

PRECIPITADOR ELECTROSTATICO A ESCALA PILOTO PARA EL
LABORATORIO DE AIRE DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA.

PAULA ANDREA GONZALEZ RUIZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
2019

PRECIPITADOR ELECTROSTATICO A ESCALA PILOTO PARA EL
LABORATORIO DE AIRE DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA.

PAULA ANDREA GONZALEZ RUIZ

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO
AMBIENTAL

Director

PhD. KENTO TARO MAGARA GÓMEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Bucaramanga, junio 25 de 2019

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia queremos agradecer a Dios por darme la vida y la oportunidad de trabajar en lo que me gusta.

A mis padres y hermana por ser mi apoyo incondicional a lo largo de mi vida, motivándome e impulsándome a ser mejor cada día.

A Kento por sus enseñanzas y apoyo durante mi proceso académico y la realización del presente trabajo de grado.

A todos los profesores y miembros de la facultad por su entrega y exigencia para ayudarme a crecer como profesional.

A la UPB por ser la institución responsable en mi formación integral.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	17
3. ANTECEDENTES.....	19
a. Antecedentes generales.....	19
b. Antecedentes del proyecto.....	25
4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	26
5. OBJETIVOS.....	27
1.1. Objetivo General.	27
1.2. Objetivos Específicos.....	28
6. MARCO TEORICO	28
A. MATERIAL PARTICULADO FINO	28
I. Composición química	28
B. MATERIAL PARTICULADO GRUESO	29
I. Composición química	29
C. TEORÍA DE LA PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA.....	30
D. CORRIENTE CONTINUA Y CORRIENTE ALTERNA.....	33
a. Resultados obtenidos.....	38
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
10. BIBLIOGRAFÍA	50

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Caja de placas.....	20
Ilustración 2. Diseño de prototipo de ensayo (Cilindro, base matriz, tapa, electrodo y aisladores.).....	34
Ilustración 3. Estructura interna del filtro electrostático y su sistema de eléctrico..	35
Ilustración 4. Montaje eléctrico.....	36
Ilustración 5. Generación de gas antes de la aplicación del voltaje	37
Ilustración 6. Aplicación de alto voltaje	39
Ilustración 7. Diseño ingenieril de precipitador electrostatico a escala de laboratorio.	38
Ilustración 8. Dimensiones y características generales de prototipo a escala piloto	39
Ilustración 9. Montaje cuerpo del precipitador electrostático.	40
Ilustración 10. Montaje y dimensiones generales de base matriz para precipitador electrostático.....	41
Ilustración 11. Montaje de portaelectrodos para precipitador electrostático	42
Ilustración 12. Diseño de zona de transición precipitador electrostático.....	43
Ilustración 13. Diseño de campana para máquina de humo del precipitador electrostático.....	44
Ilustración 14. Montaje total del precipitador electrostático.....	45
Ilustración 15. Sensor de opacidad.....	46

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO A ESCALA PILOTO PARA EL LABORATORIO DE AIRE DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

AUTOR(ES): Paula Andrea Gonzalez Ruiz

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Kento Taro Magara Gómez

RESUMEN

El precipitador electrostático es un dispositivo altamente eficiente en el control de partículas, utiliza fuerzas eléctricas para movilizar las partículas de una corriente de emisión hacia las superficies de recolección, su eficiencia es debido a que se aplica a gases con contenido de partículas menores o iguales a $10\ \mu\text{m}$ o $2.5\ \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico y los diferentes contaminantes del aire en forma de partículas como los metales. En la actualidad el refinamiento en cuanto a la operación, materiales y las nuevas invenciones de los precipitadores electrostáticos los cuales son ampliamente usados en industrias mineras, centrales térmicas, cementeras e industrias petroquímicas, son evidencia de la necesidad por su tecnología avanzada, dando lugar a un diseño y construcción de este equipo de recolección de material particulado (precipitador electrostático) a escala de laboratorio con fines didácticos para el laboratorio de aire de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

PALABRAS CLAVE:

construcción, precipitador, partículas, fuerzas, eléctricas

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ELECTROSTATIC PRECIPITATOR AT PILOT SCALE FOR THE AIR LABORATORY OF THE PONTIFICIA BOLIVARIANA UNIVERSITY SECTION BUCARAMANGA

