



Análisis computacional de la eficiencia del efecto corona para el filtrado de aire: remoción de gotículas del orden de $PM_{2.5}$

Espinosa García, A., Rodríguez Lelis, J. M. y Rojas Chávez, H. (2025). Análisis computacional de la eficiencia del efecto corona para el filtrado de aire: remoción de gotículas del orden de $PM_{2.5}$ [*Postprint*]. CIENCIA *ergo-sum*, 33.

<https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a52>

Sección: Ciencias Exactas y Aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

Análisis computacional de la eficiencia del efecto corona para el filtrado de aire: remoción de gotículas del orden de PM_{2.5}
Computational analysis of the corona effect efficiency for air filtration: removal of droplets of the order of PM_{2.5}

Alaín Espinosa García, Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México¹

Correo electrónico: alain_e.garcia@outlook.es

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7798-3899>

José María Rodríguez Lelis, Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México

Correo electrónico: jose.rl@cenidet.tecnm.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8288-8861>

Hugo Rojas Chávez, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tláhuac II, México

Correo electrónico: hugo.rc@tlahuac2.tecnm.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2856-2043>

Recepción: 13 de mayo de 2024

Aprobación: 5 de julio de 2025

RESUMEN

Haciendo uso de la Dinámica de Fluidos Computacional se determinó la viabilidad que tiene el efecto corona para su aplicación en el filtrado de partículas PM_{2.5}. Tanto en el modelo teórico como la comprobación experimental se utilizó una configuración coaxial de 1.5 cm de diámetro, a través de ésta se indujo un flujo de aire con velocidades de entre 0.5 y 1.5 m/s. En dicho flujo se liberaron gotículas con tamaños entre 0.3 y 2.5 µm y sobre el electrodo central se aplicó un potencial de 10 kV. Los resultados muestran que entre menor sea el tamaño de las partículas, menor es la eficiencia del filtro para recolectarlas; sin embargo, se consiguió hasta un 98% de efectividad en su recolección.

PALABRAS CLAVE: filtro de aire, partículas PM_{2.5}, efecto corona, precipitador electrostático.

ABSTRACT

Using Computational Fluid Dynamics, the feasibility of the corona effect for its application in the filtering of PM_{2.5} particles was determined. Both in the theoretical model and in the experimental verification, a coaxial configuration of 1.5 cm in diameter was used, through which an air flow was induced with velocities between 0.5 and 1.5 m/s. In such flow, droplets with sizes between 0.3 and 2.5 µm were released and a potential of 10 kV was applied to the central electrode. The results show that the smaller the size of the particles, the lower the efficiency of the filter to collect them; however, up to 98% effectiveness was achieved in collecting them.

KEYWORDS: air filter, corona effect, electrostatic precipitator, PM_{2.5} particles.

¹ Autor para correspondencia.

INTRODUCCIÓN

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (EPA, por sus siglas en inglés) ha identificado la calidad del aire como uno de los riesgos ambientales para la salud pública. El aire que respiramos puede contener una variedad de contaminantes como virus, bacterias, polen, polvo, humo y compuestos orgánicos volátiles, entre otros (Nunez, 2024; U.S. Environmental Protection Agency, 1989). Además, las personas aún corren el riesgo de infectarse por el virus SARS CoV-2, que como se sabe, se trasmite, al igual que muchos otros virus, por medio de gotículas dispersas en el aire.

Para mejorar la calidad del aire se emplean sistemas de filtrado, los más comunes utilizan elementos de barrera donde las partículas se anclan mecánicamente sobre las fibras del material y, a su vez, permiten el paso de aire entre los poros que se forman. Sin embargo, el uso de este tipo de filtros reduce el flujo de aire debido a las barreras físicas (Yocupicio-gaxiola et al., 2021).

Un método eficiente para la remoción de las partículas y/o contaminantes es la ionización del aire. Diversos estudios reportados en la literatura han confirmado que existe una reducción significativa en las concentraciones de partículas en el aire debido a la presencia de iones, con una efectividad de hasta un 99 % (Behjat et al., 2021; Xia et al., 2019, 2020).

Uno de los métodos para ionizar el aire es el efecto corona, éste es un fenómeno físico-químico que se produce cuando se hace pasar alta tensión por un conductor y el gas que rodea a este se carga eléctricamente, y en algunas ocasiones cuando el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte es perceptible un halo de color azul (Sherlie, 2021).

Un gas como el aire es normalmente un aislante casi perfecto, pero debido al trasfondo natural de radiactivos y radiación cósmica, los iones y electrones siempre estarán presentes. En consecuencia, un campo eléctrico aplicado provocará una corriente que, en condiciones normales y con intensidades de campo bajas, es muy débil. A intensidades de campo más altas, la corriente aumenta considerablemente debido a la aparición de procesos ionizantes en el gas y en la superficie del electrodo negativo.

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos que utilizan el efecto corona para eliminar partículas sólidas suspendidas en un flujo de gas, como humo, polvo o partículas finas. Estos

dispositivos son comúnmente utilizados en la industria y en plantas de energía para controlar las emisiones en el aire. El principio de funcionamiento de estos dispositivos es mediante la generación de campos eléctricos de alta intensidad para cargar y atraer las partículas suspendidas hacia las placas recolectoras de polaridad opuesta. Estas partículas se adhieren a las placas, limpiando así el flujo de aire (Gao et al., 2020).

La tecnología basada en plasma artificial se ha utilizado en procesos industriales que buscan reducir contaminación y residuos tóxicos generados, procurando que sean baratos y alcancen una eficiencia aceptable (Choi et al., 2021; De Oliveira & Guerra, 2021).

