caso 0.21 micras (ver tabla 1), la carga de una gota sería un 34 % superior a la carga de Rayleigh para ese tamaño, lo cual no puede ser cierto. El tamaño de gota que se ajusta a un 50 % de la carga de Rayleigh es 0.11 micras, casi la mitad, al igual que ocurría con la disolución A. Para ese tamaño, la carga de Rayleigh es $1.98 \cdot 10^{-16} \text{ C}$, es decir, diez veces menos que una gota de la disolución A. Ello lleva a pensar que, asumiendo que una gota de electrospray de la disolución A bastaba para cargar una microgota de agua, se necesitarán entonces en torno a 10 gotas de electrospray de la disolución B para que una microgota de agua acumule la misma cantidad de carga que en el caso A.

Dado ese tamaño y conocido el caudal, se conoce el número de gotas por segundo de electrospray: $1.99 \cdot 10^9$ gotas/s. Sin embargo, solo el 50 % de estas llegan a interactuar con la corriente de aerosol, es decir, $0.996 \cdot 10^9$. Se lleva a cabo el mismo proceso que con la disolución A y se divide este número de gotas entre el número de microgotas de agua por segundo presente en la corriente ($1.18 \cdot 10^9$ gotas/s), dando como resultado un 85 % y un flujo de captura de 2 g/min. Sin embargo, siguiendo la hipótesis previamente expuesta de que se necesitan 10 gotas de electrospray para cargar una microgota de agua, habría que diezmar dicho resultado, el cual se situaría en 0.2 g/min. No es tan inferior comparado con los resultados experimentales como en el caso de la disolución A, pero sigue siendo notablemente menor a lo obtenido experimentalmente.

Gotas/s electrospray	$1.99 \cdot 10^9$	Solo el 50 % interactúan con la corriente de aerosol	→	Gotas/s que interactúan con la corriente	$9.96 \cdot 10^8$
Gotas/s de electrospray que interactúan con gotas/s de aerosol (%)	85				
g/min que se deberían capturar	0.2				

Tabla 5: Análisis de la captura con la disolución B.

5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

El presente trabajo estudia experimentalmente el proceso físico de la captura de un aerosol de gotas micrométricas de agua mediante electrospray. Se considera haber cumplido los objetivos, los cuales eran determinar de qué dependía la eficacia de recolección de las microgotas de agua de la corriente de aerosol.

En los experimentos realizados se han empleado dos disoluciones diferentes para generar las gotas de electrospray, una menos conductora pero con un tamaño de gota mayor que la otra, la cual era más conductora y con menor tamaño de gota. Para la generación de las microgotas de agua se ha utilizado un atomizador ultrasónico y para crear la corriente del aerosol se ha empleado un pequeño ventilador que arrastraba las microgotas. La velocidad y concentración de las microgotas presentes en la corriente del aerosol dependía de la velocidad de giro del ventilador, la cual estaba controlada por el voltaje proporcionado a este a través de una fuente de voltaje. La caracterización de esta corriente indicó que a medida que se aumentaba el voltaje, la velocidad de las microgotas aumentaba mientras la concentración se reducía.

Tras el análisis cualitativo de los resultados, se concluye que el flujo de masa capturado no sólo es debido a las pocas gotas de agua que carga el electrospray, sino al cambio en el flujo de gas inducido por estas, más las gotas de agua que son arrastradas por las que sí están cargadas.

Por otro lado, resulta crucial garantizar que la totalidad del electrospray generado alcance de manera efectiva el aerosol de microgotas de agua y establezca interacciones con estas últimas, ya que cualquier pérdida de parte del electrospray a lo largo de su trayecto hacia el colector implicaría una menor transferencia de carga eléctrica a las gotas, lo que conduciría a una notable disminución en la eficiencia de captura. Se concluye, por tanto, que este aspecto ejerce un impacto de mayor relevancia en el proceso de captura que el propio tipo de disolución empleado, el cual no exhibe diferencias significativas en términos de eficiencia.

Por último, se llega a la conclusión de que existe una relación clara entre la concentración de la corriente de aerosol, la velocidad de las gotas y la captura correspondiente. Como cabía esperar, a medida que aumenta el número de microgotas de agua presentes en la corriente, se logra una mayor captura de partículas. Para ello, se debe lograr una relación óptima entre velocidad y concentración en la corriente de aerosol.