AUTHOR(S): Paula Andrea Gonzalez Ruiz

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Kento Taro Magara Gómez

ABSTRACT

The electrostatic precipitator is a highly efficient device in particle control, uses electric forces to mobilize the particles of an emission current towards the collecting surfaces, it's efficiency is because it is applied to gases with particle content less than or equal to 10 μm or 2.5 μm of aerodynamic diameter and the different air pollutants in the form of particles such as metals. Currently, the refinement of the operation, materials and new inventions of electrostatic precipitators which are widely used in mining industries, thermal power plants, cement and petrochemical industries, are evidence of the need for it's advanced technology, Giving rise to a design and construction of this equipment for the collection of particulate material (electrostatic precipitator) at laboratory scale for didactic purposes for the Air Laboratory of the Pontificia Bolivariana University Section Bucaramanga.

KEYWORDS:

Construction, precipitator, particles, forces, electrical.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el monitoreo y el control de la contaminación atmosférica ha tomado mayor relevancia debido a las cifras de la Organización Mundial de la Salud, en donde una de cada ocho muertes a nivel mundial es causada por la contaminación del aire. A nivel nacional, el Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, los efectos de este fenómeno estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades. Adicionalmente, los costos ambientales asociados a la contaminación atmosférica en Colombia, durante los últimos años se incrementaron pasando de 1,1% del PIB de 2009 (\$5,7 billones de pesos) a 1,59% del PIB de 2014 (\$12 billones de pesos) y del 1,93% del PIB en 2015 (\$15.4 billones de pesos), lo cual pone en evidencia la necesidad de seguir implementando estrategias para controlar, evaluar y monitorear estas sustancias. [1]

Según informes del estado de la calidad del aire mostraron que el contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional es el Material particulado PM 2.5 y PM 10, El cual es uno de los contaminantes atmosféricos mas estudiados en el mundo, es definido como el conjunto de partículas solidas y/o liquidas presentes en suspensión en la atmosfera, que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas. La presencia de este contaminante en la atmosfera ocasiona gran variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre, además de la disminución visual en la atmosfera causada por la absorción y dispersión de la luz. La presencia de material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en adultos.

Un precipitador electrostático es un dispositivo que se usa para atrapar partículas contaminantes para su posterior remoción, usando ionización o carga por inducción electrostática, estos equipos son considerados altamente eficientes puesto que

reducen de manera notable la contaminación impidiendo el flujo de los gases a través del dispositivo, este equipo puede remover fácilmente partículas finas como polvo, material particulado y otros que se encuentran en el aire. Las partículas pueden estar presentes en un estado cargado en la atmosfera o pueden cargarse en el dispositivo. Debido a que las partículas en el aire como polvo y humo tienen una concurrente carga positiva, permanecen suspendidas en el aire producto de la repulsión electrostática. Cuando tales partículas, interactúan con los pequeños iones generados por el precipitador, ellas adquieren una carga negativa y son atraídos a las superficies para luego ser retenidas, este proceso de ionización adquiere efectividad a partir de voltajes superiores a 2500 V DC.

Es evidente la necesidad de la obtención de un precipitador electrostático a escala de laboratorio en la Universidad pontificia bolivariana para fines de aprendizaje, investigación y su tecnología avanzada, dando lugar en el presente caso a un diseño de este equipo de recolección de material particulado (precipitador electrostático) con fines didácticos para el laboratorio de aire de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Financiado por la empresa FABRIFEED y hace parte del proyecto de investigación con código de la DIT: II-FO-036 aprobado dentro de la convocatoria UPB innova del año 2018 y con fecha de inicio Julio de 2018, para la adquisición de los demás fondos monetarios.