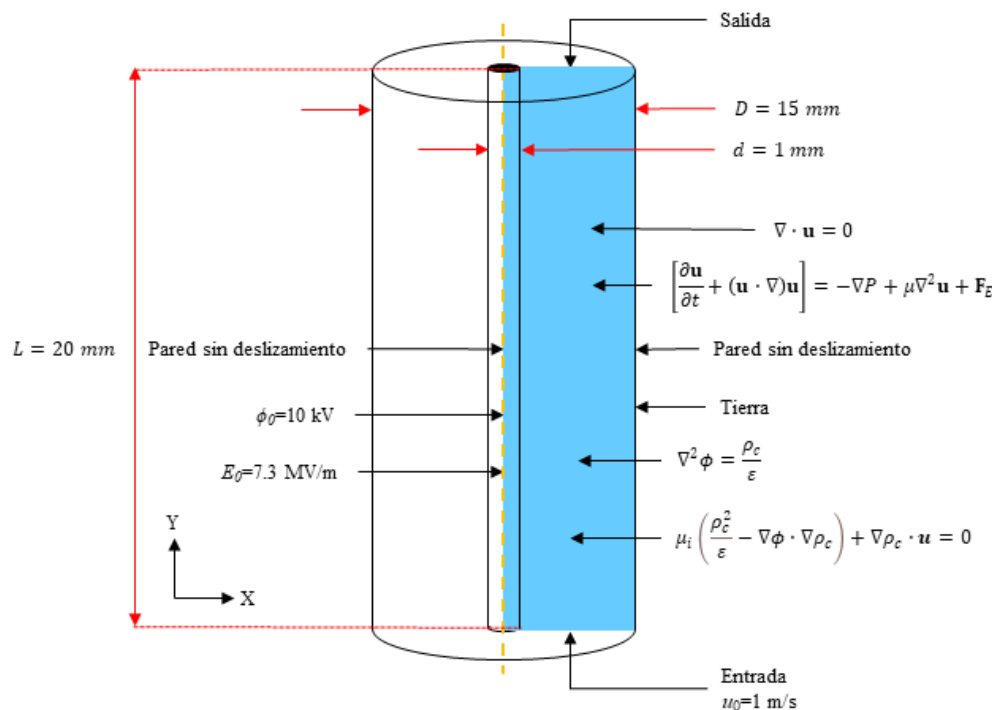
En el caso de las gotículas o partículas líquidas existe poca información acerca de su comportamiento bajo la influencia del efecto corona, teóricamente estas partículas se rigen bajo los mismos principios físicos y lo único que varía son las propiedades de dichas partículas (Behjat et al., 2021; Yang et al., 2019), por lo tanto la electrodinámica engloba las condiciones físicas para comprobar numéricamente la eficiencia que tiene la aplicación del efecto corona en una geometría de dimensiones específicas, para remover gotículas iguales o menores a 2.5 μm .

1. METODOLOGÍA

1.1. Domino y condiciones de frontera

El estudio computacional se lleva a cabo con el software COMSOL Multiphysics y se basa en un precipitador electrostático de geometría coaxial y simplificado a un modelo 2D axisimétrico de dimensiones: 15 mm de diámetro exterior, 20 mm de longitud y 1 mm de diámetro del alambre interno, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 1
Esquema del filtro concéntrico, dimensiones y condiciones de contorno para el modelo 2D axisimétrico (marcado en azul)



Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento del modelo consiste en aplicar alto voltaje en el electrodo central mientras que el tubo exterior funge como tierra. En uno de los extremos del precipitador se liberan n cantidad de partículas en el rango de tamaño equivalente a las PM2.5, de éstas se seleccionaron cuatro tamaños de partícula como muestras representativas (i.e., $d_1=0.3 \mu\text{m}$, $d_2=0.5 \mu\text{m}$, $d_3=1 \mu\text{m}$ y $d_4=2.5 \mu\text{m}$). Dichas partículas son arrastradas por un flujo de aire el cual varía su velocidad entre 0.6, 1 y 1.5 m/s.

Las partículas que se liberan representan gotículas en el orden de tamaño que están compuesta por un 99% de agua y contienen solo un 0.2% de materia orgánica (Behjat et al., 2021; Kubala et al., 2018). Por lo que las gotículas que contienen algún patógeno tienen propiedades físicas iguales a las del agua, cabe resaltar que la importancia del tamaño radica en que este tipo de partículas tienen la capacidad para infiltrarse en el sistema respiratorio hacia los pulmones (Martínez-Valdeavellano, 2023; Nazarenko et al., 2021; Vera et al., 2021). Por el contrario, las partículas con tamaños mayores a $2.5 \mu\text{m}$ es poco probable que lleguen a los pulmones pues quedan atrapadas por los vellos nasales y/o por la membrana mucosa (Echeverri y Vasco, 2008).

Cuando las partículas atraviesan por el precipitador acumulan carga eléctrica a lo largo de su trayectoria y se vuelven susceptibles a las fuerzas eléctricas que desvían sus trayectorias en dirección del cilindro colector. El potencial eléctrico requerido para ionizar el aire, así como las partículas en dicho fluido, depende del radio del alambre central en el precipitador coaxial y se calcula mediante la ley de Peek (Behjat et al., 2021; Fayyad et al., 2023; Lyulyukin et al., 2011), al mismo tiempo esta ley permite determinar el campo eléctrico que se genera en la superficie del conductor (Peek, 1920):

$$\phi_0 = m_v E_0 \delta r \ln \frac{R}{r} \quad (1)$$

$$E_0 = 31\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (2)$$

Donde, ϕ_0 es el voltaje de ignición de la corona, m_v es el coeficiente de rugosidad del conductor (para hilos de superficie lisa $m_v = 1$, para hilos oxidados o rugosos $m_v = 0.93$ y 0.98 , respectivamente), R [cm] es el radio del cilindro exterior, r [cm] es el radio del alambre, E_0 [kV/cm] es el gradiente de potencial crítico de ignición de la corona de acuerdo al diámetro del alambre, en este caso es de 3 MV/m (Peek, 1920) y δ es el factor de corrección de la densidad de aire ($\delta = 1$ para condiciones atmosféricas de temperatura y presión).