5.2. Trabajo futuro

A continuación, se enumeran posibles trabajos futuros basados en el presente estudio:

- Variación de la geometría del montaje. Por ejemplo, haciéndolo axilsimétrico, lo que facilitaría el modelado numérico del proceso.

- En este trabajo se han estimado experimentalmente tanto la velocidad como la concentración de gota a partir del análisis de vídeos. Sería deseable medir la velocidad del aerosol en toda la sección del montaje, así como la concentración. Para ello se prevé emplear un medidor láser de velocidad por efecto Doppler, y su medidor de concentración de núcleos.
- Captura de partículas sólidas en lugar de líquidas. Para este fin se prevé emplear una suspensión de micro o nanopartículas en lugar de agua en el atomizador ultrasónico.
- Empleo de otro tipo de disoluciones en el electrospray que pudieran aumentar la eficacia de captura. Sería interesante investigar qué ocurre cuando las gotas de electrospray, por ejemplo, (a) son volátiles, (b) cuando llevan polímero disuelto, etc. Y ver su efecto en el residuo que se deposita en el colector.

Anexos

I. Medición de la conductividad eléctrica

Para medir la conductividad eléctrica de las disoluciones se empleó el montaje que se muestra en la imagen 34, cuyo esquema detallado se presenta en la figura 35.

El montaje experimental se compone de dos jeringas que contenían una cantidad suficiente de la disolución cuya conductividad se deseaba medir, las cuales se conectaron a través de un tubo de teflón de longitud L . En cada jeringa se colocó una aguja hipodérmica para permitir la conexión eléctrica del líquido con una fuente de voltaje. Asimismo, se instaló un polímetro en serie con la fuente de voltaje y una de las jeringas, cuya resistencia interna R_p es de $1\text{ M}\Omega$. Este polímetro permitió la medición de la corriente eléctrica del circuito y, por ende, de la que atravesaba la disolución.

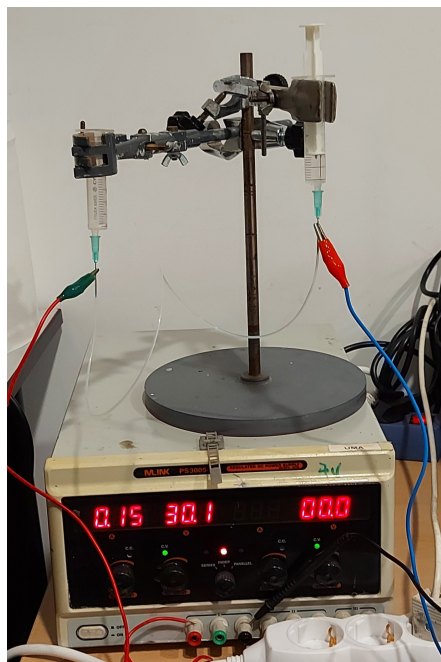


Figura 34: Montaje utilizado para medir la conductividad eléctrica de las disoluciones.

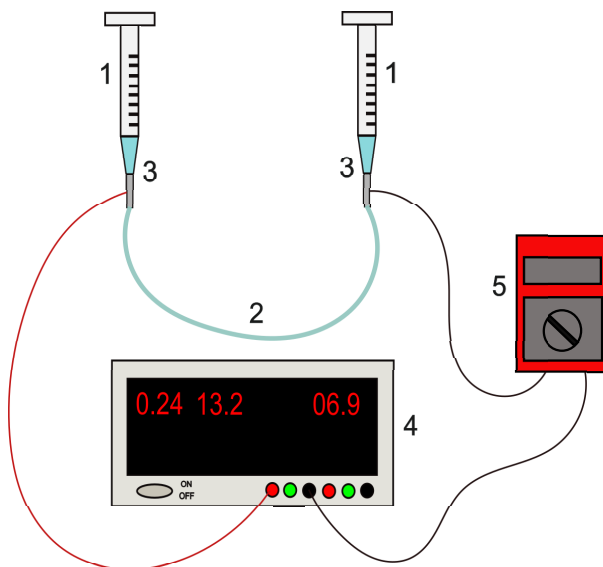


Figura 35: Esquema del montaje utilizado para medir la conductividad eléctrica de las disoluciones.