2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación atmosférica puede ser causada por fuentes naturales o actividades humanas. Dentro de las actividades humanas se puede hacer énfasis a todo tipo de actividades asociadas al uso de combustibles fósiles puesto que en las diferentes zonas se emiten grandes cantidades de contaminantes a la atmosfera, los cuales provienen tanto de fuentes naturales como de las diferentes actividades generadas por el hombre asociadas a lo que se conocen como fuentes fijas, móviles y aéreas. Las fuentes móviles como vehículos, motos, trenes, barcos, aviones, son responsables de generar emisiones de material particulado menor a 10 micras (PM10), Monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx) debido al uso de fuentes fósiles de energía.

Las fuentes fijas tales como los establecimientos industriales, termoeléctricos, sectores residenciales, sectores comerciales que se responsabilizan por la generación de las partículas suspendidas totales (PST) y óxidos de azufre (SOx), son una de las mayores preocupaciones para Colombia y el mundo puesto que es generador de altos costos sociales relacionados con efectos sobre la salud pública debido a las altas tasas de mortalidad y morbilidad. [2]

El contaminante de mayor interés a nivel mundial es el material particulado (PM), el cual refiere a una mezcla de partículas sólidas y de pequeñas gotas líquidas suspendidas en el aire. La Agencia para la Protección Ambiental (Environment Protection Agency) de los Estados Unidos, define PM10, como la materia particulada que tiene un diámetro aerodinámico nominal de 10 μm o menos y se define PM 2.5 como la materia particulada con diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 μm . En general, cuando hacemos referencia a “Partículas gruesas” se asemeja a PM10, mientras que si hablamos “Partículas finas” se refiere a PM2.5, por tanto es de resaltar que cuanto menor sea el diámetro de una partícula, más tiempo

permanecerá en suspensión y por consiguiente podrá ser transportada a mayores distancias. El gran interés por este tipo de contaminante es debido a que hoy en día es uno de los principales problemas frente a lo que se refiere a la calidad del aire tanto en centros urbanos como en los diferentes países en vía de desarrollo, y por ser el causante de efectos nocivos sobre la salud humana. Estas emisiones suelen ser mayormente originadas durante los diferentes procesos de combustión o procesos productivos específicos provenientes de las industrias y el rodamiento del parque automotor, los cuales pueden incluir también metales pesados dentro de su composición, ocasionando emisiones de vital importancia desde el punto de vista de salud ocupacional. [3] Por tanto se han establecido algunas medidas, dando paso a la creación de equipos como el precipitador electrostático diseñado para controlar dichas emisiones de partículas.

El precipitador electrostático es un dispositivo altamente eficiente en el control de partículas ya que utiliza fuerzas eléctricas para movilizar las partículas de una corriente de emisión hacia las superficies de recolección, su alta eficiencia es debido a que se aplica a gases con contenido de partículas menores o iguales a $10\ \mu\text{m}$ o $2.5\ \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico y los diferentes contaminantes del aire en forma de partículas como los metales. [4]

En la actualidad los precipitadores electrostáticos son ampliamente usados en industrias mineras, centrales térmicas, cementeras, industrias petroquímicas, etc. La necesidad del diseño de un precipitador electrostático a escala piloto para el laboratorio de aire de la Universidad Pontificia Bolivariana es primero que todo la innovación, ya que este equipo podría simular el funcionamiento y la eficiencia de remoción de material particulado de equipos ya construidos en otros países a gran escala, con este nuevo equipo diseñado a una escala de laboratorio que fomente el aprendizaje y la investigación por su tecnología avanzada e innovadora en la Universidad, Además permitirá aumentar la competitividad con otras universidades ya que la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga sería pionera

a nivel regional en el diseño de este tipo de equipos, beneficiando así tanto a los estudiantes como a la universidad misma proporcionándole fortalezas académicas en pro de la evolución de la normativa ambiental.