1.2. Modelo

El efecto corona toma lugar cuando se aplica alto voltaje sobre un conductor y el campo eléctrico que se genera ioniza el aire y a las partículas alrededor del conductor. Por lo tanto, el efecto corona es gobernado por la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (3)$$

Donde, ρ_c [C/m³] es la densidad de carga, ϵ [F/m] es el coeficiente dieléctrico absoluto y ϕ [V] es el potencial eléctrico.

De acuerdo con la magnitud y tipo de carga que adquieren las partículas, por efecto de la fuerza de Coulomb, éstas pueden ser repelidas o atraídas hacia el cátodo o ánodo. El

movimiento que realizan las cargas genera una corriente eléctrica, la cual es definida como densidad de corriente:

$$\mathbf{J} = \mu_i \rho_c \mathbf{E} + \rho_c \mathbf{u} \quad (4)$$

Donde, J [A/m²] es la densidad de corriente, μ_i [m²/Vs] es la movilidad iónica, u [m/s] es la velocidad del fluido o gas donde se genera la corona y E [V/m] es el campo eléctrico. En condiciones de estado estacionario, la ecuación de densidad de corriente debe satisfacer la ecuación de conservación de carga:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (5)$$

Al mismo tiempo, en su camino hacia los electrodos, los iones frecuentemente chocan con moléculas de gas y otras partículas eléctricamente neutras a las que les transfieren impulso (Xu et al., 2021; Zhao & Adamiak, 2005). Como resultado, la fuerza de Coulomb que actúa sobre los iones se convierte en una fuerza de cuerpo eléctrico que actúa sobre el gas, lo que da lugar al flujo electrohidrodinámico:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_e \quad (7)$$

Donde, ρ [kg/m³] es la densidad del fluido, P (Pa) es la presión estática, μ [kg/m·s] es la viscosidad del fluido y F_e [N/m³] es la fuerza electrohidrodinámica:

$$\mathbf{F}_e = \rho_c \mathbf{E} \quad (8)$$

La

Tabla 1 muestra las condiciones de operación utilizadas para realizar las simulaciones.

Postprint

Tabla 1
Condiciones de operación del filtro y constantes necesarias para la simulación

Descripción de variable	Símbolo/Valor	Descripción de variable	Símbolo/Valor
Permitividad eléctrica del vacío	$\varepsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12} [\text{F/m}]$	Velocidad del flujo de aire	u
Permitividad relativa del aire	$\varepsilon_r=1.00054$ [adimensional]	Campo eléctrico	E
Densidad del aire	$\rho=1.23 [\text{kg/m}^3]$	Densidad de carga	ρ_c
Viscosidad dinámica del aire	$\mu=1.8 \times 10^{-4} [\text{N}\cdot\text{s/m}^2]$	Densidad de corriente	J
Movilidad iónica	$\mu_i=2 \times 10^{-4} [\text{m}^2/\text{Vs}]$	Potencial eléctrico (Voltaje de ignición)	$\phi_0=10 [\text{kV}]$
Presión atmosférica	$P=1 [\text{atm}]$	Gradiente de potencial crítico	$E_0=7.3 [\text{MV/m}]$
Temperatura ambiente	$T=298 [\text{K}]$	Velocidad del flujo de aire a la entrada	$u_0=1 [\text{m/s}]$

Fuente: Elaboración propia.

1.3. Acumulación de carga en las partículas

La acumulación de carga en partículas es el proceso mediante el cual las partículas cargadas eléctricamente, como electrones y protones, adquieren una carga eléctrica neta debido a la transferencia de electrones entre ellas o debido a la influencia de campos eléctricos externos (Behjat et al., 2021; Mizuno, 2000). La carga por difusión es el mecanismo dominante para partículas pequeñas o campos eléctricos bajos, mientras que la carga por campo eléctrico es dominante para partículas grandes y campos elevados. En tamaños intermedios, la difusión y la carga de campo pueden coexistir. Una forma sencilla de estimar la tasa de carga total es simplemente sumar las contribuciones de los dos mecanismos de carga.

Lawless (1996) desarrolló un modelo más elaborado para combinar difusión y carga de campo que reduce el componente de difusión a medida que el campo se vuelve más fuerte, ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, dando una tasa de carga por difusión distintiva por encima de la carga de saturación.

$$\tau_c \frac{dZ}{dt} = \begin{cases} R_f + f_a & (|v_e| \leq |v_s|) \\ R_d f_a & (|v_e| > |v_s|) \end{cases} \quad (9)$$

Donde, τ_c es el tiempo de carga característico, Z es la carga total de la partícula, R_f y R_d son las tasas de carga debidas al transporte de campo eléctrico y de difusión respectivamente,

ambas variables son adimensionales, f_a es una función utilizada para unir las tasas de carga de difusión y campo, v_e es la carga de la partícula y v_s es la carga de saturación de una partícula dieléctrica, los valores obtenidos de esta ecuación diferencial continua son adimensionales.

1.4. Trayectoria de partículas

Para comprobar la efectividad del fenómeno de descarga de corona se trazan las trayectorias de las partículas liberadas. Éstas se determinan resolviendo las ecuaciones de movimiento para las componentes del vector posición, siguiendo la segunda ley de Newton.