- 1: Jeringas de 1 mL
- 2: Tubo de teflón con diámetro interior $D_i=0.8$ mm y longitud $L \approx 40$ cm
- 3: Agujas hipodérmicas
- 4: Fuente de voltaje
- 5: Polímetro con resistencia interna de $1\text{ M}\Omega$

Esta configuración da lugar al esquema eléctrico de la figura 36. Los valores conocidos son:

- V_t : voltaje proporcionado por la fuente.
- $R_p = 1\text{ M}\Omega$. Resistencia interna del polímetro.
- V_p : caída de tensión en el polímetro.

Conociendo la resistencia del polímetro y con la medida de voltaje que marca el mismo en esa resistencia, es sencillo conocer la intensidad I que circula por el circuito. Bastaría hallar el valor de la resistencia R_f , la cual está asociada con la resistencia ofrecida por el fluido que se encuentra en el tubo. Esta se obtiene aplicando la segunda ley de Kirchhoff a la única malla que se tiene:

$$V_t = I(R_p + R_f) \longrightarrow R_f = \frac{V_t}{I} - R_p \quad (5)$$

Dicha resistencia R_f se puede expresar en función de la longitud L y el área A de la sección interior del tubo, ambas conocidas, y de la conductividad k de la disolución, la cual se pretende obtener:

$$R_f = \frac{L}{kA} \rightarrow k = \frac{L}{R_f A}, \quad (6)$$

donde,

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (7)$$

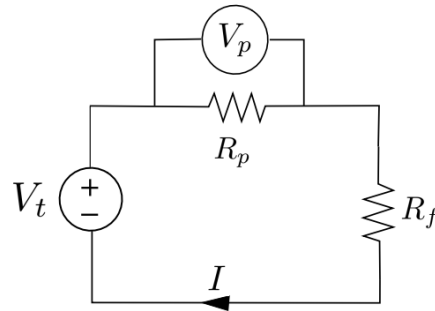


Figura 36: Esquema eléctrico del montaje utilizado para medir la conductividad de las disoluciones.

Este procedimiento se repitió hasta en 5 ocasiones con distintos voltajes de la fuente para cada disolución. Los valores representados en la figura 18 se corresponden con la media aritmética obtenida de las diferentes medidas.

II. Caracterización del aerosol

En el presente anexo se proporciona una descripción detallada del montaje utilizado para la caracterización del aerosol, así como del procedimiento seguido para obtener los resultados presentados.

La figura 37 muestra el montaje utilizado para la grabación del flujo de aerosol, el cual se compone de una cámara de alta velocidad y una fuente de luz. La figura 39 proporciona un esquema ilustrativo del mismo. Es importante destacar que se colocó un pequeño tubo de acero en el centro del tubo y en su salida, como se observa en la figura 38. Ello permitió enfocar la cámara de manera precisa en ese plano específico, utilizándolo como referencia de manera que se garantizase que se estaban registrando las gotas presentes en el centro del flujo y justo en la salida. De lo contrario, se correría el riesgo de grabar las gotas más próximas a la pared del tubo, cuya velocidad se ve disminuida debido al rozamiento con las superficies internas del tubo.



Figura 37: Montaje utilizado para grabar la corriente del aerosol.

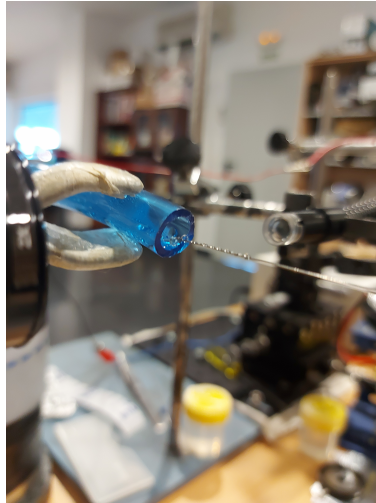


Figura 38: Imagen del tubo de acero colocado a la salida del tubo.