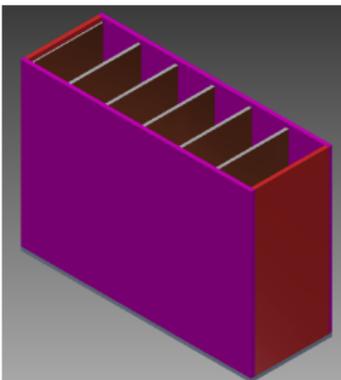
3. ANTECEDENTES

a. Antecedentes generales

Los Investigadores Juan Felipe Rodríguez, Uriel Faruk Alarcón pinto, Olmer García Bedoya y German Benavidez en su estudio publicado en el año 2017 acerca del Diseño y prototipo de un precipitador electrostático en el cual se utiliza un circuito que aumentó la tensión de la red local (120v) a 27000 voltios por medio de un transformador conocido como flyback, su proyecto busco diseñar y construir un dispositivo de este tipo con elementos de fácil adquisición con la finalidad de entender cómo puede llegar a ser usado en hogares y zonas urbanas. Durante su desarrollo se logró realizar un prototipo eficaz de limpiar el aire con elementos y materiales de bajo costo.

Se construyó un equipo cuya fuente de alimentación era un flyback, el cual es un convertidor DC a DC con aislamiento galvánico entre entrada y salida que es capaz de almacenar toda la energía en el núcleo magnético y manejar un voltaje de salida de 27000 voltios. La fuente contaminante era la quema de materiales como la madera, carbón, papel y cigarrillos, ya que la polución de estos es la más común en cualquier lugar del mundo incluyendo hogares e industrias. El Diseño del Precipitador se basó en uno tipo industrial que es de placas planas con medidas de 20 cm x 11 cm x 0.4 cm, estas placas son de cobre y se encuentran ubicadas en parejas excepto por placas externas y las cargas de las placas son intercaladas de negativo a positivo haciendo que las placas con carga negativa sean las de los extremos. El modelo y la distancia entre las placas se basó tanto en el campo eléctrico que crean como en la frecuencia de las descargas entre las placas, con base a esto llevaran a cabo un modelo que se podrá visualizar en la Figura 1.

Ilustración 1. Caja de placas



Fuente: Autores del artículo

En esta estructura ubicaron sensores de gases que median el porcentaje del contaminante que se encuentra en este espacio. Para lograr obtener resultados experimentales que les permitiera validar la utilidad del precipitador requirieron del diseño de un sistema de instrumentación que fue implementado por medio de un Arduino y unos sensores que funcionan como medidores del porcentaje de partículas en la entrada y salida del sistema. Con esto lograron concluir que el modelo de placas planas diseñado para el precipitador electrostático se puede aplicar en contaminantes como el humo, las cenizas que produce la quema de carbón, papel, cigarrillos y madera; y lograron resaltar que a mayor cantidad de voltaje aplicado en las placas generaba mayor atracción de partículas incluso de las partículas más pequeñas. [5]

La publicación de los investigadores S.H. Kim, H.S Park, K.W. Lee, se basó en un modelo teórico de un precipitador electrostático para la predicción del desempeño de un precipitador electrostático (ESP) para la recolección de partículas polidispersas. La polidispersión de las partículas fue representada por una función logarítmica normal y luego el método estadístico de movimientos para obtener un conjunto de las ecuaciones de 3 momentos. El estudio se basó en 7 supuestos básicos principales, los cuales se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelo los supuestos son los siguientes:

1. El sistema está en estado de funcionamiento permanente.
2. La resistividad eléctrica de las partículas no se considera en este modelo.
3. Los efectos no ideales tales como la fuga y el reentrenamiento de rap no son relevantes.
4. El flujo es un flujo con una velocidad uniforme.
5. La distribución del tamaño de las partículas se conserva como una función logarítmica normal en todo el precipitador, aunque el número total, la desviación estándar geométrica y el radio de las partículas puede variar.
6. La movilidad de la partícula cargada es constante.
7. Se ignora la fluctuación de la fuerza eléctrica y el efecto de la carga de la partícula.