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{v} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \mathbf{F}_t \quad (11)$$

Donde, $\mathbf{q}$ [m] es la posición de las partículas, $\mathbf{v}$ [m/s] es la velocidad de la partícula, m_p [kg] es la masa de la partícula y $\mathbf{F}_t$ es la fuerza total que actúa sobre la partícula. Las fuerzas que actúan sobre las partículas son la fuerza de arrastre, producida por el flujo del aire, y la fuerza eléctrica, generada por el campo eléctrico.

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p S} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_E = qZ\mathbf{E} \quad (13)$$

Donde, $\mathbf{F}_D$ [N] es la fuerza de arrastre de acuerdo con el modelo de Cunningham (Fayyad et al., 2023), τ_p [s] es el tiempo de respuesta de la velocidad de las partículas, S es el coeficiente de corrección de arrastre. $\mathbf{F}_E$ [N] es la fuerza eléctrica, q [C] es la carga eléctrica de la partícula, Z es el número de acumulación de carga de cada partícula.

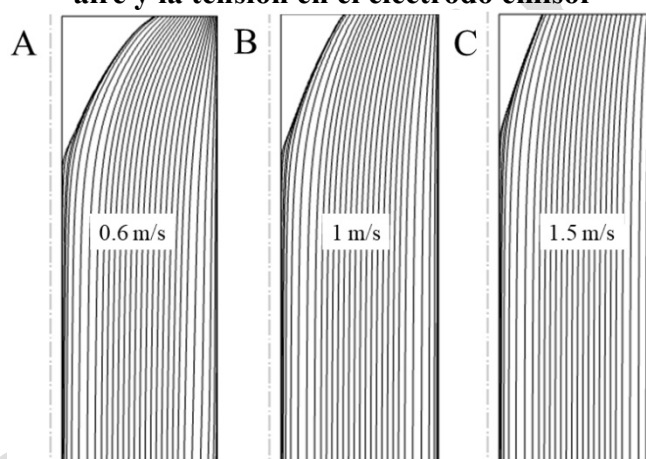
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Estudio computacional

La variación en la velocidad del fluido que atraviesa el filtro es una componente que puede generar cambios en la trayectoria de las partículas y por consecuencia mermar la eficiencia

de recolección de gotículas, por lo que es importante considerar dicho cambio y así determinar el comportamiento de las partículas a analizar. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las líneas de flujo de aire bajo la influencia de la fuerza electrohidrodinámica a velocidades de aire entrante de 0.6, 1 y 1.5 m/s. En esta figura se muestra como la fuerza electrohidrodinámica actúa en dirección a las líneas del campo eléctrico sobre las partículas del fluido. Asimismo, se observa como dicha fuerza deforma el flujo de aire en dirección al electrodo emisor, sin embargo, al aumentar la velocidad del aire a la entrada del filtro, la fuerza electrohidrodinámica tiene menor efecto en el fluido.

Figura 2
Comportamiento de las líneas de flujo de aire cuando varía la velocidad de entrada de aire y la tensión en el electrodo emisor

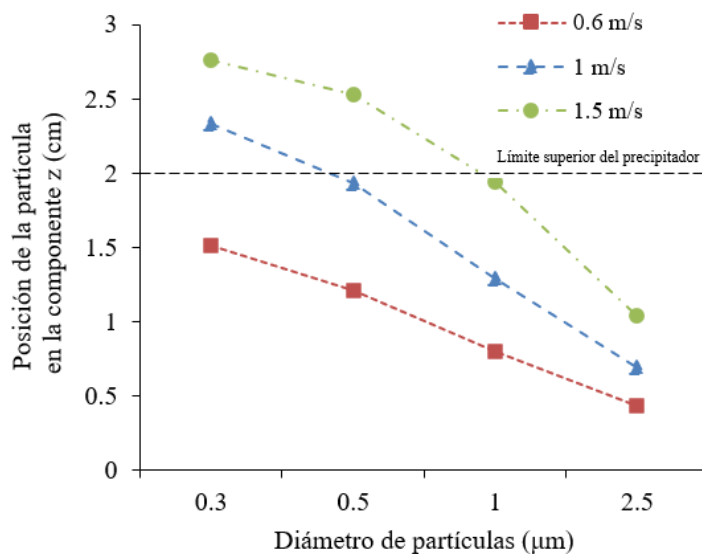


Fuente: Elaboración propia.

Este aumento en la velocidad del flujo de aire se ve reflejado en un mayor recorrido vertical de las partículas.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las distancias máximas alcanzadas por cada tamaño de partícula en función del cambio en la velocidad del fluido. Se observa que las partículas de menor diámetro recorren una mayor distancia, mientras que las de mayor tamaño son removidas antes de alcanzar un recorrido menor a la mitad de la longitud del filtro.

Figura 3
Recorrido vertical promedio máximo de cada tamaño de partícula



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, en la Figura 3 se aprecia que, al aumentar la velocidad del fluido, las partículas aumentan su recorrido. De ahí que las partículas de menor tamaño son arrastradas por el fluido que tiene una velocidad de 0.6 m/s y éstas recorren una distancia de 1.5 cm.

Por otro lado, las partículas arrastradas por el fluido que tienen una velocidad de 1.5 m/s recorren una distancia hasta 182% mayor que las partículas arrastradas por el flujo a velocidad de 0.6 m/s. Es importante tener presente que este dato indica que las partículas mencionadas han alcanzado a sobrepasar la longitud total del filtro. Incluso, las partículas con tamaños de 0.5 μm, arrastradas por un flujo con velocidad de 1 m/s, se encuentran cerca de atravesar el filtro.