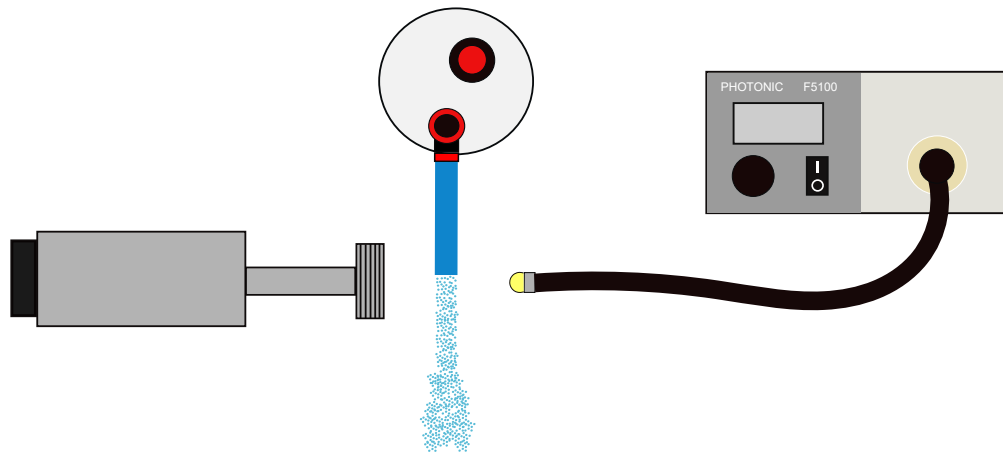


Figura 39: Esquema del montaje utilizado para grabar la corriente del aerosol.

- Cámara de alta velocidad: FASTCAM APX RS Photron
- Fuente de luz: PHOTONIC F5100

Una vez fueron grabados los vídeos, se empleó el software *MATLAB* para el tratamiento de los mismos y la extracción de resultados. El código utilizado ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos por el Doctor Antonio Jesús Hijano Reyes.

El código emplea un método de binarización para detectar las gotas en cada imagen del vídeo. En la figura 40 se muestra un ejemplo de una imagen obtenida directamente del vídeo y, por otro lado, esta misma imagen tras haber pasado el proceso de binarización. Se puede observar como en determinadas zonas blancas que el programa detecta como gotas, hay un pequeño punto rojo en su centro el cual corresponde con su centroide. Si estas zonas blancas no cumplen con los requisitos impuestos, no son consideradas gotas y no se

les añade su centroide. Son estos puntos rojos con los se trabaja para obtener, por ejemplo, la concentración, calculando la distancia promedio entre ellos.

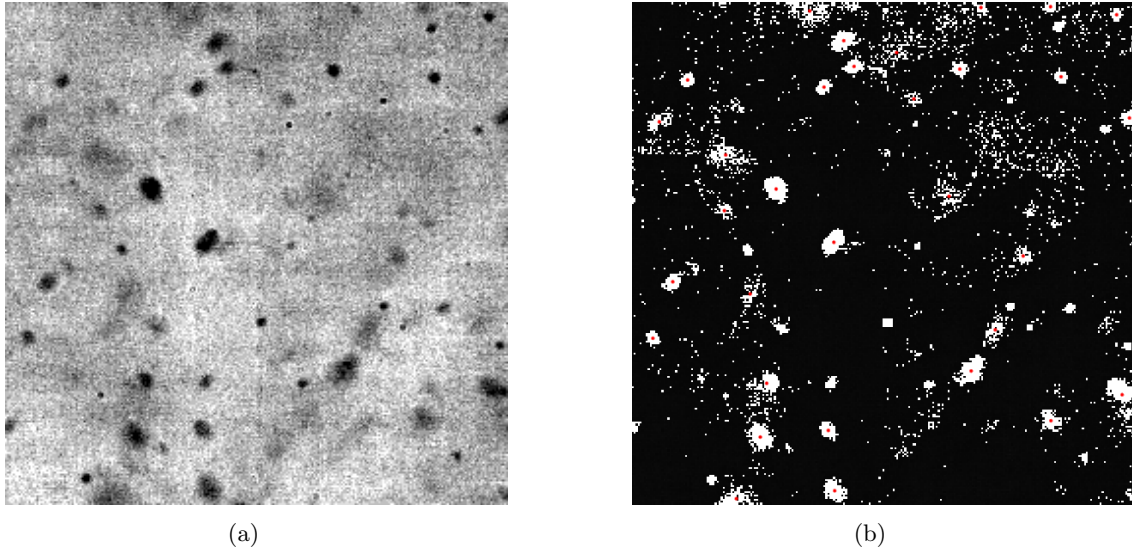


Figura 40: (a) Ejemplo de una imagen sin procesar. (b) Ejemplo de la imagen tras haber pasado el proceso de binarización.