En cuanto a los resultados obtenidos la SCA denota la superficie de recolección específica definida como la proporción del área de recolección total a el caudal volumétrico de gas total $SCA = 2X/U_{av}W$, donde X es distancia longitudinal de la entrada, U_{av} es la velocidad media del flujo y W es la anchura entre dos placas de recogida; por tanto el número de SCA que se obtiene muestra la longitud a considerar del precipitador, demostrando que la distribución de las partículas permanece sin una desviación significativa. En esta investigación se pretendió lograr un modelo que permita predecir el cambio continuo de la distribución del tamaño de las diferentes partículas que puedan implementarse en un precipitador electrostático, siendo esta una ventaja ya que permite la predicción tanto de la masa total y como de las eficiencias de remoción de las mismas partículas; Sin embargo se debe reconocer que este tipo de predicciones que se obtienen con este modelo operan bajo condiciones de flujo electrodinámico e hidrodinámico bajos y requieren de datos más certeros para la validación del presente modelo antes de su aplicación a la práctica. [6]

Durante la investigación en la que cuyos autores fueron Ye Zhuang, Yong Jin Kim, Tai gyu lee, Pratim Biswas, que hace referencia al estudio del comportamiento de las partículas ultrafinas en los precipitadores electrostáticos. Se llevó a cabo un

procedimiento con la utilización de un aerosol de ensayo el cual se generó por atomización de una solución salina (NaCl) y una suspensión de partículas insolubles (Al₂O₃) en un atomizador (TSI modelo 3076) seguido de un secado por difusión. Además, se utilizó un proceso de combustión para generar un aerosol de sílice por oxidación a altas temperaturas de hexametildisiloxano. Los aerosoles submicrométricos generados se mezclaron con aire libre de partículas (para obtener los caudales deseados) y se introdujeron en un precipitador electrostático cilíndrico (ESP). La concentración de aerosoles de entrada fue del orden de $10^{10} \# / m^3$ con un diámetro geométrico medio de 0,25 μm y se mantuvieron a temperatura ambiente (21-25 ° C) y una humedad de (10-15%).

El precipitador consistió en un cilindro exterior de acero inoxidable con 30 mm de diámetro y 150 mm de longitud aislados con Teflón y un hilo de electrodo de descarga central (0,3 y 0,5 mm de diámetro). El ESP fue operado en dos etapas diferentes en donde la primera contaba con una corona y una colección en la misma zona y la segunda que consistía en dos etapas (una zona corona seguida por una zona de recolección sin corona). Se utilizó una fuente de alimentación de alta tensión para aplicar una carga negativa (0-10 kV) al electrodo central, y el cilindro fue puesto a tierra. Se conectó un microamperímetro y una sonda de alto voltaje al ESP para medir la corriente corona y la tensión aplicada, también se utilizó un neutralizador (Kr-85) junto con un contador de partículas de condensación diferencial (TSI modelo 3934) para medir las distribuciones de tamaño de aerosol aguas arriba y aguas abajo en el ESP.

De los estudios experimentales y teóricos que se llevaron a cabo al investigar la captura de partículas submicrométricas (0.05-0.5 μm de diámetro) en un precipitador electrostático a escala de laboratorio, se observó una disminución de la corriente corona debido a una reducción en las emisiones de los iones. Es decir, las partículas con menor resistividad eléctrica adquirieron una menor eficiencia de recolección para los diferentes tipos de partículas (NaCl, Al₂O₃ y SiO₂), esto quiere

decir que a menor diámetro de las partículas más difícil será alcanzar un rango alto de eficiencia de remoción de esta. [7]

En la investigación realizada por Gediminas Mainelis, Klaus Willeke, Atin Adhikari, Tiina Reponen, and Sergey A. Grinshpun, acerca del diseño y eficiencia de la recolección de bioaerosol en un precipitador electrostático. Se llevaron a cabo ensayos con partículas de NaCl y células vegetativas en donde se demostró que este tipo de organismos se recogen de manera más eficaz que las partículas de NaCl esta diferencia se atribuyó a las cargas naturales contenidas en las membranas celulares o capas de esporas de los microorganismos. En este proyecto se llevó a cabo el diseño de un precipitador electrostático con el objetivo principal de la recolección de bioaerosol, su diseño consistió en 3 componentes independientes: la sección de carga, las placas con un medio de recogida y la sección de precipitación.

