



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Diseño de un filtro de efecto corona para la
remoción del SARS-CoV-2: Anclaje mecánico del
virus mediante fuerzas mecánicas y
electrostáticas**

presentada por

Ing. Alaín Espinosa García

como requisito para la obtención del grado de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. José María Rodríguez Lelis

Codirector de tesis

Dr. Hugo Rojas Chavéz

Cuernavaca, Morelos, México. Abril de 2026.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico que me otorgó durante mis estudios de posgrado.

Al Centro nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por aceptarme como estudiante y acogerme en sus instalaciones.

Al Dr. José María Rodríguez por su paciencia y dedicación como director de este trabajo.

Al Dr. Hugo Rojas por sus consejos y atenciones como codirector de tesis.

A mi comité revisor, el Dr. José Antonio Arellano Cabrera, Dr. Eladio Martínez Rayón y Dra. Yvonne Chávez Chena por su valiosa aportación a este trabajo al igual que sus consejos.

Al profesor Héctor Guzmán Laguna por compartirme de su conocimiento y sabiduría y por los consejos y aportaciones a este trabajo.

A mis compañeros de tribología Irving, Julio y Jorge, a mis compañeros de generación Ana, German, Juan y Andrés, por su apoyo y por los momentos compartidos.

Agradezco y dedico este trabajo a mi familia, a mi esposa Gisela por impulsarme en realizar mis metas profesionales y por su paciencia, a mis padres Rosa y Rubén por hacer de mí una persona de bien y a mi hermano Ángel y su familia por sus palabras de aliento. Los Amo.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 15/diciembre/2025

Oficio No. SAC/295/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ALAIN ESPINOSA GARCÍA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

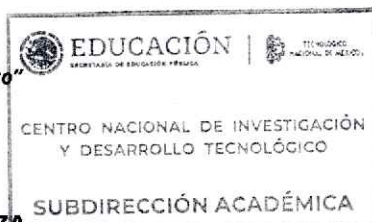
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Diseño de un filtro de efecto corona para la remoción del SARS CoV-2: anclaje mecánico del virus mediante fuerzas mecánicas y electrostáticas"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"



CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., 18/noviembre/2025

OFICIO No. DIM/212/2025
Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Alain Espinosa García con número de control M2ICE047, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"Diseño de un filtro de efecto corona para la remoción del SARS CoV-2: anclaje mecánico del virus mediante fuerzas mecánicas y electrostáticas"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


Dr. José María Rodríguez Leis
Director de tesis


Dr. Hugo Rojas Chávez
Codirector de tesis


Dr. Eladio Martínez Rayón
Revisor 1


Dr. José Antonio Arellano Cabrera
Revisor 2


Dra. Ivonne Chávez Chena
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 1421,
e-mail: dim@cenidet.tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



CONTENIDO

CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE..... 10

1.1	Introducción.....	11
1.2	Breve historia de las mascarillas	11
1.3	Panorama actual de las mascarillas	12
1.4	Filtrado de aire por ionización.....	14
1.5	Conclusiones del estado del arte.....	15

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO..... 18

2.1	Introducción.....	19
2.2	Plasma.....	19
2.2.1	Descarga en gases	20
2.3	Efecto corona.....	21
2.3.1	Potencial y campo eléctrico	21
2.3.2	Flujo electrodinámico	22
2.3.3	Acumulación de carga en las partículas.....	23
2.3.4	Flujo electrohidrodinámico.....	23
2.3.5	Trayectoria de las partículas	24
2.3.6	Tensión crítica y gradiente de potencial de efecto corona	26
2.4	Características del virus SARS CoV-2.....	27
2.4.1	Mecanismo de degradación de los virus por materiales desinfectantes	28
2.4.2	Efectos de la ionización del aire en microorganismos	31

CAPÍTULO 3 DISEÑO DE DISPOSITIVO 34

3.1	Introducción.....	35
3.2	Geometría del filtro	35
3.3	Fuente de alto voltaje.....	37

CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN NUMÉRICA Y MODELADO 41

4.1	Introducción.....	42
4.2	Condiciones de frontera.....	42
4.2.1	Parámetros para la simulación	43
4.2.2	Mallado	44

CAPÍTULO 5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1	Estudio de Dinámica de Fluidos Computacional	47
5.2	Banco experimental	53
5.2.1	Calibración del detector de partículas y medición de partículas PM 2.5	54
5.2.2	Generación del efecto corona	55
5.2.3	Generación de gotículas.....	56
5.3	Metodología experimental.....	57
5.3.1	Densidad de partículas en el flujo de aire	58
5.3.2	Visualización de las partículas en el fujo de aire.....	60
CAPÍTULO 6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	62
6.1	Conclusiones.....	63
6.2	Trabajos futuros.....	64
ANEXO.....		66
	Comprobacion de acumulacion de co2 al interior de cubrebocas comercial tipo KN95	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista general del dispositivo que describe la patente US20220054670A1 [23]. Dispositivo con dos terminales eléctricas separadas por un material dieléctrico de geometría tubular (1), conectado a un circuito elevador de tensión (2).	14
Figura 2. Estados de la materia en función del aumento de la energía cinética [36].	19
Figura 3. Descarga de Townsend (avalancha electrónica) [27].	20
Figura 4. Grafica de fases para descargas eléctricas en gases de acuerdo con la relación tensión-corriente [38].	20
Figura 5. Fuerzas que actúan sobre las partículas presentes en el fluido.	25
Figura 6. Trayectoria de las partículas bajo la influencia de los gradientes de potencial eléctrico (E) y flujo de aire (u).	26
Figura 7. Estructura del virus SARS CoV-2 [48].	27
Figura 8. Proceso de infección y replicación del coronavirus [51].	28
Figura 9. A) Molécula de jabón. B) Interacción de moléculas de jabón con coronavirus.	29
Figura 10. Inactivación de una bacteria al contacto con una superficie de plata [54].	29
Figura 11. Efecto del HUCoV-229E al contacto con acero inoxidable (A), comparado con el contacto al cobre (B), degradación del virus $t > 30$ min de exposición al cobre (C) [57].	30
Figura 12. Partículas obtenidas a partir de la ionización.	32
Figura 13. La unión de un electrón y una partícula neutra da como resultado un anión.	32
Figura 14. Sección transversal del filtro de efecto corona.	37
Figura 15. Filtro de efecto corona de placas paralelas: A) vista frontal y B) vista superior. ...	37
Figura 16. Fuente conmutada tipo <i>flyback</i>	38
Figura 17. Forma de onda para circuito de alto voltaje.	39
Figura 18. Transformador de alto voltaje TW-226.	40
Figura 19. Modelo discreto del filtro de efecto corona y sus condiciones de frontera.	42
Figura 20. Características físicas y condiciones de frontera de las gotículas infecciosas.	43
Figura 21. Mallado de la sección axisimétrica del filtro.	45
Figura 22. Densidad de carga y su distribución en la región de deriva.	47
Figura 23. Distribución del Potencial y campo eléctrico en la región de deriva del filtro.	48
Figura 24. Comportamiento de las líneas de flujo de aire cuando varia la velocidad de entrada de aire y la tensión en el electrodo emisor.	49

Figura 25. Recorrido vertical promedio máximo de cada tamaño de partículas.	50
Figura 26. Eficiencia del filtro de efecto corona respecto al tamaño de las partículas y la velocidad de entrada del aire.	51
Figura 27. Magnitud de las fuerzas ejercidas sobre las partículas.....	52
Figura 28. Promedio de carga acumulada por partícula en función de su tamaño.....	53
Figura 29. Diseño esquemático del banco experimental.	54
Figura 30. Comparación de las mediciones realizadas por el módulo PMS5003 contra datos obtenidos por el SINAICA	55
Figura 31. Circuito de pulsos.....	56
Figura 32. Visualización del efecto corona en el electrodo emisor.....	56
Figura 33. Banco experimental para monitorear la eficiencia del filtro de efecto corona.	57
Figura 34. Diagrama del proceso experimental.....	57
Figura 35. Eficiencia del prototipo de filtro de efecto corona.....	59
Figura 33. Equipo de pruebas, A) banco de experimentos al interior de la cámara oscura y B) vista exterior de la cámara oscura.....	60
Figura 34. Etapas de visualización del filtro de efecto corona, A) corona inactiva- ducto limpio (referencia), B) corona inactiva- flujo de gotículas, C) corona activa- precipitación de las gotículas y D) flujo de gotículas-adhesión de gotículas en pared de conducto.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros para el análisis del efecto corona en el diseño del filtro.....	44
Tabla 2. Valores máximos y mínimos en el conteo de partículas.	58

RESUMEN

La prevalencia de las enfermedades infecciosas ha ido en aumento en las últimas décadas; e.g., en el 2002 el Síndrome Respiratorio Agudo Grave, en el 2009 la gripe H1N1, en el 2012 el Síndrome Respiratorio de Oriente Medio y actualmente, la pandemia de la COVID-19 provocada por el virus SARS-CoV-2. Estos virus causan diferentes tipos de padecimientos como son respiratorios, gastrointestinales, neurológicos, hepáticos y trombóticos. La principal forma de su transmisión es por la vía respiratoria, por lo que la Organización Mundial de la Salud recomienda el uso de mascarillas faciales para protegerse de contraerlas. En un contexto internacional, numerosos grupos de investigación continúan indagando sobre nuevas estrategias para bloquear, disrumpir o eliminar –a diferentes niveles– el SARS-CoV-2. Con base en las premisas anteriores, en este trabajo se expone el fenómeno de efecto corona y su aplicación para el diseño de un filtro facial que permite la remoción de gotículas del SARS-CoV-2. Así mismo, se realiza un estudio de Dinámica de Fluidos Computacional para determinar la eficiencia del filtro ante gotículas en el orden de tamaño de las partículas PM 2.5 que son arrastradas por un flujo de aire, el cual representa el flujo en el proceso de respiración. Adicionalmente, se presentan los resultados del proceso experimental en donde se corrobora la eficiencia en la remoción de partículas dentro del filtro de efecto corona. Tanto en el modelo computacional como en la prueba experimental se obtuvieron resultados satisfactorios.

INTRODUCCIÓN

La transformación del mundo ha llevado a la humanidad a ser un conjunto de sociedades interconectadas, esto ha contribuido a que la propagación de virus entre humanos se dé con mayor facilidad, y con ello el surgimiento de pandemias; mismas que, al ser un problema de salud a nivel mundial han favorecido el desarrollo e investigación de métodos que permitan su prevención, control, e incluso su erradicación.

Actualmente, la humanidad es testigo de una de las pandemias más grandes en su historia, causada por el virus SARS CoV-2, perteneciente a la familia de los coronavirus, cuyo nombre, proviene del aspecto que le confieren las glicoproteínas ubicadas en forma de corona sobre su superficie. Sin embargo, es importante resaltar que el coronavirus no es un virus actual, ya que familiares del coronavirus existieron desde el 3300 a.C. [1]. Este tipo de virus generalmente causa infecciones respiratorias leves, no obstante, las mutaciones que sufre pueden derivar en infecciones graves e incluso puede provocar la muerte [2].

Se ha descubierto que la forma más común de transmisión de los coronavirus es a través de las gotículas, partículas contagiosas que quedan suspendidas en el aire y que son expulsadas por personas infectadas (al exhalar, estornudar o hablar), además que, parte de éstas podrían quedar adheridas en las distintas superficies del entorno [3]. Por esta razón para prevenir los contagios y los efectos colaterales que éstas puedan tener, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda lavarse las manos frecuentemente con agua y jabón, además de utilizar cubrebocas, ya que la OMS reconoce que la principal forma de transmisión del virus es a través de la inhalación de dichas partículas [4].

Así mismo, desde inicios del siglo XX se estableció que el cubrebocas es efectivo para reducir infecciones respiratorias, al ser un método físico de protección de barrera. Bajo esta premisa, se han realizado investigaciones e innovaciones, enfocadas en aumentar la protección del usuario. Nuevos materiales y técnicas de fabricación son implementados en el diseño de cubrebocas.

Sin embargo, las mascarillas cotidianas al ser una barrera física proporcionan un menor flujo de aire en el proceso de respiración e incluso pueden retener y concentrar el CO₂ exhalado (Anexo 1), provocando que éste sea inhalado y, en consecuencia, ocasione una menor

oxigenación arterial, así como diversos síntomas [5]. Si bien estas mascarillas cumplen con la función de filtrar, se ha descuidado la parte de ventilación. Por esta razón, es necesario encontrar una forma de remover las partículas nocivas sin afectar el flujo del aire inhalado y exhalado. Una alternativa que ha demostrado ser eficiente es la ionización de las partículas, cuando los iones son generados éstos son capaces de adherirse a las partículas presentes en el aire, al aumentar su carga eléctrica y estar en presencia de un campo eléctrico, éstos pueden ser conducidos por medio del flujo del campo eléctrico hacia un material colector.

OBJETIVO

Diseñar un filtro de alto flujo para la remoción, mediante fuerzas mecánicas y/o electrostáticas, de partículas nocivas para la salud, incluido el virus del SARS Co-V 2.

ALCANCES

- Descripción general y aplicación del efecto corona, así como los fenómenos físicos, químicos y mecánicos que se presenten en la generación de éste.
- Diseño del prototipo.
- Realización de las simulaciones pertinentes para determinar el comportamiento de las partículas en un fluido bajo la interacción del campo eléctrico y flujo de aire.
- Diseñar banco experimental y comparar resultados contra los obtenidos en las simulaciones.

Capítulo 1

Estado del Arte

1.1 Introducción

Desde que se descubrió que ciertas enfermedades se transmiten por vía aérea, se ha buscado mejorar los elementos de protección, por lo que existe un gran avance tecnológico en el desarrollo de mascarillas faciales. En este capítulo se presentan los antecedentes de las mascarillas faciales y el estado actual del avance tecnológico de estas mascarillas, así como antecedentes del método de efecto corona para el filtrado de aire.

1.2 Breve historia de las mascarillas

El uso de cubrebocas o máscara se remonta a civilizaciones antiguas. El escritor romano Plinio el Viejo (79-23 a.C.) [6], describe que en aquella época se usaba una especie de mascarilla protectora hecha con piel de vejiga de animales. En la edad media, con la peste bubónica, los médicos de esa época usaban ropa especial y portaban una máscara con forma de pico la cual contenía en su interior hierbas, especias y líquidos que ayudaban (según las creencias de la época) a no inhalar los malos aires que provocaban la peste negra [7].

En 1897 Carl Friedrich Flügge [7] publicó su trabajo sobre el desarrollo de infecciones por gotas como parte de la búsqueda del origen de la tuberculosis, ese mismo año, en conjunto con Teodor Billroth, mencionan en un artículo la realización de operaciones usando un "vendaje bucal". Por otro lado, Hübner [8] describe en su trabajo un protector bucal de doble capa fabricado de gasas que evita el esparcimiento de gotas.

En otoño de 1910 se reportaron los primeros casos de peste neumónica en la región de Manchuria en China, la cual se originó a partir de la marmota siberica que habitaba en los pastizales y estepas de Mongolia y Manchuria. En un estudio realizado por Wu Lien-teh se encontró que la cepa aislada de esta bacteria era similar a la causante de la peste bubónica. Por lo que el gobierno de China exhortó a las personas a usar máscaras hechas de gasa y algodón [9].

Los acontecimientos importantes que dieron pauta al origen y uso del cubrebocas son inherentes a las enfermedades causadas por epidemias y pandemias. Otro ejemplo de esto es la pandemia causada por el virus del síndrome respiratorio agudo grave (SARS, por sus siglas en inglés) en 2002, cuando se popularizó el uso de cubrebocas de tipo quirúrgico, el cual,

según estudios realizados, demuestran que reduce en 90% la propagación de enfermedades [10].

La forma en como estas mascarillas protegen es mediante el anclaje mecánico de las partículas que atraviesan por sus fibras. Sin embargo, el uso del cubrebocas convencional se limita a solo ser una barrea física y resultan ineficaces si el tamaño de las cavidades en el tejido del material usado es mayor al tamaño de las partículas infecciosas [11].

1.3 Panorama actual de las mascarillas

La situación de la pandemia ha hecho que las máscaras faciales sean la primera opción de protección para reducir la propagación viral. En consecuencia, se ha incrementado la búsqueda de nuevas tecnologías y la forma de mejorar las convencionales.

De acuerdo con el trabajo desarrollado por Araujo *et al.* [12], se mostró que en el periodo de un año (correspondiente al primer año de pandemia por COVID 19) se registraron más de 1200 patentes a nivel mundial, relacionadas con mascarillas faciales. De éstas se obtuvo la siguiente clasificación de acuerdo con su descripción: (1) Máscaras para polvo y partículas; (2) Máscaras con múltiples capas de filtración; (3) Máscaras antimicrobianas; (4) Máscaras de tela; (5) Escudo facial; (6) Máscaras con tecnología ultravioleta; (7) Máscaras con nanotecnología y (8) Máscaras con otros tipos de tecnologías.

La primera clasificación de mascarillas hace referencia a aquellas que actúan como una medida básica de intervención no farmacéutica, eficaz en la prevención de enfermedades respiratorias infecciosas, ayudando a reducir el riesgo de infección. Básicamente, la máscara representa un dispositivo de protección para la boca y nariz que minimiza la transmisión directa de agentes infecciosos y polvo. De tal clasificación, se pueden mencionar las siguientes: CN209185788U, CN208987852U, CN209047494U, KR102031764B1, KR102058075B1, CN210226990U, CN110623342A, AU2020100449A4 y CN110811036 (A).