Referencias

- [1] Matthias Wilm. “Principles of electrospray ionization”. En: *Molecular & cellular proteomics* 10.7 (2011).
- [2] Justin Tang et al. “High Performance Metal Oxide–Graphene Hybrid Nanomaterials Synthesized via Opposite-Polarity Electrosprays”. En: *Advanced Materials* 28.46 (2016), págs. 10298-10303.
- [3] Woojin Kim y Sang Soo Kim. “Synthesis of biodegradable triple-layered capsules using a triaxial electrospray method”. En: *Polymer* 52.15 (2011), págs. 3325-3336.
- [4] John B. Fenn. *Electrospray air sampler*. US Patent App. 10/384,437. Feb. de 2004.
- [5] Gary Tepper, Royal Kessick y Dmitry Pestov. “An electrospray-based, ozone-free air purification technology”. En: *Journal of Applied Physics* 102.11 (2007), pág. 113305.
- [6] Michael Dziekan. *Electrospray Collection of Lunar Dust*. Inf. téc. 2012.
- [7] Joseph J Bango et al. “A Pandemic Early Warning System Decision Analysis Concept Utilizing a Distributed Network of Air Samplers via Electrostatic Air Precipitation”. En: *Applied Sciences* 11.11 (2021), pág. 5308.
- [8] Antonio Jesus Hijano Reyes. “Fundamental aspects of electrospray operations. Applications to the production of microdroplets, nanoparticles and emulsions (Tesis de doctorado).” En: *Universidad de Málaga* (2018).
- [9] A. Jaworek y A. Krupa. “Classification of the modes of EHD spraying”. En: *Journal of Aerosol Science* 30.7 (1999), págs. 873-893.
- [10] Zhentao Wang et al. “Visualization of periodic emission of drops with micro-dripping mode in electrohydrodynamic (EHD) atomization”. En: *Experimental Thermal and Fluid Science* 105 (2019), págs. 307-315.
- [11] Joan Rosell-Llompart, Jordi Grifoll e Ignacio G. Loscertales. “Electrosprays in the cone-jet mode: From Taylor cone formation to spray development”. En: *Journal of Aerosol Science* 125 (2018), págs. 2-31.
- [12] Alexandros Repanas, Sofia Andriopoulou y Birgit Glasmacher. “The significance of electrospinning as a method to create fibrous scaffolds for biomedical engineering and drug delivery applications”. En: *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 31 (2016), págs. 137-146.
- [13] Anatol Jaworek y A Krupa. “Main modes of electrohydrodynamic spraying of liquids”. En: *Third International Conference on multiphase Flow*. 1998, págs. 8-12.
- [14] R Bocanegra et al. “Multiple electrosprays emitted from an array of holes”. En: *Journal of Aerosol Science* 36.12 (2005), págs. 1387-1399.
- [15] Alfonso M Ganán-Calvo et al. “Review on the physics of electrospray: from electrokinetics to the operating conditions of single and coaxial Taylor cone-jets, and AC electrospray”. En: *Journal of Aerosol Science* 125 (2018), págs. 32-56.
- [16] J Fernández De La Mora e Ignacio González Loscertales. “The current emitted by highly conducting Taylor cones”. En: *Journal of Fluid Mechanics* 260 (1994), págs. 155-184.

-
- [17] Ángel Pereña Tapiador. “Análisis del flujo en atomizadores de presión con giro”. Tesis doct. Espacio, 2017.
- [18] Alberto Ranz Elías, Juan Antonio García Rodríguez y José Luis Santolaya Sáenz. “Caracterización experimental de la atomización ultrasónica de líquidos con partículas en suspensión”. En: Universidad de Zaragoza. 2017.
- [19] Christopher Wayne Potts. “Development of a centrifugal atomizer”. Tesis doct. California State University, Sacramento, 2017.
- [20] RP Fraser, N Dombrowski y JH Routley. “The atomization of a liquid sheet by an impinging air stream”. En: *Chemical Engineering Science* 18.6 (1963), págs. 339-353.
- [21] Julianna C Simon et al. “Ultrasonic atomization of liquids in drop-chain acoustic fountains”. En: *Journal of fluid mechanics* 766 (2015), págs. 129-146.
- [22] Antonio Lozano et al. “Influence of liquid properties on ultrasonic atomization”. En: *Ilass Europe. 28th european conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Editorial Universitat Politècnica de València. 2017, págs. 35-42.
- [23] Gonzalo Vazquez, Estrella Alvarez y Jose M Navaza. “Surface tension of alcohol water+ water from 20 to 50. degree. C”. En: *Journal of chemical and engineering data* 40.3 (1995), págs. 611-614.