Esta investigación demostró que el diseño y construcción de un precipitador electrostáticos es capaz de captar eficientemente organismos incluso después de su neutralización de carga eléctrica con una fuente radiactiva Kr-85. Es relevante tener en cuenta que una pequeña ionización en la entrada del precipitador aumenta la eficiencia de recolección en un 80-90% para partículas biológicas y no biológicas y que en cuanto a la eficiencia de recolección del precipitador esta se puede determinar midiendo la partícula aguas arriba y aguas abajo del muestreador con un sensor u otro dispositivo. [8]

Julián Gelis Orta, Gustavo Guerrero y Raúl Narvárez Sáenz en su investigación acerca de los principios para el modelamiento de precipitadores electrostáticos de solidos llevo a cabo la presentación de un modelo matemático de la intensidad de campo eléctrico, la densidad de carga espacial, el potencial eléctrico y la capacitancia en un precipitador electrostático, describieron los principales problemas asociados a la operación y el funcionamiento de los precipitadores

electrostáticos y algunas técnicas de solución para estos problemas con Comsol multiphysics la cual hace una simulación de la geometría básica de un precipitador electrostático sometido a tensión, los resultados obtenidos en la simulación mostraron como afecta la intensidad de campo eléctrico a diferentes niveles de tensión como variable fundamental en la recolección de partículas suspendidas en corrientes de gas.

El enfoque de los diseños de un precipitador electrostático de sólidos propuesto por los señores Julián Gelis, Gustavo Guerrero y Raúl Narváez pretende reducir la cantidad de material particulado en los gases de combustión en diferentes unidades de proceso, esperando una reducción de las emisiones de material particulado del 70% como mínimo; lograron resaltar durante las pruebas que el punto de operación eléctrico de una sección del precipitador es el valor del voltaje y la corriente a la cual opera concluyéndose que la mejor recolección ocurre cuando el campo eléctrico es mayor, lo cual corresponde aproximadamente al voltaje más alto en los electrodos, el término sección es representación de un conjunto de placas y electrodos en la dirección del flujo. Este trabajo de investigación describió las ecuaciones básicas utilizadas para modelar las variables operacionales de un precipitador electrostático de sólidos ideal y concluyo que el precipitador es extraordinariamente útil para retirar partículas presentes en los gases de escape en los diferentes procesos de producción en la industria, chimeneas de caldera en centrales termoeléctricas, industrias del cemento, plantas de craqueo catalítico y hornos en las refinerías. La eficiencia de recolección es del 99% siendo esta una solución muy atractiva de manejo y control ambiental de emisiones para diferentes industrias.

En la simulación realizada en esta investigación se modeló en la geometría el campo eléctrico y la distribución eléctrica potencial de los alambres a las placas colectoras del precipitador electrostático, concluyéndose que entre mayor es el voltaje aplicado mayor es la intensidad del campo eléctrico según los resultados obtenidos cuando se aplica alta tensión en los alambres, el campo eléctrico cerca del alambre se hace

muy fuerte y comienza a disminuir en su valor al alejarse localmente de los alambres hacia las placas colectoras, similar al potencial eléctrico el cual es muy alto cerca de los alambres y disminuye al incrementar la distancia desde el alambre y es cero en las placas puesto que las placas están conectadas a tierra.[9]

b. Antecedentes del proyecto

Este proyecto hace parte del proyecto de investigación con código de la DIT: II-FO-036 cuyo objeto es la “Implementación de un precipitador electrostático a escala piloto para el laboratorio de aire de la Universidad Pontificia bolivariana Seccional Bucaramanga”, aprobado dentro de la convocatoria UPB innova del año 2018 y con fecha de inicio Julio de 2018, para la adquisición de los demás fondos monetarios, también es financiado por la empresa FABRIFEED contribuyendo con un monto económico que cubrirá los gastos referentes a diseños, la construcción de la carcasa, el tablero eléctrico de control, la adecuación de circuitos de potencia eléctrica y el personal calificado para su desarrollo e implementación.

El presente proyecto se basa en el diseño de un sistema de control de material particulado a escala de laboratorio en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga con fines académicos, mediante el análisis y estudio de la funcionalidad y optimización de este equipo. Se busca lograr el diseño de un precipitador electrostático a escala de laboratorio de fácil operación, flexible y que permita visualizar el fenómeno de remoción de las partículas por acción de la fuerza electrostática.