Por otro lado, la producción de máscaras debe tener algunas características en consideración, como el número de capas de tela, dado que puede intervenir en la capacidad de filtración [13]. En el caso de las máscaras antimicrobianas, aunque las diversas capas de filtros de aire

pueden bloquear partículas, polvo y microorganismos de manera eficiente, estos últimos se adhieren a la superficie del filtro y pueden reproducirse. Esto representa un riesgo al haber presencia y acumulación de estos patógenos, lo que compromete la seguridad del filtro. Por lo tanto, se han buscado alternativas para auto esterilización de los filtros. Entre estas se encuentran el grafeno, nanopartículas y óxidos metálicos, entre otros.

Davison *et al.* [14] realizaron pruebas en mascarillas N95® impregnadas con una mezcla de iones cobre y zinc, demostraron que dichas mascarillas inactivan 19 subtipos de virus de la influenza A y B, sarampión y coronavirus del SARS. Aunado a lo anterior, la eficiencia de tales nanopartículas respecto de la inactivación de los microorganismos resultó ser del 99.99 % para todos los casos.

En el caso de las máscaras con capas de tela, éstas generalmente tienen espacios vacíos en la capa intermedia [12], esto puede comprometer su efectividad, especialmente cuando se trata de partículas extremadamente finas.

Por otro lado, se ha observado que el virus SARS CoV-2 puede permanecer activo sobre superficies inanimadas hasta por nueve días [15], pero tales superficies pueden ser desinfectadas con peróxido de hidrogeno, radiación ultravioleta, calor húmedo, calor seco y ozono [16]. Debido a esta capacidad de desinfección, algunas patentes han utilizado tecnología germicida ultravioleta, por ejemplo: AU2020100228 (A4), TW202007419 (A), CN110856559 (A), CN210203464 (U) y KR20200030332 (A), las cuales pueden aumentar la durabilidad de las máscaras.

Algunas máscaras patentadas con nanotecnología mencionan el diseño de éstas con poros de diámetro en el rango de nanómetros, esto provee una alta eficiencia en la filtración de partículas. Este tipo de máscaras son fabricadas generalmente con polímeros como polipropileno, polietileno, poliestireno, polisulfona y nailon.

En la clasificación de máscaras con otro tipo de tecnologías se encuentran varias que hacen referencia a la comodidad del usuario (KR20200032827 (A)), la temperatura interna en la mascarilla (CN209251806 (U), CN110507019 (A), CN210299621 (U), CN210299626 (U)), censado de humedad y temperatura (CN208875444 (U), KR20190075275 (A), CN210124340 (U), CN109832692 (A)), implementación de altavoces (CN210299624 (U)),

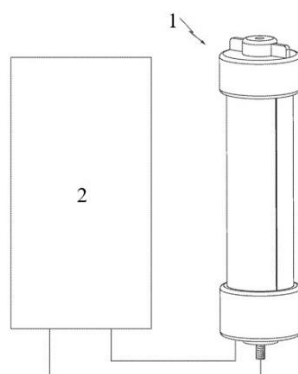
bluetooth (CN210169119 (U)), control automático de varios parámetros y funciones (WO2020057602 (A1), KR102030473 (B1), CN110041764 (A), CN210076640 (U)), entre otras sub categorías.

1.4 Filtrado de aire por ionización

Una de esas patentes es de principal interés debido a la inusual tecnología que utiliza para remover partículas en el aire. Esta es la patente CN110623342A, la cual describe una máscara a prueba de polvo basada en la generación de iones negativos por medio de energía sonora, los iones generados provocan la sedimentación de las partículas en un filtro colector.

Se ha demostrado que la ionización del aire es un método eficaz para eliminar partículas de aerosol de ambientes internos. Diversos estudios han confirmado que existe una reducción significativa en las concentraciones de partículas en el aire debido a la presencia de iones [17], [18], [19], [20], [21], [22] los cuales se mezclan con el aire y se adhieren (electrostáticamente) a las partículas presentes.

Además de las mascarillas faciales, existen diversos artículos para el hogar que filtran y eliminan materia infecciosa y contaminante del aire y superficies. Los ozonificadores y precipitadores electrostáticos son algunos de los artefactos que realizan dicha tarea. Empresas como SHYCOCAN y JONIX, fabrican este tipo de artefactos los cuales basan sus equipos en la aplicación de efecto corona, esto es observado en las patentes US20220054670A1 (Figura 1) y US008747754B.



**Figura 1. Vista general del dispositivo que describe la patente US20220054670A1 [23].
Dispositivo con dos terminales eléctricas separadas por un material dieléctrico de geometría
tubular (1), conectado a un circuito elevador de tensión (2)[23]**

Al igual que los ozonificadores, los precipitadores electrostáticos son dispositivos diseñados para eliminar partículas sólidas suspendidas en un flujo de gas, como humo, polvo o partículas finas, utilizando principios electrostáticos. Estos dispositivos son comúnmente utilizados en la industria y en plantas de energía para controlar la contaminación del aire y mejorar la calidad del 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 [24]. De forma más específica, estos dispositivos utilizan un fenómeno denominado descarga de corona, el cual es un tipo de plasma de baja ionización.

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 [25], [26]. El plasma es un gas ionizado que presenta átomos y moléculas cargadas tanto negativa como positivamente [27]; puede ser definido como un sistema de partículas en forma de un fluido conformado por una mezcla de electrones libres, iones, radicales, especies excitadas y partículas neutras [28].

Los plasmas se pueden producir por métodos eléctricos y éstos permiten su formación a presión atmosférica mediante la utilización de descargas eléctricas que consisten en aplicar alto voltaje entre 2 electrodos metálicos colocados dentro de un tubo que contiene gas, éstos se clasifican en: descargas de corriente continua, en radiofrecuencia, por microondas y por pulsos eléctricos [27], [29]. Una de las técnicas más utilizadas es la Descarga de Barrera Dieléctrica (dbd), en ésta por lo menos uno de los electrodos se cubre de un material dieléctrico, lo que permite descargas a menor voltaje comparado con otras técnicas [30].

1.5 Conclusiones del estado del arte

A causa de la aparición de nuevos y más resistentes patógenos, es importante encontrar nuevas medidas para la prevención y tratamiento de amenazas microbianas. Frente a los altos costos de producción de nuevos antibióticos, es importante enfocarse en encontrar medidas preventivas para evitar los contagios masivos por enfermedades infecciosas.

Y aunque algunas de las vacunas tengan la capacidad de proteger contra una gama de variantes, todas las personas son potenciales portadoras. Por lo tanto, una forma práctica y recomendada por la OMS para evitar el contagio y al mismo tiempo continuar con las actividades diarias, es usando equipo de protección personal (epp). Los epp han sido por mucho tiempo la opción más viable para evitar infectarse de patógenos, también han sufrido cambios e innovaciones importantes, a lo largo de la historia, con la finalidad de mejorar su efectividad.

Sin embargo, los epp disponibles actualmente, se reducen al uso de una mascarilla facial o cubrebocas. Éste, es un auxiliar para filtrar el aire inhalado y exhalado, con lo cual se reduce la exposición a aerosoles que transportan microorganismos patógenos.

Por otro lado, un problema que existe por el uso de cubrebocas convencionales es la cantidad de desechos que generan. El uso de cubrebocas ha aumentado de forma drástica durante la pandemia de la COVID-19. Se estima que se utilizan 129 billones es éstos al mes [31], lo que ocasiona un problema de desechos y al mismo tiempo un potencial foco de infección [32] ya que el virus SARS CoV-2 puede persistir en un cubrebocas hasta por 10 días [33].

Una opción que se popularizó para evitar la contaminación y tener que comprar cubrebocas cada determinado tiempo, es el uso de cubrebocas de tela. Si bien, el uso de varias capas de tela mejora la filtración, estos no cumplen con la seguridad mínima y de cualquier forma siguen siendo barreras físicas. Se está de acuerdo en que el objetivo principal de los cubrebocas es proteger al usuario de inhalar partículas que le puedan causar un problema en las vías respiratorias, a pesar de esto es una barrera que reduce el flujo de aire en el proceso de respiración.

Aunado a lo anterior, en un estudio realizado en 2022 por Martellucci *et al.* [34] se determinó que se genera una concentración de 4000 a 10000 PPM de CO₂ cuando se utilizan mascarillas de tipo quirúrgicas, siendo 5000 PPM el umbral de exposición permitido. Esto demuestra que es importante que haya ventilación en la mascarilla. Hasta el momento, son pocos los avances tecnológicos en mascarillas que ofrecen ventilación, un ejemplo son las mascarillas con válvula, sin embargo, no son recomendadas a razón de que las partículas fácilmente se filtran por dicha válvula.

En este trabajo se propone el diseño de un filtro de flujo continuo para uso unipersonal, cuya función es remover las partículas infecciosas haciendo uso de fuerzas eléctricas y mecánicas, de tal forma que no es necesario usar una barrera porosa y por lo tanto el flujo de aire no se verá reducido. Esto a su vez se verá reflejado en la comodidad del usuario.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Introducción

En este apartado se recapitulan algunos conceptos importantes para entender los principios de funcionamiento de un precipitador electrostático y como el fenómeno de efecto corona interactúa con las partículas presentes en un fluido para su posterior remoción.

2.2 Plasma

En la secuencia: sólido, líquido, gas y plasma, este último es definido como el cuarto estado de la materia, el cual es una sustancia ionizada capaz de conducir electricidad [35]. El proceso de transición del estado gaseoso al plasma consiste prácticamente en aumentar la energía cinética de las partículas que componen dicho gas hasta un nivel conocido como energía de ionización (ξ_i), ver Figura 2.

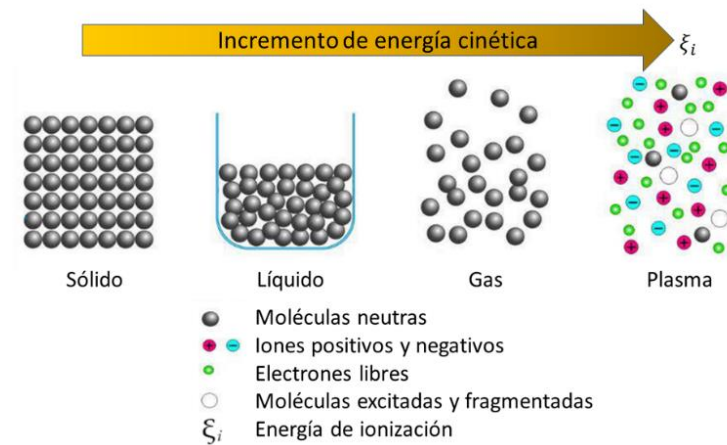


Figura 2. Estados de la materia en función del aumento de la energía cinética [36].

La ionización puede ser inducida por la aplicación de un campo eléctrico de gran escala. Cuando se alcanza la intensidad de campo necesaria en la superficie del conductor esta es capaz de arrancar electrones de los átomos y moléculas del aire circundante, esto crea iones positivos (cationes) y electrones libres en el aire. Los electrones liberados se aceleran por influencia del campo eléctrico y pueden colisionar con otros átomos y moléculas del aire produciendo más electrones y iones positivos [37]. Al liberarse más electrones, cada uno repite el mismo proceso, creando lo que se conoce como avalancha electrónica, así como se muestra en la Figura 3.

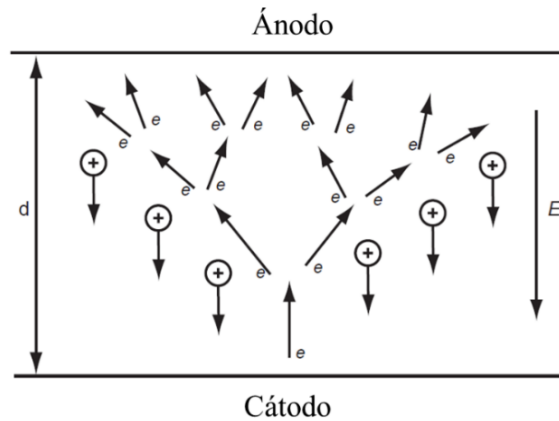


Figura 3. Descarga de Townsend (avalancha electrónica) [27].

2.2.1 Descarga en gases

Cuando un gas se encuentra parcial o totalmente ionizado es considerado como plasma, el cual tiene la propiedad de conducir una corriente eléctrica.

Existe una relación entre la diferencia de potencia entre los electrodos y la intensidad de la corriente, esta misma relación presenta tres etapas: descarga de oscura, descarga luminiscente y arco eléctrico, ver Figura 4.

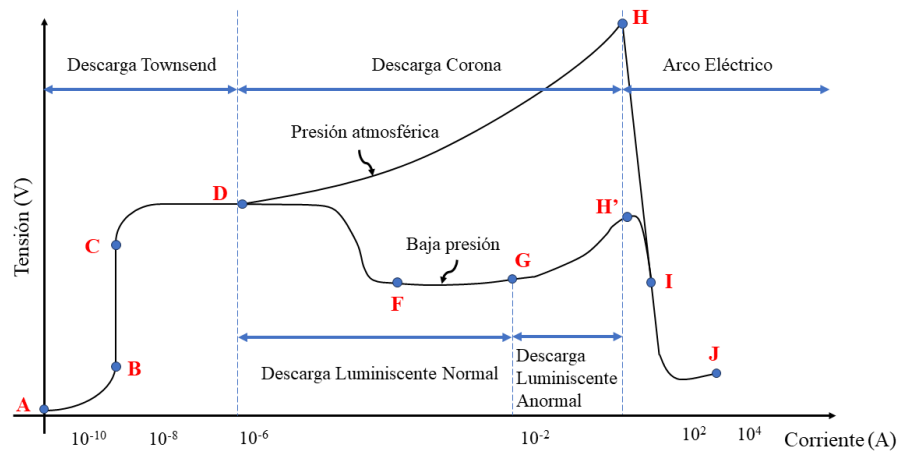


Figura 4. Grafica de fases para descargas eléctricas en gases de acuerdo con la relación tensión-corriente [38].

Descarga de Oscura

Esta etapa recibe el nombre de descarga oscura ya que el gas ionizado no emite luz perceptible.

En esta etapa ocurre el fenómeno de avalancha electrónica o descarga de Townsend en los intervalos C-D, donde el gas comienza a ionizarse.

Descarga de Luminiscente

El comportamiento de esta descarga depende de la presión de trabajo del gas que se utilice. Para presiones de trabajo por debajo de la presión atmosférica, el comportamiento de la ionización es descrito por la curva F-G. Para gases a presión atmosférica el comportamiento de éste será de forma exponencial de acuerdo con la curva D-H.

Arco eléctrico

El arco eléctrico ocurre cuando el gas se encuentra totalmente ionizado, por lo tanto, este se vuelve conductor eléctrico. La corriente eléctrica que circula a través de éste se encuentra entre 1 y 10 A.

2.3 Efecto corona

El efecto corona es un fenómeno fisicoquímico que se produce cuando el gas que rodea un conductor (con alta tensión) es ionizado, en algunas ocasiones cuando el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte es perceptible un halo de color azul [36].

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.

2.3.1 Potencial y campo eléctrico

El efecto corona es ocasionado por los fenómenos electrostáticos que genera la circulación del potencial eléctrico sobre el conductor. Como se muestra en la ecuación (1), la ley de Gauss establece que la divergencia del campo eléctrico (producto del gradiente de potencial eléctrico, ecuación (2)) es proporcional a la carga eléctrica que adquieren las partículas presentes en el medio [39].

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (2)$$

Donde, $\mathbf{E}$ [V/m] es el campo eléctrico, Q [C] es la carga total en el sistema, ε [F/m] es el coeficiente dieléctrico absoluto y ϕ [V] es el potencial eléctrico. Al sustituir el campo eléctrico en la ley de Gauss y realizar el producto punto del operador nabra, se obtiene la ecuación de Poisson (3).

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

Donde, ρ_c [C/m³] es la densidad de carga volumétrica.

2.3.2 Flujo electrodinámico

Cuando la descarga de corona toma lugar, las partículas circundantes al conductor adquieren carga eléctrica y según la magnitud y tipo de carga que adquieren, por efecto de la fuerza de Coulomb, pueden ser repelidas o atraídas por el cátodo o ánodo. El movimiento que realizan las cargas ocasionado por la repulsión o atracción genera un flujo eléctrico que es definido como densidad de corriente (4).

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \mu_i \rho_c \mathbf{E} + \rho_c \mathbf{u} \quad (5)$$

Donde, $\mathbf{J}$ [A/m²] es la densidad de corriente, μ_i [m²/Vs] es la movilidad iónica y $\mathbf{u}$ [m/s] es la velocidad del fluido o gas donde se genera la corona. Al sustituir las ecuaciones de densidad de corriente (5) y de Poisson (3) en la ecuación de conservación de carga (4), se obtiene la ecuación de transporte de carga (6).

$$\mu_i \left(\frac{\rho_c^2}{\varepsilon} - \nabla\phi \cdot \nabla\rho_c \right) + \nabla\rho_c \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

2.3.3 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 [40].