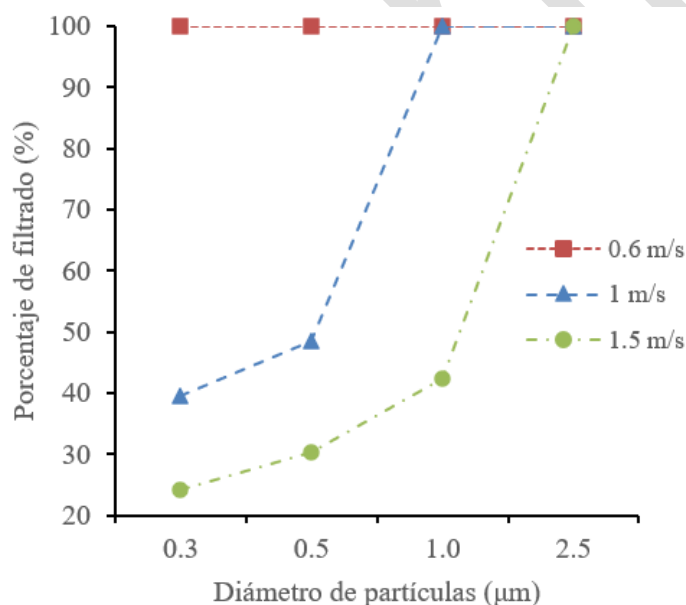
Si bien la información mostrada resulta útil para entender el comportamiento de las partículas, la forma más conveniente para comprobar el funcionamiento del filtro es determinar la eficiencia de filtrado de partículas mediante la ecuación de eficiencia η :

$$\eta = \frac{C_s}{C_e} \times 100 \quad (14)$$

Donde, C_e es el número de partículas que entran al filtro y C_s es el número de partículas que salen del filtro. Por lo tanto, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra

los resultados obtenidos del estudio computacional. En esta figura se observa la relación entre la eficiencia de recolección de las partículas y su tamaño, cada curva representa la eficiencia de filtrado a distintas velocidades del fluido. Además, también es importante resaltar que todas las partículas son totalmente recolectadas de forma efectiva cuando la velocidad del aire es menor o igual a 0.6 m/s. Por el contrario, cuando la velocidad del aire aumenta, la eficiencia del filtrado reduce progresivamente, así como el rango de tamaños de las partículas filtradas. Es decir, las partículas de menor tamaño tienen un bajo porcentaje de recolección, por lo que entre mayor sea el tamaño de las partículas, mayor será su porcentaje de recolección. Dicha relación entre el tamaño de las partículas y su porcentaje de recolección tiene su origen en las fuerzas que actúan sobre éstas.

Figura 4
Eficiencia del filtro de efecto corona respecto al tamaño de las partículas y la velocidad de entrada del aire

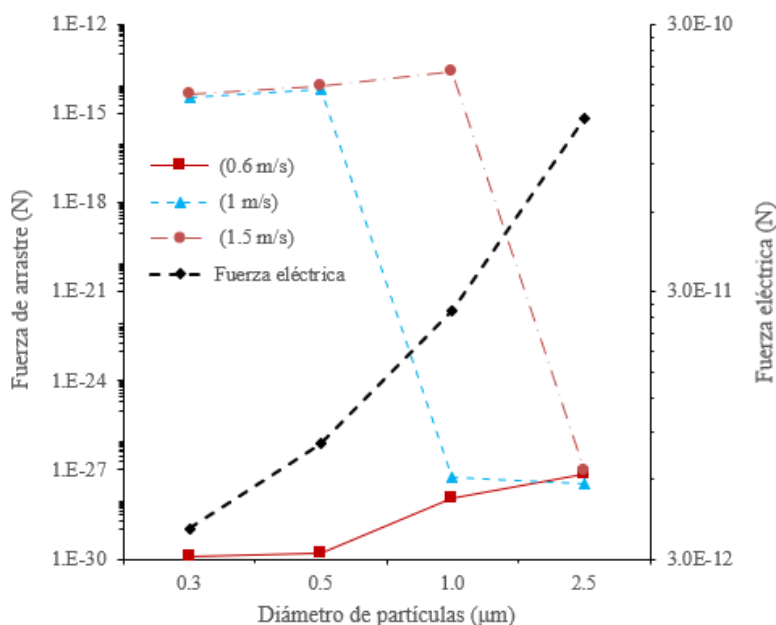


Fuente: Elaboración propia.

La η Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra la magnitud y el tipo de fuerzas que actúan sobre las partículas en relación con la velocidad del fluido. En esta figura se muestra cómo el aumento de la velocidad del aire genera un aumento exponencial de la fuerza de arrastre respecto al tamaño de las partículas. Cuando la velocidad inicial del aire que entra al filtro es de 0.6 m/s, se genera una fuerza máxima de 7.2×10^{-16} N sobre las partículas con tamaños de 0.3 μm. Sin embargo, cuando la velocidad del aire que ingresa es de 1 m/s, la

fuerza máxima ejercida sobre las partículas, con tamaño de $0.6\ \mu\text{m}$, es de $8.7 \times 10^{-15}\ \text{N}$. En el caso donde la velocidad del aire es de $1.5\ \text{m/s}$, en partículas con tamaños de $1\ \mu\text{m}$, la fuerza máxima ejercida es de $2.8 \times 10^{-14}\ \text{N}$. Los datos anteriores indican que las partículas de menor tamaño tienen menor resistencia al movimiento y, por ello, su recorrido es más largo, mientras que las partículas de mayor tamaño generan mayor resistencia al movimiento en dirección del flujo de aire, por lo tanto, su trayectoria se ve disminuida.