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 [41] 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 (7), dando una tasa de carga por difusión distintiva por encima de la carga de saturación.

$$\tau_c \frac{dZ}{dt} = \begin{cases} R_f + f_a & (|v_e| \leq |v_s|) \\ R_d f_a & (|v_e| > |v_s|) \end{cases} \quad (7)$$

Donde, τ_c es el tiempo de carga característico, R_f y R_d son las tasas de carga debidas al transporte de campo eléctrico y de difusión respectivamente, ambas 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.

2.3.4 Flujo electrohidrodinámico

El flujo electrohidrodinámico fue reportado por primera vez en 1709 por F. Hauksbee [30], [42] este término hace referencia a la interacción entre los iones y las moléculas de un fluido que están bajo la interacción de un campo electromagnético. Los iones (generados por la descarga de corona), al estar dentro de un campo eléctrico, experimentan la fuerza electrohidrodinámica, ecuación (8), por lo que son desplazados hacia el electrodo negativo.

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

En su camino, los iones frecuentemente chocan con moléculas de gas y otras partículas eléctricamente neutras a las que les transfieren impulso [43]. 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. Este fenómeno es descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes, la cual se compone de dos partes principales, la ecuación de conservación de la velocidad del fluido a lo largo de su trayectoria, ecuación (9), y la ecuación (10) debida al movimiento del fluido respecto a las fuerzas que actúan sobre este.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (9)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_e \quad (10)$$

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 el último término $\mathbf{F}_e$ [N/m³] es la fuerza electrohidrodinámica (8).

2.3.5 Trayectoria de las partículas

La importancia del flujo electrohidrodinámico para el desarrollo del presente trabajo de investigación es que mediante la aplicación de este fenómeno es posible filtrar las partículas no deseadas en un flujo de aire, ya que como se observa en la ecuación (10), se puede aplicar una fuerza externa que actúan sobre el fluido y sus partículas.

La forma para comprobar que dicho fenómeno es efectivo, es mediante el trasado de las trayectorias de las partículas. Estas se determinan resolviendo las ecuaciones de movimiento para las componentes del vector posición, siguiendo la segunda ley de Newton.

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{v} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \mathbf{F}_T \quad (12)$$

Donde, $\mathbf{P}$ [m] es la posición de la partícula, $\mathbf{v}$ [m/s] es la velocidad relativa de la partícula respecto a la del fluido, m_p [kg] es la masa de la partícula y $\mathbf{F}_T$ es la fuerza total que actúa sobre las partículas. Estas fuerzas son la fuerza de arrastre, y la fuerza de coulomb, dadas por

las ecuaciones (13) y (14), respectivamente.

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p S} m_p(\mathbf{v}) \quad (13)$$

$$\mathbf{F}_E = qZ\mathbf{E} \quad (14)$$

Donde, $\mathbf{F}_D$ [N] es la fuerza de arrastre de acuerdo con el modelo de Cunningham [44], τ_p [s] es el tiempo de respuesta de la velocidad de las partículas, S es el coeficiente de arrastre. $\mathbf{F}_E$ [N] es la fuerza eléctrica, q [C] es la carga eléctrica de cada partícula y Z es el número de acumulación de carga de cada partícula. La fuerza eléctrica expresada en términos de la velocidad de migración de las partículas inmersas en el fluido es representada por la ley de Stokes-Einstein, ecuación (15).

$$\mathbf{F}_E = \mathbf{w}_e 3\pi\mu d_p \quad (15)$$

Donde, $\mathbf{w}_e$ [m/s] es la velocidad de migración de las partículas, d_p [m] es el diámetro de cada partícula [45]. La fuerza de Coulomb actúa a favor de las líneas del campo eléctrico, mientras que la fuerza de arrastre se opone al movimiento de las partículas, por lo tanto, actúa en contra del flujo de aire y de la fuerza eléctrica. La Figura 5 muestra gráficamente las fuerzas y el sentido en que éstas actúan sobre las partículas que se encuentran en el fluido.

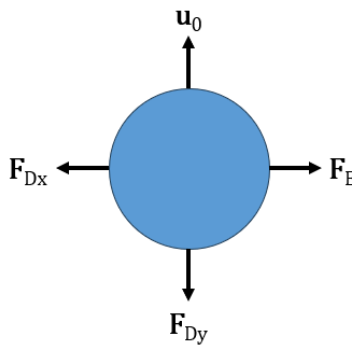


Figura 5. Fuerzas que actúan sobre las partículas presentes en el fluido.

La suma vectorial de las fuerzas indica la dirección en la que se mueve la partícula. A medida que esta cambia de posición, la magnitud de las fuerzas a las que está sometida también lo hacen, debido a los gradientes de potencial y de velocidad del fluido. Por lo tanto, se deduce

que la trayectoria de las partículas forma una semi parábola, donde la posición final de estas es en la superficie de la placa colectora, ver Figura 6.

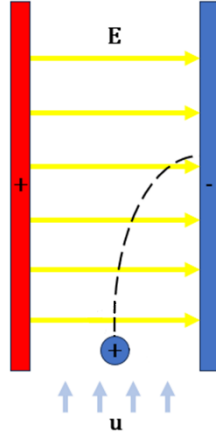


Figura 6. Trayectoria de las partículas bajo la influencia de los gradientes de potencial eléctrico (E) y flujo de aire (u).

2.3.6 Tensión crítica y gradiente de potencial de efecto corona

Para generar el efecto corona, es necesario aplicar un potencial eléctrico capaz de ionizar el aire circundante al electrodo. Tal valor es denominado como voltaje de ignición del efecto corona y es determinado por la ley de Peek [46], la cual establece que dicho efecto se hará presente cuando el campo eléctrico (producto de la tensión aplicada en el alambre conductor) supere la rigidez dieléctrica del aire que es de 3 MV/m [47].

Para una geometría coaxial, el voltaje de ignición se calcula mediante la ecuación (16):

$$V_{0P} = m_v g_v \delta r \cdot \text{Log}(R/r) \quad (16)$$

Donde 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), R [cm] es el radio del cilindro exterior, g_v [kV/cm] es el gradiente de potencial crítico de ignición de la corona para un diámetro de alambre específico el cual se calcula conforme a la ecuación (17):

$$g_v = 31\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (17)$$

Donde δ es el factor de corrección de la densidad de aire que es igual a 1 para condiciones de temperatura y presión normales y r [cm] es el radio del alambre.

2.4 Características del virus SARS CoV-2

Los coronavirus son virus envueltos en forma esférica, los cuales presentan ARN como genoma y su tamaño oscila entre los 80 a 120 nm de diámetro, ver Figura 7. Superficialmente se observan proyecciones de la glicoproteína *spike* (S), y al igual que la mayoría de los betacoronavirus posee envoltura viral y consta de dos proteínas que resaltan: la proteína M y la proteína E, siendo la primera la más abundante, mientras que la segunda se caracteriza por ser hidrofóbica.

Ambas proteínas se encuentran fusionadas con membranas lipídicas obtenidas de la célula huésped. El genoma está constituido por ARN con una longitud aproximada de entre 27 a 32 kb. Para evitar la desintegración del genoma, el ARN se encuentra unido a otra proteína estructural conocida como la nucleoproteína (Proteína N) [48].

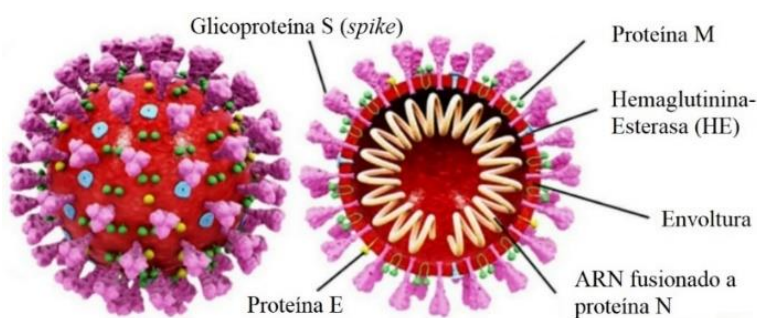


Figura 7. Estructura del virus SARS CoV-2 [48].

El principal medio de transmisión de los virus es por gotas de dimensiones de entre 0.6 a 1000 μm , que son expulsadas por las personas al toser, estornudar, hablar e incluso respirar, éstas no viajan más de dos metros al ser expedidas. Sin embargo, esto es suficiente para contagiar de forma directa a personas cercanas e indirectamente por el contacto con superficies contaminadas [49].

Por otro lado, las partículas virales de aproximadamente un micrómetro pueden deshidratarse y permanecer suspendidas hasta por 12 horas, quedando como núcleos de gotas, y pueden viajar largas distancias dependiendo de las corrientes de aire [50]. Por lo anterior, es

importante el uso del cubrebocas ya que fungen como barrera para evitar la propagación del virus.

Mediante las proteínas S, el coronavirus se adhiere y penetra en células sanas del tejido pulmonar, una vez dentro, la replicación viral de ARN ocurre y puede crear hasta 100 000 copias del virus [51], ver Figura 8[51].

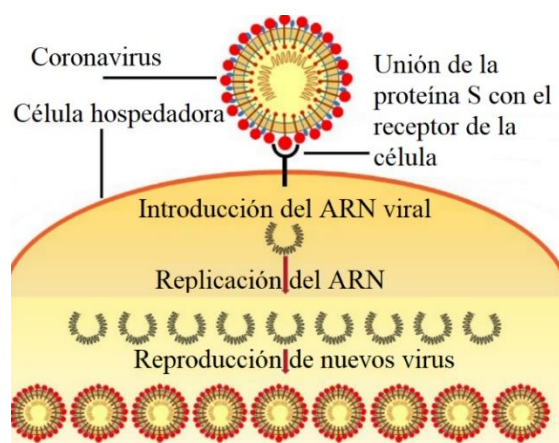


Figura 8. Proceso de infección y replicación del coronavirus [51].

2.4.1 Mecanismo de degradación de los virus por materiales desinfectantes

Una de las recomendaciones de la OMS para evitar el contagio del virus, es lavarse las manos con agua y jabón. Es sorprendente que aún y con todos los avances tecnológicos que existen, con el simple uso del jabón se elimine el coronavirus, la clave está en la proteína *spike*, ya que es el componente que le permite al virus SARS CoV-2 su adhesión y persistencia en las superficies [3]. El desconocimiento de las interacciones intermoleculares entre la proteína mencionada y las distintas superficies, ha dado lugar a medidas preventivas ineficientes. Por lo tanto, tal recomendación está basada en el hecho de que existe una interacción molecular virus-jabón-agua.

La molécula del jabón es anfipática (Figura 9 A), es decir, consta de dos partes, la cabeza tiene carga positiva, es hidrofílica e interactúa con el agua, mientras que la cadena no contiene carga y es afín a la envoltura lipídica del virus (Figura 9 B). Cuando se agrega agua, la parte polar (cabeza) se mezcla con las moléculas del agua, desintegrando la membrana protectora del ARN [52].

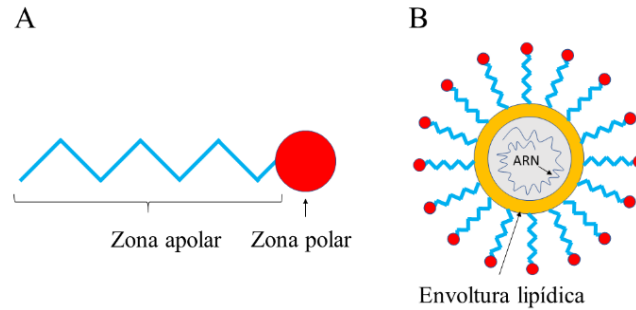


Figura 9. A) Molécula de jabón. B) Interacción de moléculas de jabón con coronavirus.

De forma similar, el efecto oligodinámico es la propiedad que tienen algunos metales pesados para eliminar bacterias, virus y hongos cuando éstos entran en contacto con la superficie del metal. Esta característica de los materiales se utilizaba desde tiempos remotos por antiguas civilizaciones para purificar el agua y tratar heridas [11]. Actualmente se utiliza la plata coloidal, nanopartículas (NPs) e iones de plata (Ag^+) para la desinfección de superficies en hospitales debido a su efectividad antimicrobiana [53].

En la Figura 10, se representa de forma gráfica la inactivación de una bacteria cuando entra en contacto con una superficie de plata. Los iones penetran en ella (1) y bloquean las enzimas responsables del metabolismo celular (2), al mismo tiempo más iones se conectan a las cadenas de ARN impidiendo el proceso de replicación (3).

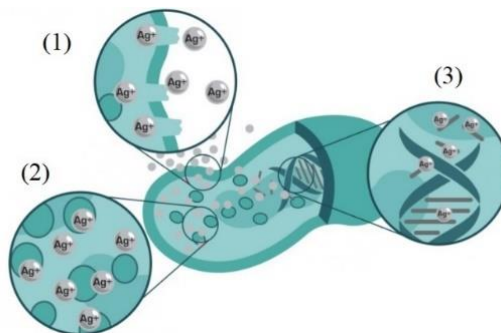


Figura 10. Inactivación de una bacteria al contacto con una superficie de plata [54].

Un proceso similar a este ocurre cuando los microorganismos entran en contacto con superficies de cobre (Cu) [55] el cual tiene una alta efectividad antimicrobiana, su uso se menciona en los papiros Smith (antiguos textos egipcios), para desinfectar heridas y

potabilizar el agua [56]. Al igual que la Ag, el Cu es usado ampliamente en superficies de hospitales para evitar la propagación de patógenos.

En la Figura 11, se muestra el efecto que tiene el coronavirus humano HUCoV-229E al exponerlo a dos materiales metálicos: acero inoxidable (A) y cobre (B). Se observa que el virus se mantiene intacto en la superficie de acero inoxidable, mientras que en la superficie de cobre las partículas del virus se comienzan a desintegrar después de 10 minutos de exposición. El recuadro (C) muestra que después de 30 minutos de exposición al cobre, el daño es mayor y se nota la disminución de la carga viral [57].

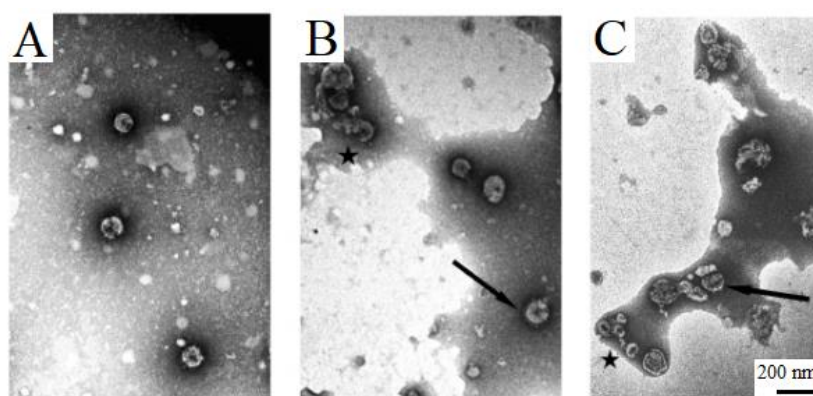


Figura 11. Efecto del HUCoV-229E al contacto con acero inoxidable (A), comparado con el contacto al cobre (B), degradación del virus $t > 30$ min de exposición al cobre (C) [57].

Un estudio experimental realizado en China en el año 2019 muestra que la viabilidad del virus SARS CoV-2 en la superficie del Cu es de cuatro horas, lo que representa el 6.7 % del tiempo que persiste el virus en un cubrebocas de tela [32].

Los mecanismos que por los cuales se inactiva el SARS CoV-2 son los siguientes [58]:

1. El Cu altera la permeabilidad de la membrana celular al acumularse y disolverse, lo que provoca la desestabilización de los lipopolisacáridos y las proteínas de la membrana. Esto resulta en la liberación de biomoléculas intracelulares y la interrupción del transporte de protones a través de la membrana celular.
2. La liberación de iones de cobre y la formación de especies reactivas de oxígeno (ERO) causan daño a las estructuras celulares.

3. Absorben iones metálicos producidos por las NPs, lo que conduce a una disminución en la producción intracelular de adenosín trifosfato (ATP).

Estos mecanismos se basan en la capacidad del cobre para aceptar o donar electrones, lo que resulta en la generación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) y ERO. Además, durante este proceso se produce peróxido de hidrógeno (H_2O_2), lo que sugiere que la reacción de tipo Fenton también forma parte del mecanismo responsable de las propiedades antimicrobianas del cobre [59].

2.4.2 Efectos de la ionización del aire en microorganismos

La Agencia de Protección Ambiental de E.U. (EPA, por sus siglas en inglés) ha identificado la calidad del aire interior (al igual que la exterior) como uno de los riesgos ambientales para la salud pública [60]. El aire que respiramos puede contener una variedad de contaminantes como virus, bacterias, polen, polvo, humo y compuestos orgánicos volátiles. Las partículas finas que existen en el aire al ser demasiado pequeñas o livianas resulta difícil removerlas con solo la influencia del movimiento del aire.

Un método eficiente para la remoción de las partículas y/o contaminantes es la ionización del aire. Los iones son partículas cargadas eléctricamente que se adhieren a otras partículas en el aire, lo que las hace más pesadas y, por lo tanto, más propensas a caer al suelo o ser capturadas por un filtro electrostático.

Cuando el aire es ionizado se generan iones y radicales libres y moléculas o átomos simples cargados positivamente y los cationes son generalmente N^{2+} , O^{2+} , N^+ y O^+ , moléculas con deficiencia de electrones (ver Figura 12).

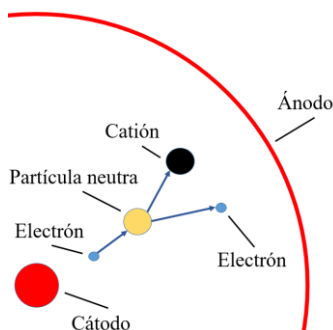


Figura 12. Partículas obtenidas a partir de la ionización.

A su vez también se forman partículas con carga negativa o moléculas con exceso de electrones llamados aniones (ver Figura 13), estos generalmente son O^{2-} .

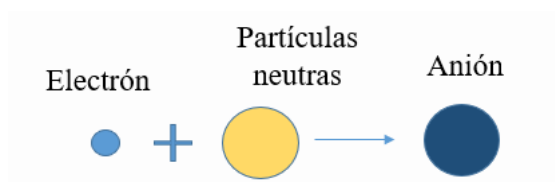


Figura 13. La unión de un electrón y una partícula neutra da como resultado un anión.

En el proceso de ionización se genera de forma indirecta OH^- como parte de las reacciones químicas que ocurren en el entorno de una descarga de efecto corona, el hidroxilo es una especie química altamente reactiva y tiene un papel importante en la inactivación de virus en el ambiente. Este se puede generar por tres mecanismos a partir de las descargas de efecto corona [61]:

1. Producción de radicales libres: En una descarga de efecto corona, se pueden generar radicales libres altamente reactivos debido a la interacción de los electrones libres y las especies químicas presentes en la atmósfera. Estos radicales pueden incluir radicales hidroxilos ($\bullet OH$) y otras especies reactivas de oxígeno.
2. Reacciones secundarias: Los radicales libres generados en la descarga de efecto corona pueden participar en reacciones secundarias con moléculas de agua (H_2O) o con compuestos que contienen oxígeno. Estas reacciones pueden dar como resultado la formación de hidroxilo (OH^-) a partir de la combinación de radicales hidroxilos ($\bullet OH$) con protones (H^+), generando agua y, en consecuencia, hidroxilo.

3. Oxidación del agua: En algunos casos, la descarga de efecto corona puede llevar a la oxidación del agua en la atmósfera, generando iones hidroxilo ($\text{OH}^\cdot$) y oxígeno molecular (O_2).

Tanto los iones como los radicales libres pueden reaccionar con las proteínas virales, causando cambios en su estructura y función. Las proteínas son componentes esenciales de los virus y son responsables de muchas de sus actividades biológicas. Cuando las proteínas virales se ven comprometidas debido a la reacción con los radicales libres como el hidroxilo u ozono (O_3), pueden perder su capacidad para unirse a las células huésped o para llevar a cabo otras funciones esenciales para la replicación viral [62].

Además de las reacciones que pueden existir entre el virus y las partículas generadas por la descarga de corona, el flujo electrohidrodinámico permite remover cualquier tipo de partícula en el aire ya sea por la fuerza de Coulomb que es ejercida en las partículas ionizadas o por la fuerza de arrastre del flujo de aire provocado por el mismo efecto corona.

Capítulo 3

Diseño de dispositivo

3.1 Introducción

El modelo del filtro por efecto corona que se propone, tiene como base las características físicas del sistema de respiración humano, permitiendo al usuario respirar con total normalidad y al mismo tiempo tener una mejor ventilación.

El objetivo principal del filtro es la remoción de partículas infecciosas por medios electrostáticos, pues resulta una opción viable para evitar el uso de filtros de barrera que reducen el flujo de aire inhalado y aumenta la concentración de CO₂ entre la máscara y la cara [34].

En este capítulo se presentan los factores que influyen en el diseño del filtro, así como en su funcionamiento.

3.2 Geometría del filtro

Es importante calcular el flujo de aire que respira una persona para determinar el tamaño del filtro. Además, la velocidad del aire es un valor que es necesario conocer debido a la influencia que tiene el flujo del aire sobre las partículas que se inhalan.

De acuerdo con el departamento de fisiología de la facultad de medicina de la UNAM, la cantidad de aire inspirado en reposo es de 6 L/min y puede aumentar hasta 36 L/min dependiendo de la actividad realizada [63].

Otro parámetro importante, considerando la fisiología humana, es el área transversal de las fosas nasales. Suponiendo que éstas tienen forma circular, entonces su diámetro promedio es de 1 cm por cada una [64]. Por lo tanto, la velocidad del flujo de aire que atraviesa por ellas puede ser obtenida mediante la ecuación de caudal (18).

$$Q = VA_T \quad (18)$$

Donde, Q [L/s] es el caudal igual a 0.1 L/s o 1×10^{-4} m³/s, V [m/s] es la velocidad del fluido y A_T [m²] es el área total que atraviesa el flujo de aire, que es dos veces el área de cada fosa nasal ($2A$) es igual a 15.7×10^{-5} m². Entonces, bajo esta consideración, de la ecuación de

caudal se realizan las operaciones pertinentes para obtener la velocidad del aire inhalado según la ecuación (19).

$$V = \frac{Q}{2A} \quad (19)$$

Este parámetro es necesario para determinar el comportamiento del fluido y de las partículas que entran al filtro. Por lo tanto, la velocidad promedio del aire inhalado y exhalado es de 0.63 m/s y el área transversal total de las fosas nasales es de 1.57 cm². Con estos datos y de acuerdo con el principio de continuidad dado por la ecuación (20), el cual refiere que el flujo volumétrico de entrada es igual al de salida [65], se sabe que el área transversal de entrada y salida del filtro debe ser al menos igual al área transversal de las fosas nasales, esto con el fin de conservar la misma velocidad del aire en el proceso de respiración.

$$Q_1 = Q_2 \quad (20)$$

El propósito de mantener la velocidad del fluido dentro del filtro es evitar generar complicaciones en el proceso de respiración. Al sistema respiratorio le toma un segundo para inhalar/exhalar 0.1 de litro de aire, por lo que, si el área por la cual atraviesa el flujo se redujera, entonces el tiempo para cada fase de la respiración debería prolongarse, o se necesitaría aplicar un mayor esfuerzo para respirar, lo cual podría provocar sensación de asfixia, sofocación y agotamiento.

De acuerdo con el cálculo realizado para determinar el valor de flujo de aire inhalado/exhalado, se puede establecer que el área transversal del filtro debe ser al menos de 1.6 cm². Conforme a estas especificaciones, la configuración que se propone es de electrodos concéntricos (ver Figura 14), en donde el electrodo colector tiene un radio de 0.75 cm y el electrodo emisor un radio de 0.05 cm.

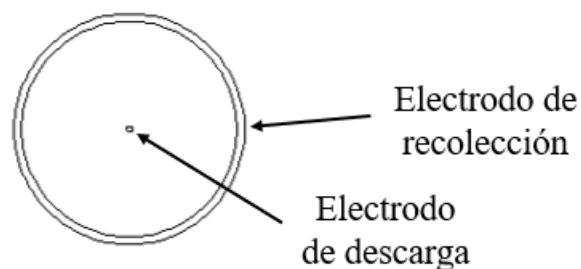


Figura 14. Sección transversal del filtro de efecto corona.

Este tipo de diseño es más adecuado para aplicaciones donde se necesita una mayor eficiencia en la eliminación de partículas finas y donde el espacio es limitado. Los reactores coaxiales generan descargas más homogéneas al eliminar el efecto de filos y puntas. En comparación con los precipitadores de placas paralelas (ver Figura 15), estos son efectivos en la eliminación de partículas gruesas y medianas, y se utilizan en aplicaciones industriales, como la eliminación de partículas de humo y polvo en chimeneas y sistemas de ventilación, por lo que requieren de mayor energía y generan campos eléctricos no homogéneos [66], [67].

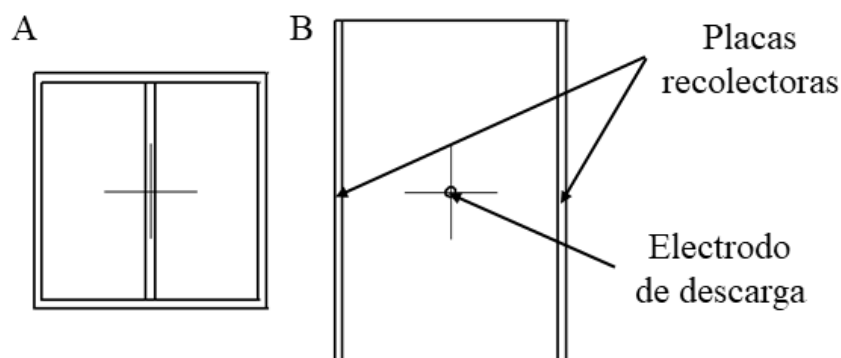


Figura 15. Filtro de efecto corona de placas paralelas: A) vista frontal y B) vista superior.

3.3 Fuente de alto voltaje

Las fuentes de alto voltaje son utilizadas frecuentemente para generar plasma de forma artificial [68], las cuales están conformadas por diversos componentes electrónicos como transformadores, circuitos integrados, transistores y bancos de capacitores.

La amplitud mínima de voltaje para que sucedan las descargas se denomina Voltaje de Rompimiento, si su valor es inferior al requerido la ionización será prácticamente nula, una vez superado ligeramente ese nivel comienza a existir un flujo de corriente entre los

electrodos [69]. De acuerdo con la ley de Peek, la fuente a utilizar debe suministrar a través del electrodo de ignición ~ 10 kV y sobre la superficie de este se genera un campo eléctrico con una intensidad de 7.37 MV/m.

Para alcanzar el potencial eléctrico mencionado se emplea una fuente pulsada C.D.-A.C. tipo *flyback*, en la Figura 16 se muestra el diagrama de la fuente utilizada. Este tipo de fuentes generan alto voltaje en altas frecuencias y se componen de dos partes, la primera consiste en el circuito que genera los pulsos de alta frecuencia, mientras que la segunda parte es el circuito de potencia, donde la energía de entrada se transforma para obtener el alto voltaje

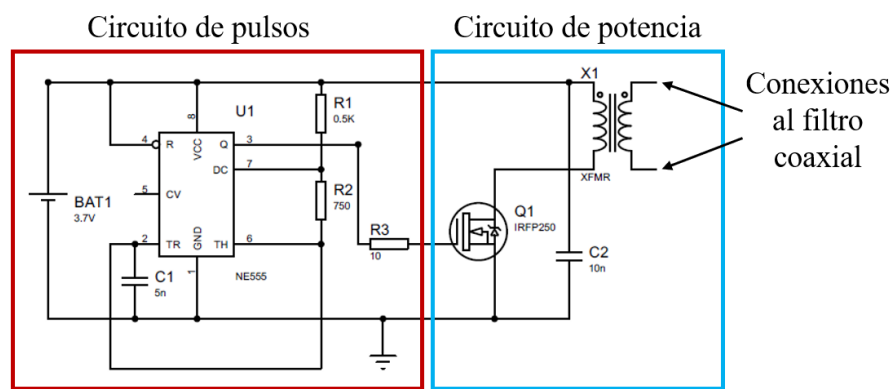


Figura 16. Fuente conmutada tipo *flyback*.

La fuente es alimentada con corriente continua (C.C.), sin embargo, para generar el cambio de energía es necesario que el transformador trabaje con corriente alterna (C.A.), por ello, este tipo de fuentes utiliza generalmente un transistor tipo MOSFET, para controlar el momento cuando se energiza el primario del transformador.

Cuando el interruptor está cerrado (encendido), la corriente circula a través del primario de tal forma que genera un campo magnético en el núcleo del transformador. Cuando el interruptor se abre (apagado), el campo magnético colapsa induciendo una corriente eléctrica en el bobinado secundario. Para mantener la tensión de salida constante, se utiliza un circuito que controla el tiempo de conmutación del MOSFET [70]. En este caso, el circuito oscilador genera pulsos a ~ 144 kHz, con la misma amplitud que el potencial de la batería utilizada (3.7 V), ver Figura 17.

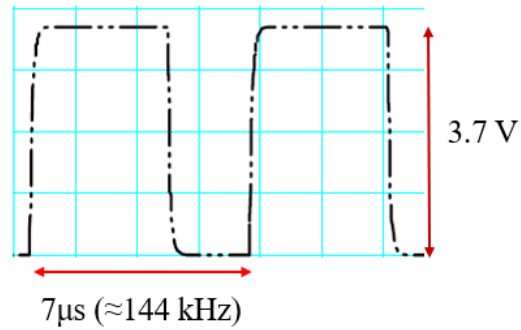


Figura 17. Forma de onda para circuito de alto voltaje.

Para aumentar el voltaje que suministra la batería se utiliza un transformador de alta frecuencia, que, a diferencia de un transformador de potencia, este tipo de transformadores trabajan con pulsos para elevar la tensión de salida.

Al aplicar corriente alterna (C.A.) al devanado primario se genera un campo magnético y, por inducción magnética, se genera una corriente eléctrica en el devanado secundario, de la misma frecuencia que la señal original, pero puede ser de mayor o menor amplitud dependiendo de la relación de transformación, ecuación (21). La relación entre la tensión de entrada y salida es directamente proporcional al número de vueltas en cada devanado [71].

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \quad (21)$$

Donde, V_P es el voltaje aplicado en el devanado primario, V_S es el voltaje que se obtiene en el devanado secundario, N_P es el número de vueltas del embobinado primario y N_S es el número de vueltas del embobinado secundario.

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó un transformador modelo TW-226 (ver Figura 18), de acuerdo con las especificaciones del fabricante este genera una tensión de salida de entre 9.5 y 10 kV al alimentarlo con 3.2 V, por lo tanto, su relación de transformación es de ~1:3000.

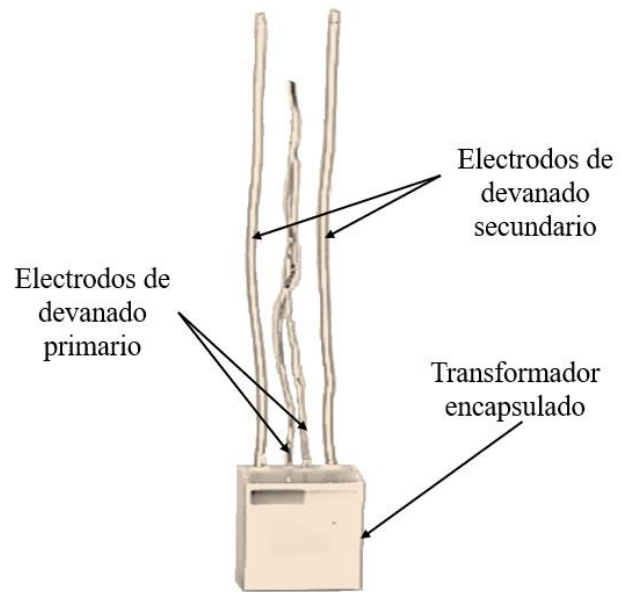


Figura 18. Transformador de alto voltaje TW-226.

Capítulo 4

Simulación numérica y modelado

4.1 Introducción

El fenómeno de descarga de corona no se limita a solo un problema electrostático, sino que comprende otros fenómenos como son la electrodinámica, dinámica de fluidos y procesos electroquímicos. Por lo tanto, resulta complicado resolverlo de forma analítica ya que diversos parámetros como distribución de campo eléctrico, potencial eléctrico, perfiles de flujo y trayectorias de partículas, no son fáciles de medir directamente, por tal motivo lo más conveniente es abordarlo a partir de un modelo de simulación del proceso. Para tal propósito se utilizó la paquetería de cómputo COMSOL® como auxiliar para comprobar la efectividad del filtro de efecto corona a través del análisis de las trayectorias de las partículas.

4.2 Condiciones de frontera

El estudio numérico se basa en un precipitador electrostático de geometría coaxial, el cual está simplificado a un modelo de geometría 2D axisimétrico con dimensiones de 15 mm de diámetro exterior, 20 mm de longitud y 1 mm de diámetro del alambre interno. La Figura 19 muestra la configuración completa del modelo computacional, así como las condiciones de frontera.

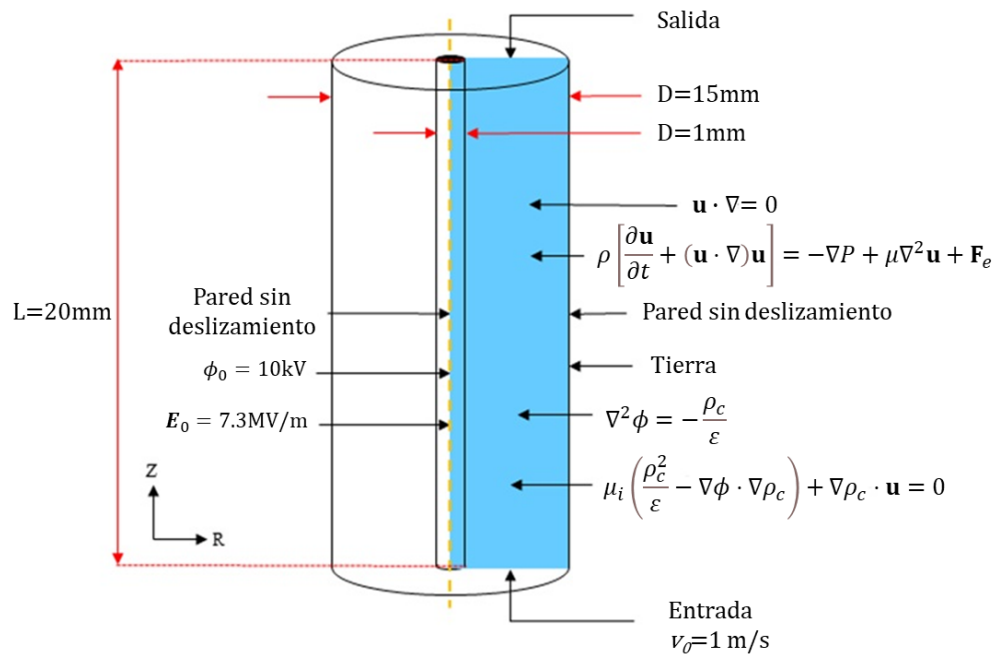


Figura 19. Modelo discreto del filtro de efecto corona y sus condiciones de frontera.