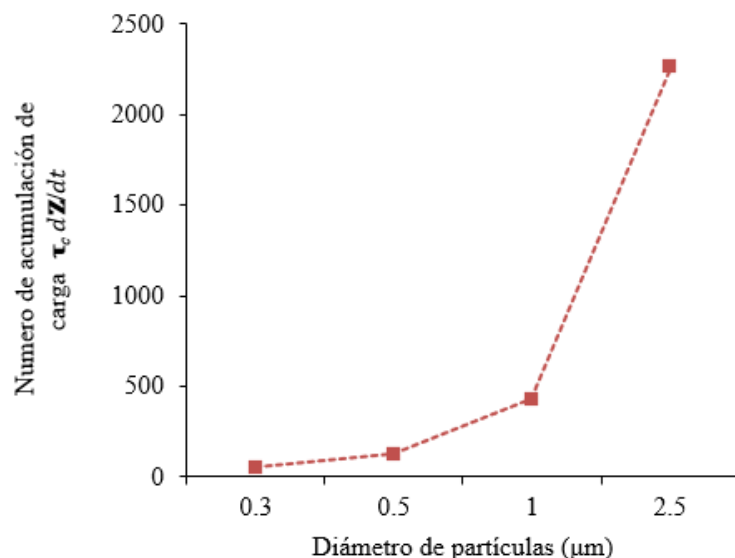
Figura 5
Magnitud de las fuerzas ejercidas sobre las partículas



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la fuerza eléctrica también actúa de forma exponencial conforme aumenta el tamaño de las partículas, con un valor mínimo de $1.5 \times 10^{-13}\ \text{N}$ en partículas con tamaños de $0.3\ \mu\text{m}$ y un máximo de $1.5 \times 10^{-10}\ \text{N}$ en partículas del orden de $2.5\ \mu\text{m}$. Esto se debe a que las partículas al estar bajo la influencia del campo eléctrico adquieren mayor o menor carga en función de su tamaño. De acuerdo con la **referencia.**, entre mayor sea el tamaño de la partícula mayor es la carga que acumula.

Figura 6
Promedio de carga acumulada por partícula en función de su tamaño



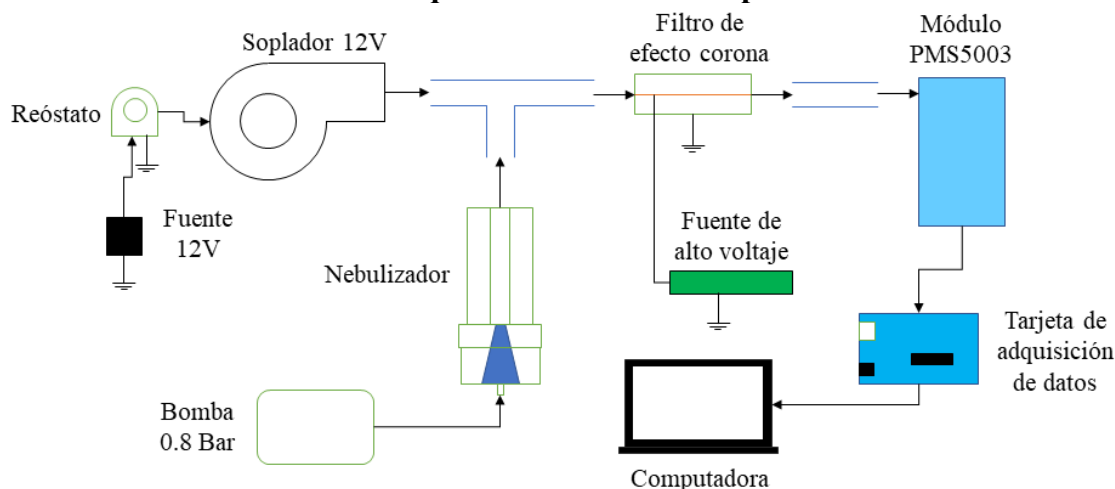
Por lo tanto, la eficiencia de recolección es mayor para partículas de mayor dimensión porque alcanzan una mayor carga eléctrica y están sujetas a una mayor fuerza de arrastre. Mientras que en las partículas más pequeñas ocurre todo lo contrario.

2.2. Comprobación experimental

Para corroborar los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, se fabricó un prototipo del filtro de efecto corona conforme a las especificaciones descritas por el diseño del dispositivo. Por lo tanto, mediante las pruebas realizadas en un banco experimental se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

El experimento que se realizó está basado en el trabajo de Y. Zhuang et al. (2000), éste consiste en atomizar las partículas y hacerlas pasar a través del filtro mediante un flujo controlado de aire, a la salida del filtro se encuentra un módulo que compara el tamaño de las partículas y mide la concentración de éstas respecto de un volumen de aire, ver Diagrama 1.

Diagrama 1
Diseño esquemático del banco experimental



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Valores máximos y mínimos en el conteo de partículas

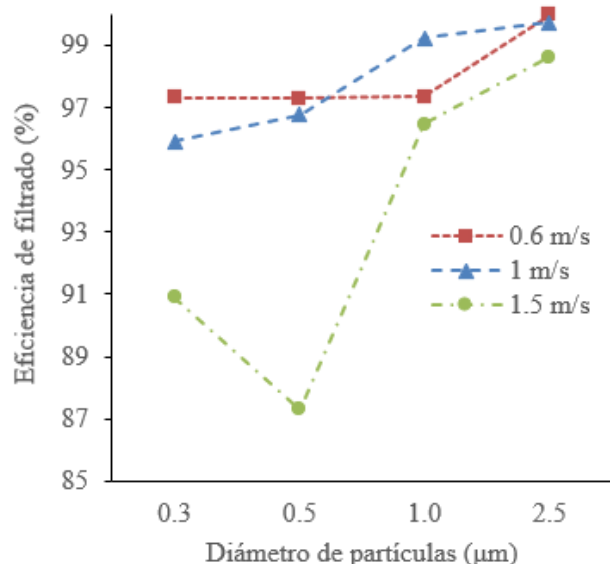
V_{aire}		0.6 m/s		1 m/s		1.5 m/s	
Concentración $\mu\text{g}/0.1\text{L}$		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Tamaño	0.3 μm	27000	720	47229	5720	62883	1923
	0.5 μm	8960	240	15557	2600	20472	500
	1 μm	2280	60	12142	500	14146	91
	2 μm	550	0	4214	50	3689	11