El alto voltaje es aplicado al electrodo central mientras que el tubo exterior funge como tierra. Las partículas entran por la parte inferior y son transportadas por el fluido. Éstas 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.

La región donde ocurren los fenómenos mencionados está marcada en color azul y es denominada región de deriva, ya que en esta zona las partículas que ingresan son susceptibles de los eventos físicos que engloban el efecto corona.

Las partículas de las que se quiere determinar su trayectoria en el software de análisis multifísico representan gotículas que contienen el virus del SARS-CoV-2, tanto este como muchos otros virus y bacterias, son transportados a través de gotículas de saliva, la cual está compuesta en un 99 % de agua y contiene solo un 0.2 % de materia orgánica [72], por lo que las gotículas que contienen el virus tienen propiedades físicas iguales a las del agua y su diámetro varía entre 0.3 y 1000 μm , ver Figura 20.

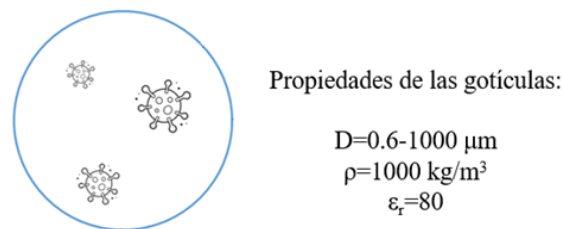


Figura 20. Características físicas y condiciones de frontera de las gotículas infecciosas.

4.2.1 Parámetros para la simulación

En el software COMSOL® están precargadas todas las funciones que definen a los fenómenos físicos mencionados anteriormente, así como varios materiales y sus propiedades físicas, a pesar de esto, el software permite al usuario definir ciertos parámetros según lo requiera el análisis. En la Tabla 1 se muestran los parámetros y constantes físicas utilizados para el análisis multifísico.

Aunque en la tabla están enlistadas la velocidad de flujo de aire, campo eléctrico, densidad de carga y densidad de corriente, a estas variables no se les puede asignar un valor fijo. Es

importante tener presente que estas variables son las que determinan el comportamiento y funcionamiento del filtro de efecto corona.

Descripción de variable	Símbolo/Valor/Unidades	Descripción de variable	Símbolo/Valor
Permitividad eléctrica del vacío	$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} [\text{F/m}]$	Rango de tamaño de las partículas	$D=0.01-1000 [\mu\text{m}]$
Permitividad relativa del aire	$\varepsilon_r = 1.00054$	Velocidad del flujo de aire	u
Densidad del aire	$\rho = 1.23 [\text{kg/m}^3]$	Campo eléctrico	E
Viscosidad dinámica del aire	$\mu = 1.8 \times 10^{-4} [\text{N}\cdot\text{s/m}^2]$	Densidad de carga	ρ_c
Movilidad iónica	$\mu_i = 2 \times 10^{-4} [\text{m}^2/\text{Vs}]$	Densidad de corriente	J
Presión atmosférica	$P = 1 [\text{atm}]$	Potencial eléctrico (Voltaje de ignición)	$\phi_0 = 10 [\text{kV}]$
Temperatura ambiente	$T = 298 [\text{K}]$	Gradiente de potencial crítico	$E_0 = 7.3 [\text{MV/m}]$
Densidad de la partícula	$\rho = 1000 [\text{kg/m}^3]$	Velocidad del flujo de aire a la entrada	$u_0 = 0.63 [\text{m/s}]$
Permitividad la partícula	$\varepsilon_r = 78.5$		

Tabla 1. Parámetros para el análisis del efecto corona en el diseño del filtro.

4.2.2 Mallado

En la Figura 21 se muestra la forma de la malla y las características generales del modelo computacional.

Como puede apreciarse el mallado consta de elementos mapeados y un mayor refinamiento cuando más se aproximan a los electrodos, esto garantiza una representación fiable de los altos gradientes del campo eléctrico en esas áreas [73]. Si bien tener una malla más fina es sinónimo de tener resultados más precisos, también aumenta el tiempo de simulación debido a que el software debe realizar los cálculos de más elementos.

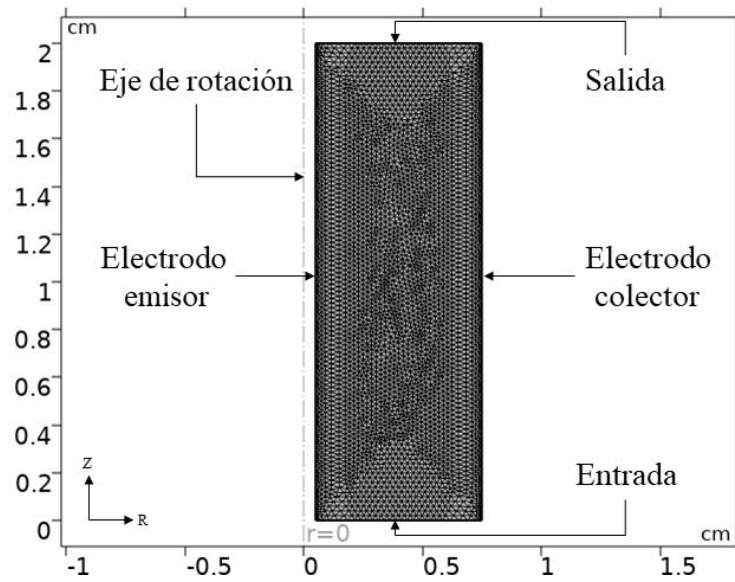


Figura 21. Mallado de la sección axisimétrica del filtro.

En este trabajo se optó por utilizar un mallado automático generado por el programa dado que sus características son: tamaño de malla fino, calibrado para dinámica de fluidos y una capa límite con tamaño de malla más fino, obteniendo 8138 elementos de dominio, de los cuales 7730 son triangulares y 408 son cuadrados y 270 elementos de contorno.

[74]

Capítulo 5

Resultados y discusión

5.1 Estudio de Dinámica de Fluidos Computacional

Cuando la alta tensión es aplicada, el aire alrededor electrodo emisor comienza a ionizarse y las partículas más cercanas a éste adquieren mayor carga, entre más retiradas estén del electrodo emisor menor será su carga eléctrica. La Figura 22 muestra la distribución de densidad de carga en la región de deriva.

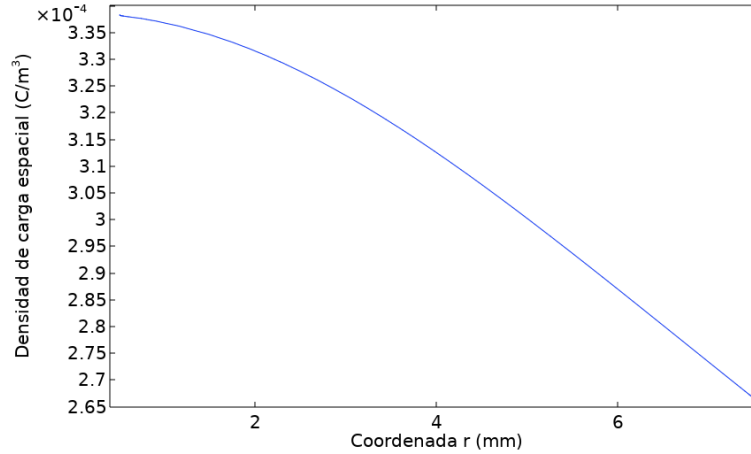


Figura 22. Densidad de carga y su distribución en la región de deriva.

Como se puede apreciar en la gráfica, el valor máximo es de $3.4 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$ sobre la superficie del electrodo emisor y decrece de forma exponencial hasta alcanzar un valor mínimo de $2.67 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$ en la superficie del electrodo colector.

Teniendo en cuenta la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, puede demostrarse la relación que existe entre la carga total $Q_T [\text{C}]$ y el volumen que pertenece a la región de deriva $V_D [\text{m}^3]$. Sin embargo, la densidad de carga volumétrica para un punto en el espacio depende de la posición de esa carga respecto a la coordenada $r [\text{m}]$ ya que solo hay variación alrededor del electrodo emisor y no a lo largo (h). Por lo tanto, el volumen de un cilindro que encierra una carga está dado por la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

$$\rho_c = \frac{Q_T}{V_D} \quad (22)$$

$$V_D = \pi r^2 h \quad (23)$$

En la **Figura 23** se muestra la curva típica del campo eléctrico conforme a la ley de Gauss, de acuerdo con la geometría del filtro, la expresión que define dicha curva es la siguiente.

$$\mathbf{E} = \frac{\rho_c R^2}{2r\epsilon} \quad (24)$$

Donde, el campo eléctrico $\mathbf{E}$ [V/m] está en función de la densidad de carga ρ_c [C/m³] respecto de su posición en la coordenada r [m]. Donde R [m] representa el radio total donde se distribuye la carga. De acuerdo con la ley de Peek, el valor inicial del campo eléctrico en la superficie del electrodo emisor es de 7.3 MV/m y este decrece a medida que se aleja de la fuente.

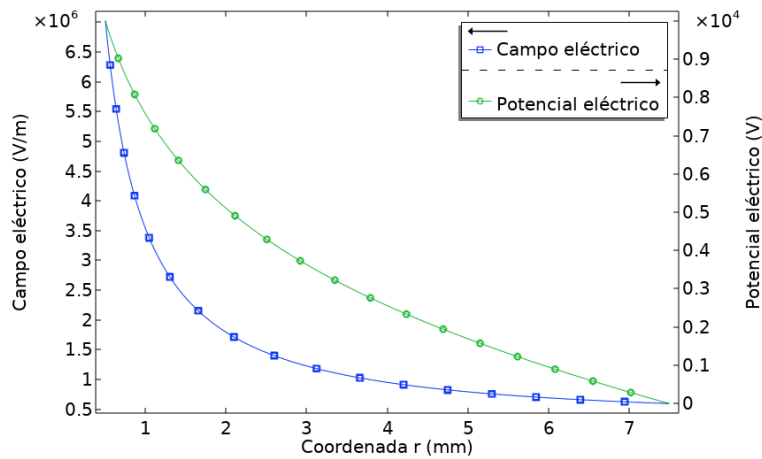


Figura 23. Distribución del Potencial y campo eléctrico en la región de deriva del filtro.

En el caso del potencial eléctrico, se tiene un valor de ~10 kV dentro del conductor, en cambio, en la región de deriva su comportamiento está descrito por la ecuación de Poisson, la cual define que todas las cargas distribuidas en el espacio son fuentes de potencial eléctrico, y como se mostró anteriormente, la magnitud de la densidad de carga volumétrica decrece a medida que se alejan del electrodo emisor.

Por otro lado, la velocidad a la que ingresa el aire al filtro también es un factor que determina la eficiencia del este. La Figura 24 muestra las líneas del flujo de aire bajo la influencia de la fuerza electrohidrodinámica a velocidades de aire entrante de: (A) 0.6 m/s, (B) 1 m/s y (C) 1.5 m/s.

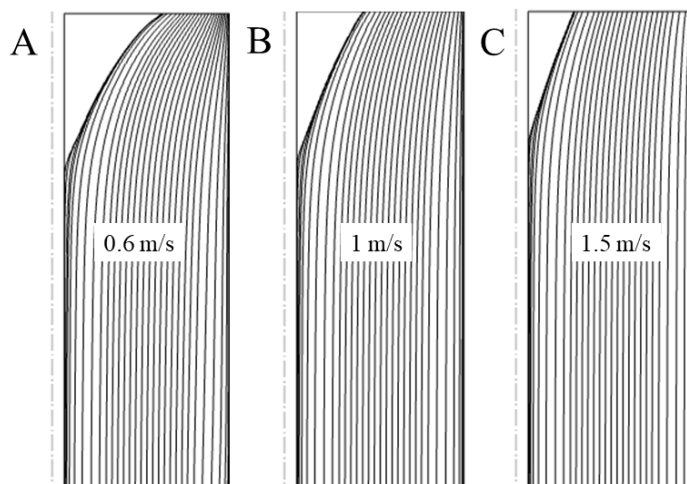


Figura 24. Comportamiento de las líneas de flujo de aire cuando varía la velocidad de entrada de aire y la tensión en el electrodo emisor.

La figura anterior 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.

Este aumento en la velocidad del flujo de aire se ve reflejado en un mayor recorrido vertical de las partículas, para demostrarlo se obtuvo el recorrido máximo que realizan las partículas. A las partículas usadas en este estudio computacional se les asigno tamaños en el rango de partículas PM 2.5, la importancia del tamaño radica en la capacidad que estas tienen para infiltrarse en el sistema respiratorio hacia los pulmones [74]. 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 la membrana mucosa [75].

Siendo así, se toman como muestras representativas cuatro tamaños partículas principalmente ($d_1=0.3 \mu\text{m}$, $d_2=0.5 \mu\text{m}$, $d_3=1 \mu\text{m}$ y $d_4=2.5 \mu\text{m}$), con propiedades físicas características de las gotículas ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ y $\epsilon_r = 80$).

Entonces, la Figura 25 muestra las distancias máximas alcanzadas por cada tamaño de partículas y las líneas que se muestran indican un 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 la mitad de la longitud del filtro.

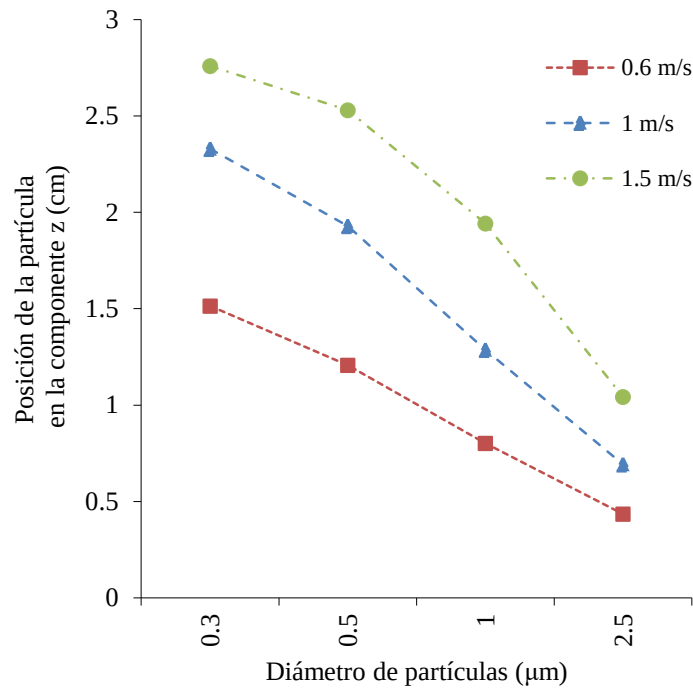


Figura 25. Recorrido vertical promedio máximo de cada tamaño de partículas.

Por otro lado, la gráfica indica que al aumentar la velocidad del fluido las partículas aumentan su recorrido. Se observa que las partículas de menor tamaño arrastradas por el fluido que tiene una velocidad de 0.6 m/s, recorren una distancia de 1.5 cm. Por otro lado, las partículas arrastradas por el fluido que tiene una velocidad de 1.5 m/s recorren mayor distancia, siendo 2.7 cm el recorrido de las partículas de menor tamaño.

El dato anterior indica que las partículas mencionadas han alcanzado a sobre pasar la longitud total del filtro. Incluso las partículas con tamaños de 0.5 μm y 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 η mediante la siguiente expresión:

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 Figura 26 muestra en forma de grafica los resultados obtenidos del estudio computacional, en esta se observa la relación entre la eficiencia de recolección de las partículas y el tamaño de estas, cada línea representa la eficiencia de filtrado a distintas velocidades del fluido, en esta se observa 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 filtro reduce progresivamente, así como el rango de tamaños en las partículas filtradas.

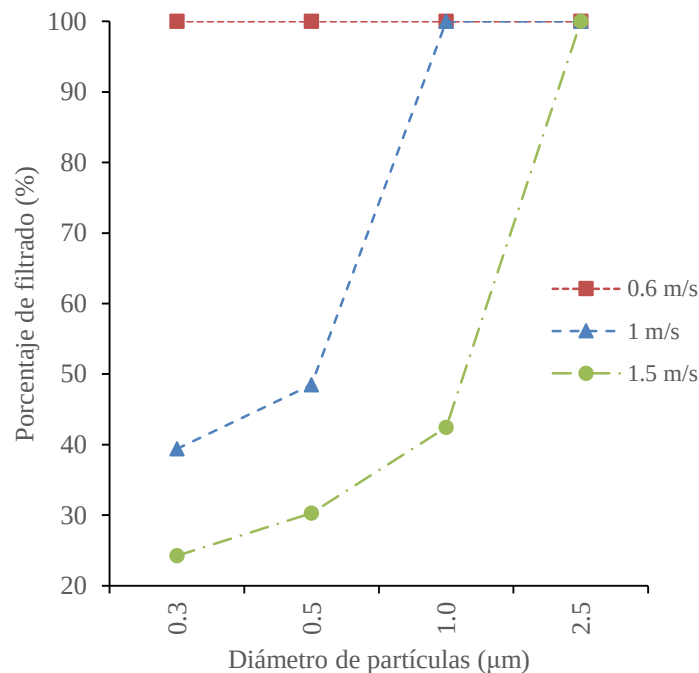


Figura 26. Eficiencia del filtro de efecto corona respecto al tamaño de las partículas y la velocidad de entrada del aire.