Fuente: Elaboración propia

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las líneas de eficiencia obtenidas mediante la aplicación de la ecuación de eficiencia sobre los valores máximos y mínimos de la tabla anterior. En la figura mencionada se aprecia que el comportamiento de filtrado de las partículas es similar a las mostradas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es decir, que las partículas de menor tamaño tienen menor probabilidad de ser removidas del flujo, al igual que ocurre cuando aumenta la velocidad en el flujo de aire. Si bien los resultados de las pruebas realizadas en el banco experimental no reflejan un comportamiento gradual entre las pruebas como el que se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es importante resaltar que en estos resultados las partículas de 0.5 μm tienen una eficiencia de recolección de 85% cuando la velocidad del flujo es de 1.5 m/s, es decir, 4% menos que las partículas con tamaños de 0.3 μm .

Postprint

Figura 7
Eficiencia del prototipo de filtro de efecto corona



Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, las partículas de $1\ \mu\text{m}$ de tamaño son recolectadas con una eficiencia de 99% cuando el flujo de aire entra a una velocidad de 1 m/s, aproximadamente 2% más que cuando la velocidad de aire entrante es de 0.6 m/s. Pese a que se observa una discordancia respecto de los resultados mostrado en la simulación. En la **referencia**, se muestran valores de eficiencia mayores para partículas de tamaños de $0.3\ \mu\text{m}$ y $0.5\ \mu\text{m}$ en comparación a los datos arrojados por el simulador, ver **el origen de la referencia..**

PROSPECTIVA

Al modelar y corroborar experimentalmente la remoción de gotículas menores o iguales a $2.5\ \mu\text{m}$ de un flujo de aire por medio de descargas de corona, se abre el camino a múltiples posibilidades de aplicación tecnológica. Este tipo de filtrado no solo representa una alternativa eficaz frente a los métodos convencionales de barrera física, sino que también ofrece ventajas estratégicas en términos de eficiencia energética, mantenimiento y adaptabilidad a distintos entornos.

Desde una perspectiva de aplicación, la tecnología de filtrado por efecto corona puede ser implementada en sistemas de ventilación y climatización (HVAC) en espacios cerrados como hospitales, escuelas, oficinas y transporte público, donde el control de agentes patógenos en

el aire es crucial. Asimismo, su escalabilidad permitiría desarrollos portátiles o integrables en mascarillas y purificadores personales, contribuyendo a mitigar riesgos de transmisión de enfermedades respiratorias en contextos de pandemia o contaminación ambiental elevada.

Además de la capacidad de remover partículas finas, el efecto corona genera especies reactivas como radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), los cuales tienen propiedades antimicrobianas, lo que amplía el potencial del sistema hacia la desactivación de microorganismos y no solo su captura. Esta dualidad abre nuevas líneas de investigación que integran modelos biofísicos de inactivación viral y bacteriana, validación en entornos clínicos, y análisis del impacto en la salud pública.

En el plano tecnológico, futuras investigaciones podrían centrarse en la optimización del diseño geométrico del filtro, la selección de materiales del electrodo para reducir costos y mejorar la durabilidad, así como el desarrollo de sistemas de monitoreo inteligente del rendimiento del filtro mediante sensores de calidad del aire integrados. De igual manera, se recomienda avanzar hacia una caracterización más detallada del comportamiento de partículas semilíquidas y biológicas bajo el efecto de campos eléctricos intensos.

También será relevante explorar los efectos de parámetros ambientales como la humedad relativa, temperatura, y presión, sobre la eficiencia del proceso de ionización y recolección. Esto permitirá mejorar la robustez del sistema en condiciones reales de operación.

Finalmente, el enfoque combinado de simulación y validación experimental adoptado en este trabajo sienta una base sólida para el desarrollo de futuras normas técnicas, particularmente para sistemas de filtrado activos, orientados tanto a la industria como al entorno doméstico. Este trabajo demuestra que el efecto corona es una herramienta versátil con alto potencial para revolucionar el tratamiento del aire en beneficio de la salud y el medio ambiente.

CONCLUSIONES

En la gama de partículas pequeñas, la carga parcial es importante porque de ésta depende la energía con la que interactúan las partículas con el campo eléctrico. Un modelo que describe correctamente la carga parcial debe capturar la naturaleza aleatoria en la que una partícula puede tener una carga de 1 o 0.

El modelo de acumulación de carga utilizado permite estimar la carga de las partículas por difusión o por campos eléctricos débiles, lo cual supone que es un modelo más preciso, sin embargo, un inconveniente que presenta dicho modelo es que las partículas se pueden cargar con un número entre 0 y 1, lo cual genera resultados de eficiencia de recolección inexactos para partículas pequeñas.

Por otro lado, los resultados obtenidos del experimento confirman que el efecto corona es un método adecuado para la remoción de gotículas en el orden de tamaño de las PM_{2.5}. El efecto corona genera una alta eficiencia de filtrado aún y cuando el flujo de aire que entra por el filtro es mayor a 1.5 m/s. Sin embargo, existe la posibilidad que reduzca la eficiencia del filtro cuando aumenta la velocidad del flujo.

Con base a los resultados teórico-experimentales, se presume que el filtro es capaz de remover hasta en un 95% partículas iguales o menores a 2.5 μm .

AGRADECIMIENTOS

Uno de los autores (A. Espinosa García) agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico que otorgado para el desarrollo de este trabajo, así mismo agradece al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y al Instituto Tecnológico de Tláhuac II por las facilidades proporcionadas.

REFERENCIAS

Behjat, V., Rezaei-Zare, A., Fofana, I., & Naderian, A. (2021). Concept design of a high-voltage electrostatic sanitizer to prevent spread of covid-19 coronavirus. *Energies*, 14(22).

<https://doi.org/10.3390/en14227808>

Choi, H. Y., Park, Y. G., & Ha, M. Y. (2021). Numerical simulation of the wavy collecting plate effects on the performance of an electrostatic precipitator. *Powder Technology*, 382, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.070>

De Oliveira, A. E., & Guerra, V. G. (2021). ELECTROSTATIC PRECIPITATION OF NANOPARTICLES AND SUBMICRON PARTICLES: REVIEW OF TECHNOLOGICAL STRATEGIES. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 153, pp. 422–438).

Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.07.043>

Echeverí, C. A., & Vasco, J. G. (2008). RELACIÓN ENTRE LAS PARTÍCULAS FINAS (PM_{2.5}) Y RESPIRABLES (PM₁₀) EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 23–42.

Fayyad, M. B., González, A. A., & Iváncsy, T. (2023). Numerical study of the influence of using crenelated collecting plates on the electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2023.103811>

Gao, W., Wang, Y., Zhang, H., Guo, B., Zheng, C., Guo, J., Gao, X., & Yu, A. (2020). A numerical investigation of the effect of dust layer on particle migration in an electrostatic precipitator. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(1), 166–179. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2019.11.0609>

Kubala, E., Strzelecka, P., Grzegocka, M., Lietz-kijak, D., Gronwald, H., Skomro, P., & Kijak, E. (2018). *A Review of Selected Studies That Determine the Physical and Chemical Properties of Saliva in the Field of Dental Treatment*. 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2018/6572381>

Lawless, P. a. (1996). PARTICLE CHARGING BOUNDS, SYMMETRY RELATIONS AND AN ANALYTIC CHARGING RATE MODEL FOR THE CONTINUUM REGIME. *Science*, 27(2), 191–215. <https://doi.org/0021-8502/96>

Lyulyukin, M. N., Besov, A. S., & Vorontsov, A. V. (2011). The influence of corona electrodes thickness on the efficiency of plasmachemical oxidation of acetone. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 31(1), 23–39. <https://doi.org/10.1007/s11090-010-9265-0>

Martínez-Valdeavellano, L. F. (2023). Impacto de la materia particulada fina (PM_{2.5}) en la morbilidad y mortalidad respiratoria. *Kompass Neumología*, 5(1), 16–18. <https://doi.org/10.1159/000529131>

Mizuno, A. (2000). Electrostatic precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(5), 615–624. <https://doi.org/10.1109/94.879357>

Nazarenko, Y., Pal, D., & Ariya, P. A. (2021). Air quality standards for the concentration of particulate matter 2.5, global descriptive analysis. *Bull World Health Organ*, 99(November 2020), 125–137. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2471/BLT.19.245704>

Nunez, C. (2024). Contaminación del aire. *National Geographic*.
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-aire-atmosferica>

Peek, F. W. (1920). *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering* (2° ed). McGraw-Hill.

Sherlie, P. (2021). *Introducción al plasma frío producido a través de descargas de barrera dieléctrica*. Universidad Tecnológica de Panamá.

U.S. Environmental Protection Agency. (1989). *Report on the Environment Indoor air quality*. EPA/400/1-89/001C. <https://tinyurl.com/3598f7s5>

Vera, R. C., Chirveches S., H., & Ricaldi P., J. (2021). Monitoreo ambiental de concentración de aire saturado y partículas PM2.5 para la prevención de la Salud Ocupacional en la Ciudad de Potosí a 4000m.s.n.m. *Mediciencias UTA*, 5(2), 61. <https://doi.org/10.31243/mdc.uta.v5i2.1086.2021>

Xia, T., Kleinheksel, A., Lee, E. M., Qiao, Z., Wigginton, K. R., & Clack, H. L. (2019). Inactivation of airborne viruses using a packed bed non-thermal plasma reactor. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(25). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab1466>

Xia, T., Yang, M., Marabella, I., Lee, E. M., Olson, B., Zarling, D., Torremorell, M., & Clack, H. L. (2020). Inactivation of airborne porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSv) by a packed bed dielectric barrier discharge non-thermal plasma. *Journal of Hazardous Materials*, 393. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122266>

Xu, K., Cui, K., Mou, J. L., Wang, Y. F., & Wang, L. C. (2021). Dust agglomeration in an electrostatic precipitator. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(8). <https://doi.org/10.4209/aaqr.210145>

Yang, D., Guo, B., Ye, X., Yu, A., & Guo, J. (2019). Numerical simulation of electrostatic precipitator considering the dust particle space charge. *Powder Technology*, 354, 552–560.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.06.013>

Yocupicio-gaxiola, R. I., Petranovskii, V., Perla, S., Ant, J., & Murrieta-rico, F. N. (2021). *Prospects for Further Development of Face Masks to Minimize Pandemics – Functionalization of Textile Materials with Biocide Inorganic Nanoparticles : A Review*. 19(6), 1010–1023.

Zhao, L., & Adamiak, K. (2005). EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin-plate configuration. *Journal of Electrostatics*, 63(3-4 SPEC. ISS.), 337–350.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.06.003>

Zhuang, Y., Kim, Y. J., Lee, T. G., & Biswas, P. (2000). Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*, 48(3–4), 245–260. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(99\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(99)00072-8)

CC BY-NC-ND