También se observa que 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 en estas, la Figura 27 muestra la magnitud y el tipo de fuerzas que actúan sobre las partículas en relación con la velocidad del fluido.

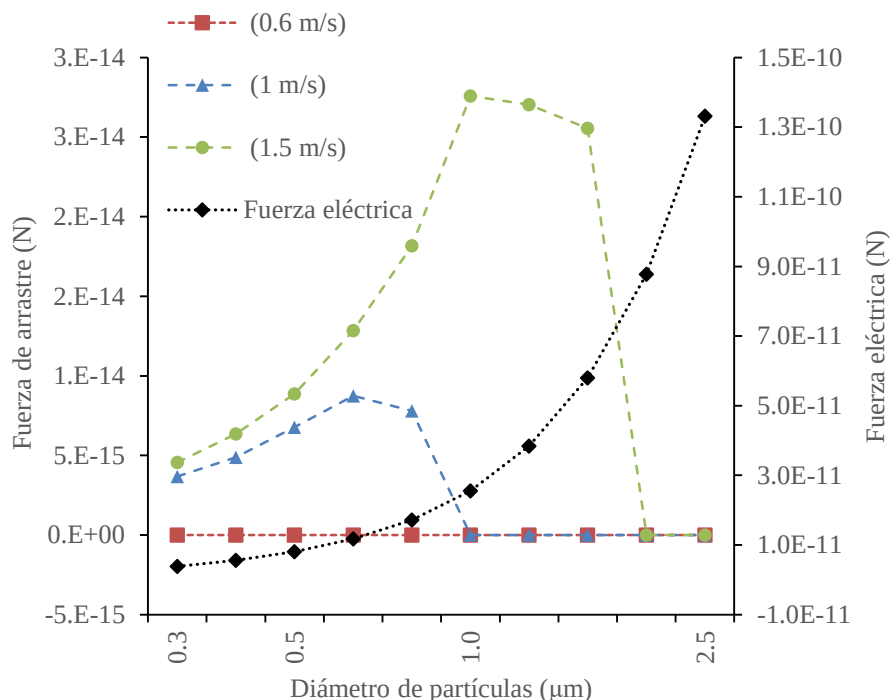


Figura 27. Magnitud de las fuerzas ejercidas sobre las partículas.

En la figura muestra que 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 μm, es de 8.7×10^{-15} N. En el caso donde la velocidad del aire es de 1.5 m/s, en partículas con tamaños de 1 μm, la fuerza máxima ejercida es de 2.8×10^{-14} 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 de mayor tamaño generan mayor resistencia al movimiento en dirección del flujo de aire, por lo tanto, su trayectoria se ve disminuida.

Por otro lado, la fuerza eléctrica también actúa de forma exponencial conforme aumenta el tamaño en las partículas, con un valor mínimo de 1.5×10^{-13} N en partículas con tamaños de $0.3 \mu\text{m}$ y un máximo de 1.5×10^{-10} N en partículas 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 Figura 28, entre mayor sea el tamaño de la partícula más carga acumula.

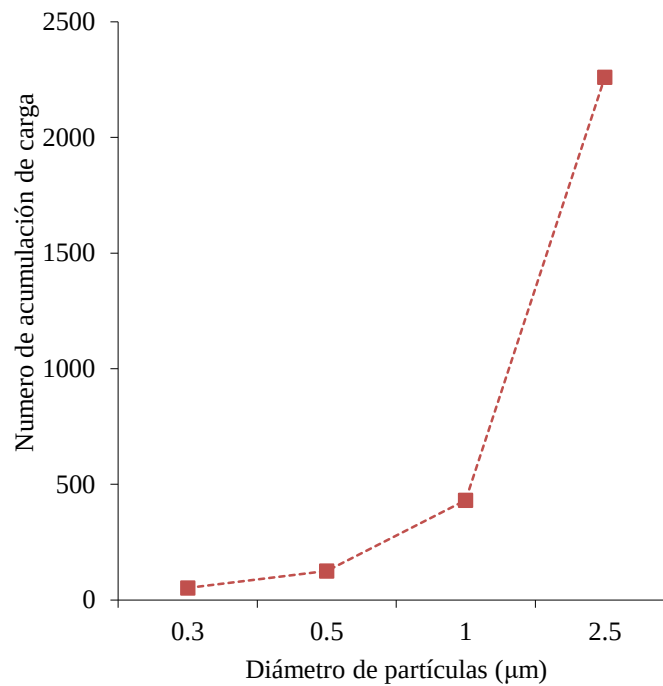


Figura 28. Promedio de carga acumulada por partícula en función de su tamaño.

En resumen, 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.

5.2 Banco 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.* [76], este 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. La Figura 29 muestra el diagrama del banco experimental.

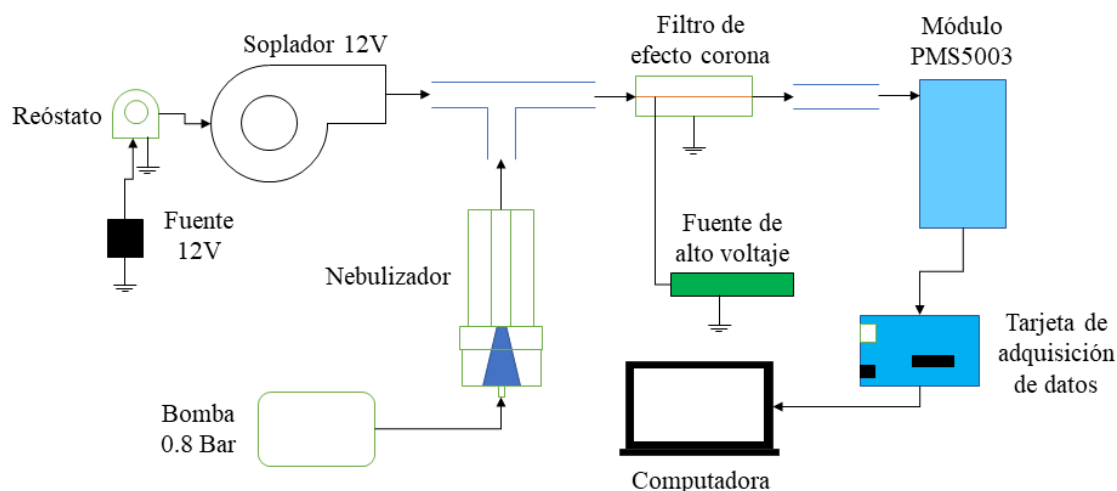


Figura 29. Diseño esquemático del banco experimental.

5.2.1 Calibración del detector de partículas y medición de partículas PM 2.5

Como se muestra en la imagen, se utilizó un módulo PMS5003 para medir la concentración de partículas en el aire, este módulo se calibró tomando como referencia las mediciones de partículas PM 2.5 realizadas por el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) del día 5 de mayo del 2023. El proceso de calibración comenzó a las 8:00 horas y finalizó a las 22:00 horas (Tiempo Universal Coordinado en la Zona Centro, UTC-6).

La Figura 30 muestra la comparación entre los datos obtenidos por el módulo PMS5003 y los extraídos de la página oficial del SINAICA. El promedio de ambos conjuntos de datos es de $34.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los datos obtenidos por el módulo PMS5003 y $33.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los datos reportados por SINAICA. Es importante resaltar que el error relativo en la medición realizada con el módulo es menor al 1% respecto de lo reportado por el SINAICA. Por lo tanto, se deduce que el módulo PMS5003 es lo suficientemente preciso en mediciones de partículas menores a $2.5 \mu\text{m}$ [77].

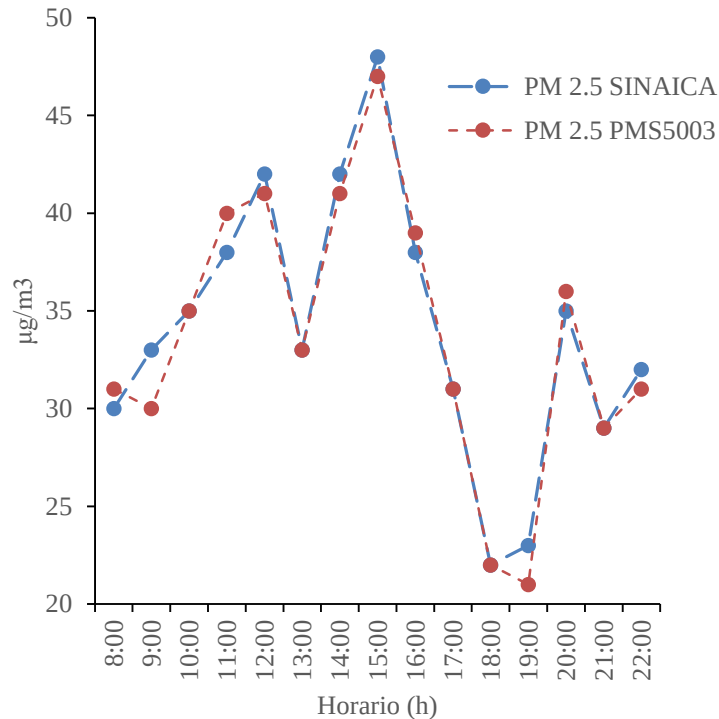


Figura 30. Comparación de las mediciones realizadas por el módulo PMS5003 contra datos obtenidos por el SINAICA.

Para adquirir los datos del módulo de detector de partículas se utilizó una tarjeta Arduino® UNO vinculada a Excel® mediante el complemento *DataStreamer*. Con dicho arreglo se monitoreó en tiempo real la concentración de partículas presentes en el aire, así como también se monitorearon las partículas que pasan a través del filtro cuando el efecto corona está activo o inactivo.

5.2.2 Generación del efecto corona

Para generar el efecto corona se adecuaron componentes (circuito de otro artefacto) para los fines de este trabajo (ver Figura 31) y se acopló al transformador TW 226. Sin embargo, no se ha comprobado el voltaje que provee el transformador, ya que los instrumentos con los que se cuenta para medirlo no tienen la escala suficiente para corroborar el dato que menciona el fabricante.

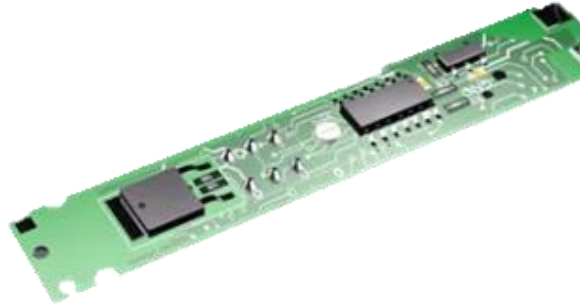


Figura 31. Circuito de pulsos.

Pese a esa limitante, se tomó como referencia lo mencionado por J. Ortiz *et al.* [78], quienes afirman que cuando el campo eléctrico supera la tensión crítica soportada por el gas, la descarga luminiscente se hace presente. En la Figura 32 se observa como el efecto corona se hace visible en el electrodo emisor cuando el alto voltaje circula por este.

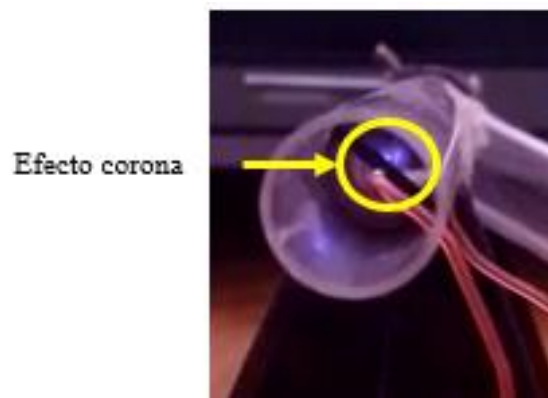


Figura 32. Visualización del efecto corona en el electrodo emisor.

5.2.3 Generación de gotículas

Para generar las gotículas se utilizó un nebulizador Neutek® modelo HI-NEB, de acuerdo con el fabricante éste genera un tamaño mínimo de partículas de $0.1 \mu\text{m}$ y un tamaño máximo de $23.8 \mu\text{m}$, a un flujo de 0.37 mL/min , el trabajo para nebulizar es realizado por una bomba que genera una presión de 0.8 bar ($\sim 0.79 \text{ atm}$). Para realizar el cambio del flujo de aire se utilizó un ventilador de 12V de 4 cm de diámetro conectado a un reóstato que regula su velocidad.

La Figura 36 muestra el conjunto del banco experimental, en esta figura se observa el montaje de los componentes sobre una estructura tubular de acrílico traslucido, el uso de este material es con el fin de observar y determinar de forma cualitativa y la eficiencia del filtro.

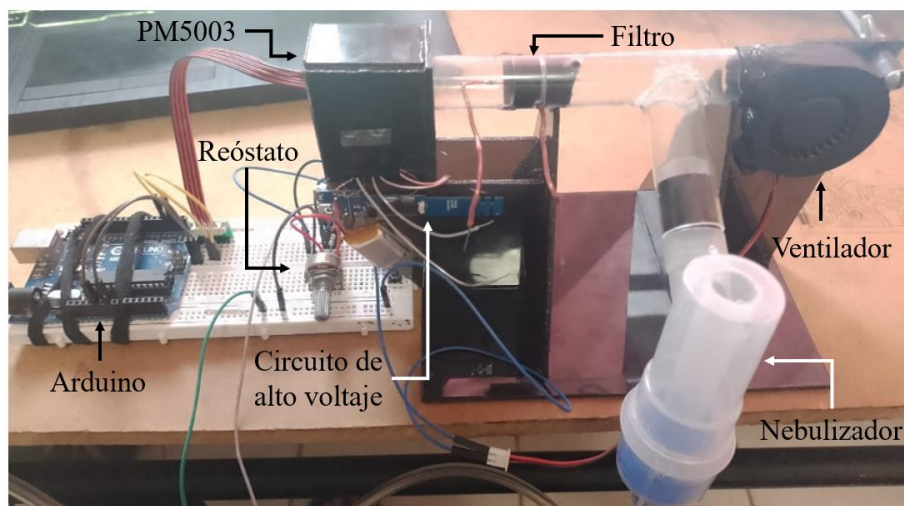


Figura 33. Banco experimental para monitorear la eficiencia del filtro de efecto corona.

5.3 Metodología experimental

La Figura 34 muestra esquemáticamente el proceso experimental el cual consiste principalmente de dos pasos: (1) realizar el monitoreo de las partículas cuando la corona está inactiva y (2) realizar el monitoreo de las partículas cuando la corona está activa.

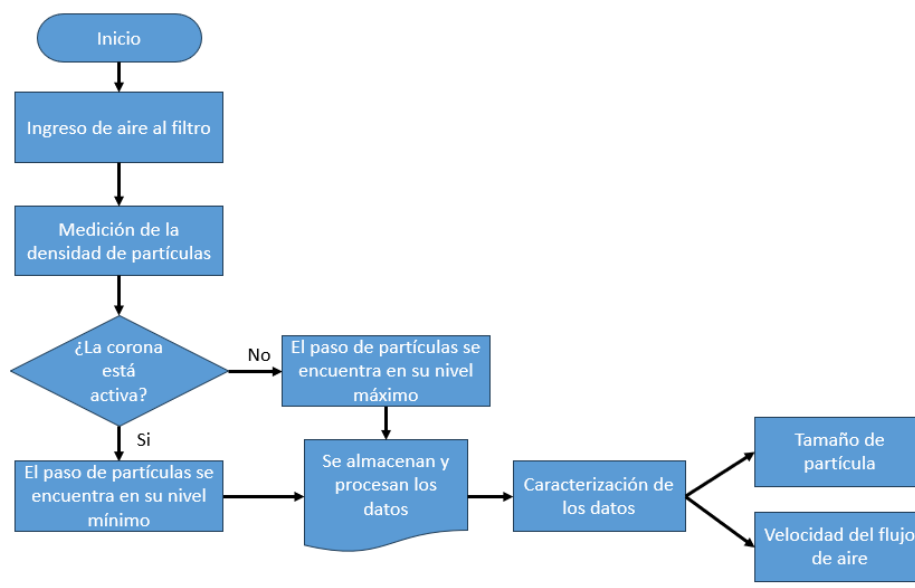


Figura 34. Diagrama del proceso experimental.

Para el proceso de monitoreo se seleccionaron cuatro tamaños de partículas como muestras representativas, estas son de los mismos tamaños que las analizadas en el modelo computacional ($d_1=0.3 \mu\text{m}$, $d_2=0.5 \mu\text{m}$, $d_3=1 \mu\text{m}$ y $d_4=2.5 \mu\text{m}$). Los datos obtenidos del monitoreo se caracterizan por su concentración en el aire y se clasifican de acuerdo a su tamaño y a la velocidad a la que son arrastradas por el flujo de aire.

5.3.1 Densidad de partículas en el flujo de aire

Conforme a lo mencionado, se forman cuatro conjuntos de datos donde cada uno representa un tamaño de partículas y como subconjunto se tiene la variación en la velocidad de aire (0.6, 1.0 y 1.5 m/s).

La Tabla 2 muestra un resumen de los resultados obtenidos, para determinado flujo de aire se registra un valor máximo promedio de partículas que atraviesan el filtro cuando no está activado el alto voltaje. Por el contrario, cuando la corona es aplicada, la concentración de partículas que cruzan el filtro se reduce hasta un valor mínimo promedio.

Vel. 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

Tabla 2. Valores máximos y mínimos en el conteo de partículas.

La Figura 35 muestra 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 Figura 26, 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.

Sin embargo, 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 Figura 26, en estos

resultados las partículas de $0.5\ \mu\text{m}$ tienen una eficiencia de recolección de 85% cuando la velocidad del flujo es de 1.5 m/s, 4% menos que las partículas con tamaños de $0.3\ \mu\text{m}$.

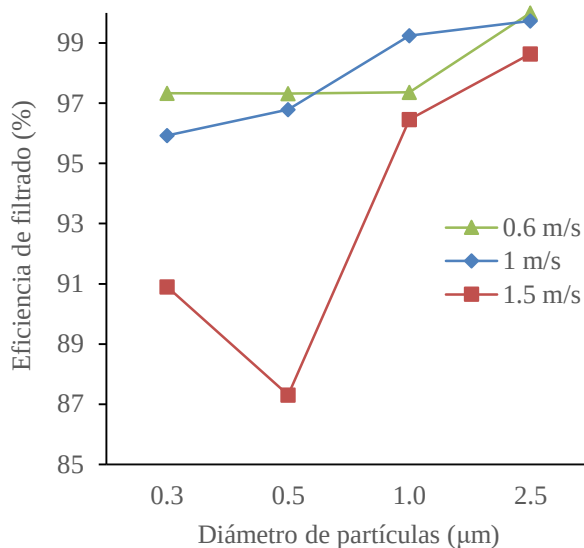


Figura 35. Eficiencia del prototipo de filtro de efecto corona.

Aunado a lo anterior, 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. Nuevamente se observa una discordancia respecto de lo mostrado en la simulación. En adición a esto, la Figura 35 refleja valores de eficiencia mayores para partículas de tamaños de $0.3\ \mu\text{m}$ y $0.5\ \mu\text{m}$ en comparación a la Figura 26 que muestra los datos arrojados por el simulador.

En la gama de partículas pequeñas, la carga parcial es importante porque de esta 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.

En el presente trabajo, 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 [41], [79].

5.3.2 Visualización de las partículas en el fujo de aire

Los resultados mostrados a continuación son una extensión del experimento principal y fueron realizados con el fin de observar físicamente el funcionamiento del filtro. Para tal demostración, el banco experimental fue instalado dentro de una cámara oscura bajo luz UV (ver Figura 36) y con ayuda de un medio de contraste (líquido fluorescente) es posible observar el flujo de las partículas, así como su interacción con la corona.

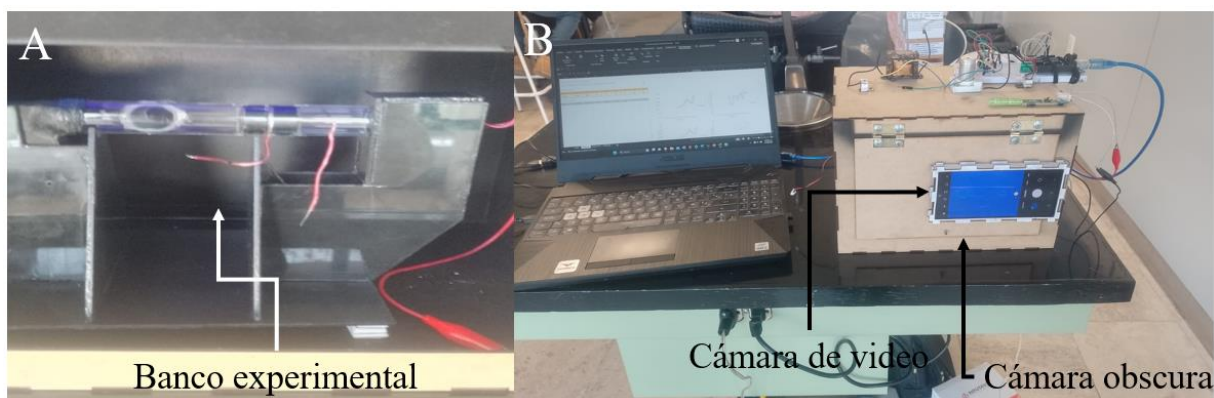


Figura 36. Equipo de pruebas, A) banco de experimentos al interior de la cámara oscura y B) vista exterior de la cámara oscura.

El desarrollo de este experimento sigue el mismo método planteado, exceptuando la medición de la concentración de partículas, por lo que no es utilizado el módulo PM5003. Para realizar la captura de las gotículas fluorescentes bajo la luz UV con la mayor definición posible, se utilizó un teléfono móvil cuya resolución de cámara es de 64 megapíxeles.

La Figura 37 muestra el proceso del experimento cualitativo, en la sección A) se observa un canal translucido por donde estará circulando el flujo de aire, también se indican los electrodos.

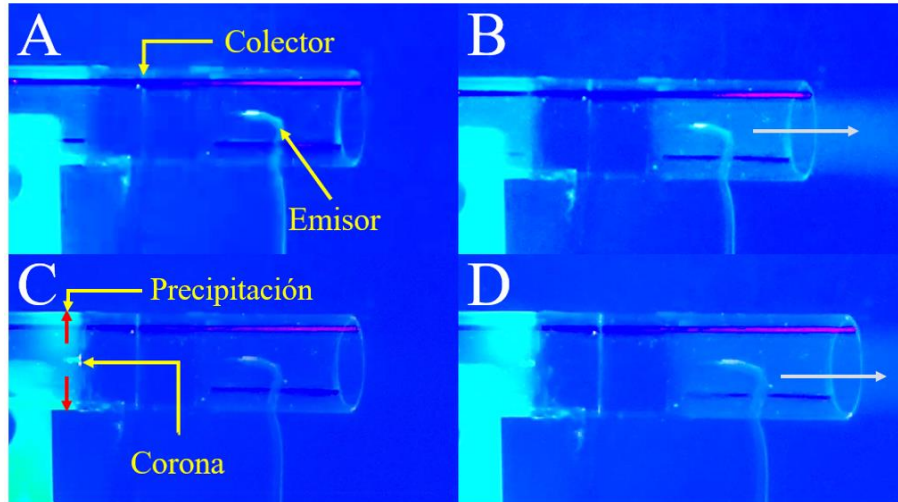


Figura 37. Etapas de visualización del filtro de efecto corona, A) corona inactiva- ducto limpio (referencia), B) corona inactiva- flujo de gotículas, C) corona activa- precipitación de las gotículas y D) flujo de gotículas-adhesión de gotículas en pared de conducto.

La sección B) muestra el inicio de la prueba, en esta se observa un flujo que sale del conducto, tal flujo está compuesto por las gotículas producidas por el nebulizador y transportadas por un flujo de aire inducido.

Posteriormente, la sección C) evidencia el funcionamiento de la corona instantes después de ser activada. Se observa que las gotículas se depositan en la pared interna del ducto antes de entrar al filtro. Esto sugiere que el electrodo emisor genera un efecto de punta que actúa fuera de la zona de precipitación prevista por el simulador.

Por último, la sección D) muestra la continuidad del flujo de gotículas después de desactivar la corona. En comparación con la sección B), se observa una saturación de gotículas anterior al filtro, esto indica que las partículas quedan adheridas a la pared.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

En este trabajo se estudiaron los fenómenos físicos que engloban al efecto corona con el fin de aplicarlos para el diseño y desarrollo de un filtro eficiente para uso unipersonal, el cual puede mejorar el flujo respiratorio para el portador en comparación con las mascarillas actuales que actúan como barreras.

Se comprobó mediante un estudio de Dinámica de Fluidos Computacional y de forma experimentalmente que las descargas de corona son efectivas para filtrar partículas dañinas para la salud, incluyendo el virus del SARS CoV-2.

De acuerdo con la teoría, las fuerzas que actúan sobre las partículas son tanto de naturaleza eléctrica como mecánica. Cuando las partículas son arrastradas por el aire, experimentan la fuerza mecánica, por otro lado, cuando estas entran a un campo eléctrico acumulan carga eléctrica y consecuentemente experimentan repulsión por el mismo campo eléctrico, es decir, fuerzas electrostáticas.

Por lo tanto, hay un conjunto de fuerzas que actúan al mismo tiempo sobre cada una de las partículas que ingresan al filtro de efecto corona. La suma de las fuerzas que actúan sobre estas partículas da como resultado un vector que indica la dirección de desplazamiento de la partícula. Dicho vector cambia de dirección a medida que la partícula cambia de posición, pues las fuerzas que actúan sobre esta, están en función de los gradientes de velocidad del aire y de potencial eléctrico. Entonces, todas las partículas que entran al filtro tienden a desviar su trayectoria en dirección al electrodo negativo.

Conforme a los resultados obtenidos por el simulador, se observó entre mayor sea el tamaño de las partículas estas recorrerán una menor trayectoria vertical, por el contrario, entre menor sea su tamaño, estas recorrerán una mayor trayectoria vertical. Esto se debe a que entre más grandes sean las partículas acumulan mayor carga eléctrica, por lo tanto, el campo eléctrico genera una mayor fuerza electrostática sobre las partículas con mayor acumulación de carga. De esta forma se depositan sobre el electrodo negativo realizando un menor recorrido vertical.

Por otro lado, también se observó que el aumento en la velocidad del aire que arrastra las partículas hacia el interior del filtro, influye en el recorrido que hacen las partículas, pues una menor velocidad del fluido provoca un menor recorrido vertical de las partículas, logrando así removerlas de forma eficiente del flujo de aire. Y cuanto mayor sea la velocidad del fluido mayor será el recorrido de las partículas en dirección vertical, provocando así una menor recolección de partículas.

A modo de comprobar los datos del simulador y con ayuda de un banco experimental, se puso a prueba la funcionalidad y la eficiencia del prototipo del filtro. Las pruebas realizadas al prototipo consistieron en aumentar el flujo de aire que atraviesa el filtro para determinar si el filtro será efectivo cuando haya un aumento en la respiración de usuario. Para obtener los datos de las pruebas se utilizó un interferómetro con el cual fue posible cuantificar la densidad de gotículas que traspasan el filtro en sus dos estados (encendido/apagado).

Los resultados obtenidos del experimento confirman que el efecto corona es un método para la remoción de partículas nocivas para la salud, en este caso de gotículas que puedan contener algún patógeno. El efecto corona genera una alta eficiencia de filtrado aún y cuando el flujo de aire que entra por el filtro aumenta a 2 m/s. Sin embargo, si hay una reducción en la eficiencia del filtro cuando aumenta la velocidad del flujo.

Como conclusión final y conforme a la información obtenida experimentalmente, se presume que el filtro es capaz de remover hasta en un 95% partículas iguales o menores a 2.5 μm ,

6.2 Trabajos futuros

En este trabajo se ha realizado un primer acercamiento para aplicar el fenómeno de descarga de corona en filtros, por lo que los siguientes pasos que se proponen para continuar con su desarrollo, son los siguientes.

- Acoplar el filtro de aire a una mascarilla facial para realizar pruebas de funcionalidad y duración mediante el uso continuo y prolongado.
- Realizar el monitoreo de la humedad relativa y concentración de CO₂ dentro de la mascarilla con el fin de verificar que tiene la suficiente ventilación.

- Comprobar como la humedad y la saturación de las partículas en los electrodos podían afectar el funcionamiento y eficiencia del filtro

ANEXO

MEDICIÓN DE ACUMULACIÓN DE CO₂ AL INTERIOR DE CUBREBOCAS COMERCIAL TIPO KN95

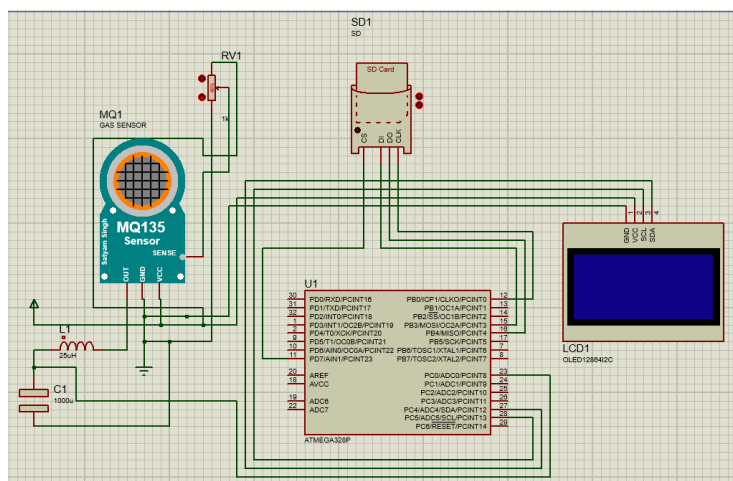


Figura 38. Diseño de circuito para medición de gases.

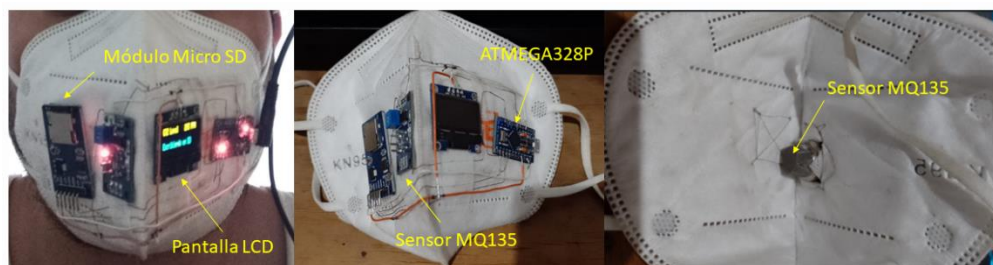
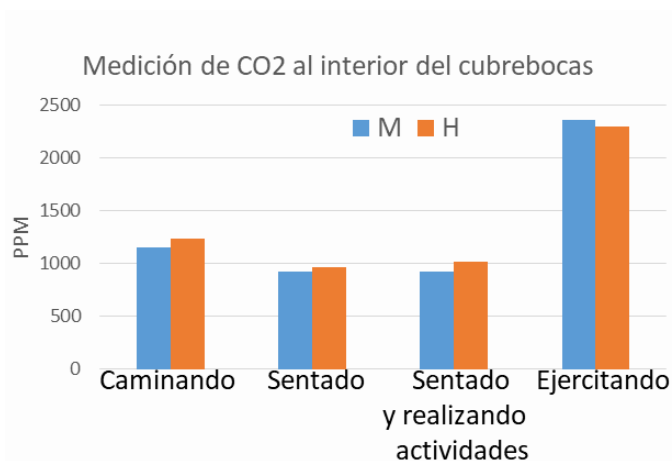


Figura 39. Montaje del dispositivo en una mascarilla tipo KN95.



Se realizó una prueba experimental en dos individuos (hombre, mujer) haciendo actividades sencillas a lo largo de un día, los resultados obtenidos en cada actividad se promedió y graficó.

El nivel más bajo de exhalación de CO₂ es de ~ 900 a 950 PPM estando en reposo. De ~ 900 a 1000 PPM cuando se está sentado pero realizando actividades en computadora. Para una caminata, el nivel es de ~ 1150 a 1200 PPM y el nivel máximo registrado es de ~ 2250 a 2350 PPM para actividades que requieren un mayor esfuerzo físico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. Bernal y Y. DuarteTorres, “Hallazgos En Hemograma Y Fsp En Infección Por Covid-19”, *Proasecal SAS*, vol. 1, núm. 1, pp. 1–7, 2020.
- [2] R. P. W. J. Ena, “Un nuevo coronavirus emerge”, *Rev Clin Esp*, vol. 220, núm. 2, pp. 115–116, 2020.
- [3] L. Xie, F. Liu, J. Liu, y H. Zeng, “A Nanomechanical Study on Deciphering the Stickiness of SARS-CoV-2 on Inanimate Surfaces”, *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 12, núm. 52, pp. 58360–58368, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c16800.
- [4] Palaga. Eakachai, Prompetchara. Chutitorn, Ketloy. Tanapat, “Allergy and Immunology Immune responses in COVID-19 and potential vaccines: Lessons learned from SARS and MERS epidemic”, doi: 10.12932/AP-200220-0772.
- [5] K. A. Shaw, G. A. Zello, S. J. Butcher, J. B. Ko, L. Bertrand, y P. D. Chilibeck, “The impact of face masks on performance and physiological outcomes during exercise: A systematic review and meta-analysis”, *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, vol. 46, núm. 7, pp. 693–703, 2021, doi: 10.1139/apnm-2021-0143.
- [6] S. L. Leon *et al.*, “Histórica, Científica Y Recomendaciones Prácticas”, *Scielo*, vol. 1, pp. 1–19, 2020.
- [7] C. Matuschek *et al.*, “The history and value of face masks”, *Eur J Med Res*, vol. 25, núm. 1, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1186/s40001-020-00423-4.
- [8] W. Hübener, “Ueber die MSglichkeit der Wundinfection yore Munde aus und ihre Verhiitung durch Operationsmasken .”, *Zeitschrift für Hygiene und Infektionskrankheiten*, vol. 28, núm. 1, pp. 348–372, 1898, doi: 10.1007/BF02285377.
- [9] K. H. Lee, D. T. Wong, T. M. Ho, K. H. Ng, T. Straits, y C. Magazine, “Dr Wu Lien-teh : modernising post-1911 China ’ s public health service”, vol. 55, núm. 2, pp. 99–102, 2014, doi: 10.11622/smedj.2014025.

- [10] Q. Syed, W. Sopwith, M. Regan, y M. A. Bellis, “Behind the mask. Journey through an epidemic: some observations of contrasting public health responses to SARS”, *J Epidemiol Community Health* (1978), vol. 57, núm. 11, pp. 855–856, 2003.
- [11] R. I. Yocupicio-gaxiola, V. Petranovskii, S. Perla, J. Ant, y F. N. Murrieta-rico, “Prospects for Further Development of Face Masks to Minimize Pandemics – Functionalization of Textile Materials with Biocide Inorganic Nanoparticles : A Review”, vol. 19, núm. 6, pp. 1010–1023, 2021.
- [12] T. de Araújo Andrade *et al.*, “Technological Scenario for Masks in Patent Database During Covid-19 Pandemic”, *AAPS PharmSciTech*, vol. 22, núm. 2, 2021, doi: 10.1208/s12249-021-01918-x.
- [13] L. R. Garcia Godoy *et al.*, “Facial protection for healthcare workers during pandemics: A scoping review”, *BMJ Glob Health*, vol. 5, núm. 5, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1136/bmjgh-2020-002553.
- [14] A. M. Davison, “Pathogen inactivation and filtration efficacy of a new anti-microbial and anti-viral surgical facemask and N95 against dentistry-associated microorganisms”, *International dentistry Australasian edition*, vol. 7, núm. 1, pp. 36–42, 2012.
- [15] J. C. Rubio-Romero, M. del C. Pardo-Ferreira, J. A. Torrecilla-García, y S. Calero-Castro, “Disposable masks: Disinfection and sterilization for reuse, and non-certified manufacturing, in the face of shortages during the COVID-19 pandemic”, *Saf Sci*, vol. 129, núm. April, p. 104830, 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104830.
- [16] M. Ippolito *et al.*, “Medical masks and Respirators for the Protection of Healthcare Workers from SARS-CoV-2 and other viruses”, *Pulmonology*, vol. 26, núm. 4, pp. 204–212, 2020, doi: 10.1016/j.pulmoe.2020.04.009.
- [17] D. Berry, G. Mainelis, y D. Fennell, “Effect of an Ionic Air Cleaner on Indoor/Outdoor Particle Ratios in a Residential Environment”, *Aerosol Science and Technology*, vol. 41, núm. 3, pp. 315–328, 2007, doi: 10.1080/02786820701199702.

- [18] Z. Grabarczyk, “Effectiveness of indoor air cleaning with corona ionizers”, *J Electrostat*, vol. 51–52, núm. 1–4, pp. 278–283, 2001, doi: 10.1016/S0304-3886(01)00058-4.
- [19] B. Uk Lee, M. Yermakov, y S. A. Grinshpun, “Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission”, *Atmos Environ*, vol. 38, núm. 29, pp. 4815–4823, 2004, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.010.
- [20] S. A. Grinshpun, G. Mainelis, M. Trunov, A. Adhikari, T. Reponen, y K. Willeke, “Evaluation of ionic air purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces”, *Indoor Air*, vol. 15, núm. 4, pp. 235–245, 2005, doi: 10.1111/j.1600-0668.2005.00364.x.
- [21] C. C. Wu, G. W. M. Lee, P. Cheng, S. Yang, y K. P. Yu, “Effect of wall surface materials on deposition of particles with the aid of negative air ions”, *J Aerosol Sci*, vol. 37, núm. 5, pp. 616–630, 2006, doi: 10.1016/j.jaerosci.2005.05.018.
- [22] A. Shiue, S. C. Hu, y M. L. Tu, “Particles removal by negative ionic air purifier in cleanroom”, *Aerosol Air Qual Res*, vol. 11, núm. 2, pp. 179–186, 2011, doi: 10.4209/aaqr.2010.06.0048.
- [23] M. Mantovan y A. Cecchi, “IONIZATION DEVICE AND METHOD TO MANUFACTURE THEREOF”, US 20220054670A1, 2022
- [24] J. F. Rodríguez, U. F. Alarcón Pinto, O. Garcia Bedoya, y G. Benavides, “Diseño y prototipo de un precipitador electrostático”, *Revista Mutis*, vol. 7, núm. 2, pp. 86–95, 2017, doi: 10.21789/22561498.1237.
- [25] M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. Patscheider, S. Promreuk, y D. L. Cocke, “Plasma chemistry as a tool for green chemistry, environmental analysis and waste management”, *J Hazard Mater*, vol. 79, núm. 3, pp. 301–320, 2000, doi: 10.1016/S0304-3894(00)00279-X.

- [26] L. Bárdos y H. Baránková, “Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications”, *Thin Solid Films*, vol. 518, núm. 23, pp. 6705–6713, 2010, doi: 10.1016/j.tsf.2010.07.044.
- [27] A. Fridman, *Plasma Chemistry*. UK, 2008.
- [28] P. Chabert y N. Braithwaite, *Physics of Radio Frequency Plasmas*. Cambridge University Press, 2011.
- [29] C. Dietz y C. C. Rica, “Desarrollo de sistemas de introducción de muestra en el plasma de microondas”, *Química Analítica*, p. 214, 2001.
- [30] B. Eliasson y U. Kogelschatz, “Basic data for modelling of electrical discharges in gases: oxygen”, *Brown Boveri Research Report KLR 86-11C*, p. 1, 1986.
- [31] J. C. Prata, A. L. P. Silva, T. R. Walker, A. C. Duarte, y T. Rocha-Santos, “COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics”, *Environ Sci Technol*, vol. 54, núm. 13, pp. 7760–7765, 2020, doi: 10.1021/acs.est.0c02178.
- [32] D. Barrera-Nunez, L. Torres-Ibarra, L. Leon-Maldonado, D. Stern, T. Barrientos-Gutierrez, y L. Lopez-Carrillo, *Revisión rápida de la transmisión del SARS-CoV-2 por contacto con objetos y superficies*, vol. 63, núm. 1. 2020. doi: 10.21149/11877.
- [33] N. Asim, M. Badiei, y K. Sopian, “Review of the valorization options for the proper disposal of face masks during the COVID-19 pandemic”, *Environ Technol Innov*, vol. 23, p. 101797, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101797.
- [34] C. Martellucci, M. E. Flacco, M. Martellucci, F. Violante, y L. Manzoli, “Inhaled CO2 concentration while wearing face masks: a pilot study using capnography.”, *medRxiv*, 2022, doi: 10.1101/2022.05.10.22274813.
- [35] K. T. A. L. Burm, “Plasma: The fourth state of matter”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 32, núm. 2, pp. 401–407, 2012, doi: 10.1007/s11090-012-9356-1.
- [36] P. Sherlie, “Introducción al plasma frío producido a través de descargas de barrera dieléctrica.”, Universidad Tecnológica de Panamá, 2021.

- [37] J. S. Townsend, F.R.S, y H. T. Tizard, “The motion of electrons in gases”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 88, núm. 604, pp. 336–347, 1913, doi: 10.1098/rspa.1913.0034.
- [38] R. Soto y S. E. Villalobos, “Descargas eléctricas en gases”, núm. 22, pp. 1–10, 2015.
- [39] A. Serway y W. Jewett, *Física Volumen 2*, 7ma ed. CENAGE Learning.
- [40] A. Mizuno, “Electrostatic precipitation”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, núm. 5, pp. 615–624, ene. 2000, doi: 10.1109/94.879357.
- [41] P. a Lawless, “PARTICLE CHARGING BOUNDS, SYMMETRY RELATIONS AND AN ANALYTIC CHARGING RATE MODEL FOR THE CONTINUUM REGIME”, *Science (1979)*, vol. 27, núm. 2, pp. 191–215, 1996, doi: 0021-8502/96.
- [42] S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, y V. A. Yamshchikov, “A powerful electrohydrodynamic flow generated by a high-frequency dielectric barrier discharge in a gas”, *Plasma Physics Reports*, vol. 42, núm. 1, pp. 104–111, 2016, doi: 10.1134/S1063780X16010128.
- [43] L. Zhao y K. Adamiak, “EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin-plate configuration”, *J Electrostat*, vol. 63, núm. 3-4 SPEC. ISS., pp. 337–350, 2005, doi: 10.1016/j.elstat.2004.06.003.
- [44] A. Mizuno, “Electrostatic precipitation”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, núm. 5, pp. 615–624, ene. 2000, doi: 10.1109/94.879357.
- [45] Z. Li y H. Wang, “Drag force, diffusion coefficient, and electric mobility of small particles. I. Theory applicable to the free-molecule regime”, *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, vol. 68, núm. 6, 2003, doi: 10.1103/PhysRevE.68.061206.
- [46] M. N. Lyulyukin, A. S. Besov, y A. V. Vorontsov, “The influence of corona electrodes thickness on the efficiency of plasmachemical oxidation of acetone”, *Plasma*

Chemistry and Plasma Processing, vol. 31, núm. 1, pp. 23–39, 2011, doi: 10.1007/s11090-010-9265-0.

- [47] F. W. Peek, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, 2° ed. London: McGraw-Hill, 1920.
- [48] C. Maguiña Vargas, R. Gastelo Acosta, y A. Tequen Bernilla, “El nuevo Coronavirus y la pandemia del Covid-19”, *Revista Medica Herediana*, vol. 31, núm. 2, pp. 125–131, 2020, doi: 10.20453/rmh.v31i2.3776.
- [49] E. A. Osorio y D. Vilar-Compte, “La importancia del uso de la mascarilla (cubrebocas) en la era COVID-19 : una herramienta preventiva esencial”, *Boletín COVID-19*, vol. 2, núm. 14, pp. 33–35, 2021.
- [50] J. A. Ramírez Guerrero, “La importancia del cubrebocas en la población general durante la pandemia de COVID-19”, *Medicina Interna México*, vol. 37, núm. 1, pp. 94–109, 2021.
- [51] F. I. Prada, “La química contra la transmisión del COVID-19: un recurso eficaz y didáctico”, *Analesdequimica.Es*, vol. 117, núm. 2, p. 143, 2021.
- [52] I. Talavera y A. Menéndez, “Una explicación desde la química: ¿ por qué son efectivos el agua y jabón , el hipoclorito de sodio y el alcohol para prevenir el contagio con la COVID-19?”, *Academia de Ciencias de Cuba*, vol. 10, núm. 2, p. 4, 2020.
- [53] G. Anjana, M. Gowri, C. S. Ashok Raja, M. Prasath, S. Balakumar, y V. Ganesh, “Silver nanoparticles as a non alcoholic hospital disinfectant to combat nosocomial pathogens”, *Journal of Bionanoscience*, vol. 9, núm. 2, pp. 102–111, 2015, doi: 10.1166/jbns.2015.1280.
- [54] IMMUNETEC, “Mecanismo de acción de los iones de plata”. [En línea]. Disponible en: <https://immunmex.com/product/spray-de-impregnacion/>
- [55] J. Otter *et al.*, “Smart surfaces to tackle infection and antimicrobial resistance”, *Molecular-Science-Engineering*, núm. 4, 2020.

- [56] G. Torres Villaseñor, “El cobre, un auxiliar contra el coronavirus”, Consejo Consultivo de Ciencias. [En línea]. Disponible en: <http://ccciencias.mx/es/ciencia-y-opinion/item/799-cobre-auxiliar-coronavirus.html>
- [57] S. L. Warnes, Z. R. Little, y C. W. Keevil, “Human coronavirus 229E remains infectious on common touch surface materials”, *mBio*, vol. 6, núm. 6, 2015, doi: 10.1128/mBio.01697-15.
- [58] A. K. Chatterjee, R. Chakraborty, y T. Basu, “Mechanism of antibacterial activity of copper nanoparticles”, *Nanotechnology*, vol. 25, núm. 13, 2014, doi: 10.1088/0957-4484/25/13/135101.
- [59] J. Konieczny y Z. Rdzawski, “Antibacterial properties of copper and its alloys”, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 56, núm. 2, pp. 53–60, 2012.
- [60] U.S. Environmental Protection Agency, “Report on the Environment Indoor air quality”, EPA/400/1-89/001C. Consultado: el 25 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/3598f7s5>
- [61] X. Comenech, W. F. Jardim, y M. I. Litter, “Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes”, núm. 1, pp. 3–26, 2016.
- [62] M. Lara Castro, Y. Bautista Bautista, R. M. Woo García, y A. C. Bonilla Hernández, “Degradación oxidativa por reacciones fotocatalíticas: una alternativa para la mitigación de SARS-CoV-2”, *Interconectando Saberes*, núm. 13, pp. 11–18, 2022, doi: 10.25009/is.v0i13.2732.
- [63] “Mecánica de la ventilación pulmonar”. Consultado: el 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://fisiologia.facmed.unam.mx/index.php/mecanica-de-la-ventilacion-pulmonar-espirometria/>
- [64] A. A. Gawad, “COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF HUMAN HEAD EXHALATION WITH AND WITHOUT ICFD14-EG-7021 COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF HUMAN HEAD EXHALATION WITH AND WITHOUT”, núm. April, pp. 2–3, 2021.

- [65] R. L. Mott, “Mecánica de fluidos. Impulsión de fluidos”, *Mecánica De Fluidos*, pp. 1–623, 2019.
- [66] G. Jiménez A., “Degradación de gases tóxicos provenientes de motores de combustión interna mediante tecnología de plasma frío”, Universidad Autonoma del Estado de Mexico, 2015.
- [67] M. Bonitz, N. Horning, y P. Ludwig, *Introduction to Complex Plasmas*. 2010. doi: 10.1007/978-3-642-10592-0.
- [68] A. Tepale-cortés, H. Moreno-saavedra, y C. E. Torres-reyes, “Fuente de alto voltaje para generación de plasma en un reactor cilíndrico a temperatura ambiente y a presión atmosférica”, *Ideas En Ciencia*, pp. 33–41, 2015.
- [69] *et al.*, “Control de un Sistema de Descargas de Barrera Dieléctrica basado en el Diseño Gráfico de Sistemas”, *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 18, núm. 1, pp. 17–29, 2017, doi: 10.22201/fi.25940732e.2017.18n1.002.
- [70] Á. Giménez Pérez, “Diseño y simulación de un convertidor Flyback para un sistema fotovoltaico”, Universidad Politécnica de València, 2016.
- [71] V. A. Bolaños, “Diseño y construcción de un sistema de alimentación para LEDs de potencia utilizando el convertidor CD/CD tipo Flyback”, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2009.
- [72] E. Kubala *et al.*, “A Review of Selected Studies That Determine the Physical and Chemical Properties of Saliva in the Field of Dental Treatment”, vol. 2018, 2018, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6572381>.
- [73] D. Rubinetti, D. A. Weiss, y W. Egli, “Electrostatic Precipitators - Modelling and Analytical Verification Concept”, pp. 14–16, 2015.
- [74] Y. Nazarenko, D. Pal, y P. A. Ariya, “Air quality standards for the concentration of particulate matter 2.5, global descriptive analysis”, *Bull World Health Organ*, vol. 99, núm. November 2020, pp. 125–137, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.19.245704>.

- [75] C. A. Echeverí y J. G. Vasco, “RELACIÓN ENTRE LAS PARTÍCULAS FINAS (PM_{2.5}) Y RESPIRABLES (PM₁₀) EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN”, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 7, núm. 12, pp. 23–42, 2008.
- [76] Y. Zhuang, Y. J. Kim, T. G. Lee, y P. Biswas, “Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators”, *J Electrostat*, vol. 48, núm. 3–4, pp. 245–260, 2000, doi: 10.1016/S0304-3886(99)00072-8.
- [77] D. Hagan y E. Cross, “Can your Plantower PMS5003-based Air Quality Sensor Measure PM₁₀?”, QuantAQ. [En línea]. Disponible en: <https://blog.quant-aq.com/can-your-plantower-pms5003-based-air-quality-sensor-measure-pm10/>
- [78] J. J. Ortiz, C. Nigri, C. Lasorsa, D. Rodriguez, N. Boggio, y G. P. Ortiz, “Verificación de las Curvas de Paschen y la Ley de Peek en Microionizadores por Descarga Luminiscente”, pp. 235–237, 2011.
- [79] D. Yang, B. Guo, X. Ye, A. Yu, y J. Guo, “Numerical simulation of electrostatic precipitator considering the dust particle space charge”, *Powder Technol*, vol. 354, pp. 552–560, sep. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.06.013.
- [80] E. Kubala *et al.*, “A Review of Selected Studies That Determine the Physical and Chemical Properties of Saliva in the Field of Dental Treatment”, vol. 2018, 2018, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6572381>.
- [81] Y. Nazarenko, D. Pal, y P. A. Ariya, “Air quality standards for the concentration of particulate matter 2.5, global descriptive analysis”, *Bull World Health Organ*, vol. 99, núm. November 2020, pp. 125–137, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.19.245704>.