El precipitador diseñado es de tipo tubular el cual tiene aplicaciones típicas en plantas de adición de ácido sulfúrico, limpieza del gas subproducto de los hornos de coque (remoción de alquitrán), plantas de sinterización de hierro y acero, cementeras, termoeléctricas y demás industrias. Consiste en varios tubos operando en paralelo para manejar mayores flujos de gas. Los tubos se encuentran puestos sobre una base matriz y tienen forma de panal con el gas fluyendo hacia arriba o

hacia abajo, tienen un diámetro nominal de 2" y su longitud aproximada de 0.4 metros todo en acero inoxidable, además contiene un montaje de portaelectrodos con tubos de 1" de acero inoxidable para cada uno de los cilindros los cuales realizarán la labor de que cuando el gas pase a través de la región del electrodo, este se encuentre operando con un alto voltaje en toda su longitud y la corriente variando a lo largo de su longitud a medida que las partículas van siendo removidas del sistema. En este sistema no hay rutas de escabullimiento alrededor de la región de recolección, pero las deformidades de la corona pueden permitir que algunas partículas eviten cargarse en una fracción considerable de la longitud del tubo.

El precipitador electrostático permite el control de partículas usando fuerzas electrostáticas para moverlas fuera de la corriente de gas, a las partículas se les da una carga eléctrica forzándolas a que pasen a través de una corona, la cual es una región donde fluyen iones gaseosos, se crea un campo eléctrico que fuerza a las partículas cargadas hacia las paredes de los cilindros, la cual proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo, una vez que las partículas son recolectadas, deben ser removidas de los cilindros sin que se reencaucen en la corriente de gas. Esto se logra usualmente desprendiéndolas de las paredes permitiendo así que la capa de partículas recolectadas se deslice hacia una tolva o zona donde son evacuadas. [10]

4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos que tienen como función obtener la mejor eficiencia de recolección de material particulado (PM), pero vale la pena resaltar que para ello se necesita conocer la operación del dispositivo y aplicarle un adecuado mantenimiento para que trabaje a condiciones óptimas.

Se tiene como objetivo principal, diseñar un equipo que logre un control del material particulado emitido por una fuente en este caso una cámara de humo, colectando

con un alto grado de eficiencia la mayor parte las emisiones de partículas generadas, lo cual simulará las emisiones producidas en industrias mineras, centrales térmicas, cementeras, industrias petroquímicas y demás, proporcionando una mejora en el desarrollo de los procesos industriales que serán de gran aplicación debido a la evolución de la normativa ambiental vigente. Esta es la razón fundamental por la cual nace la tesis “PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO A ESCALA PILOTO PARA EL LABORATORIO DE AIRE DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA”, en donde se busca por primera vez realizar un diseño de este tipo de equipos en la Universidad Pontificia Bolivariana con fines didácticos para los futuros estudiantes de la facultad de ingenierías, incentivando a trabajar en pro de mejorar la calidad del aire, el ambiente y la vida misma de las personas.

El proyecto de grado se justifica bajo el hecho de ser innovador puesto que al ser un equipo que usualmente mantiene dimensiones exorbitantes como la de una edificación, en este caso se diseñara bajo condiciones de operación apropiadas para la correcta implementación de la técnica de remoción de partículas con fuerza electrostática, dimensionando el precipitador electrostático a una escala piloto para el laboratorio de aire de la Universidad. Por otro lado, este proyecto adquiere una importancia investigativa para la universidad, la ciudad y a nivel nacional, puesto que busca que sea un inicio a futuros estudios de control de Material particulado (PM) en la universidad y la ciudad misma.

5. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General.

- Diseñar un precipitador electrostático a escala piloto para el laboratorio de aire de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

1.2. Objetivos Específicos.

- Especificar condiciones de operación y diseño apropiadas para la correcta implementación de la técnica de remoción de partículas con fuerza electrostática.
- Dimensionar el precipitador electrostático a escala piloto con fines didácticos.
- Estructurar pruebas experimentales útiles para docencia

6. MARCO TEORICO

A. MATERIAL PARTICULADO FINO

El material particulado fino, o PM2.5 se define como el conjunto de partículas respirables sólidas y/o líquidas en suspensión con diámetros aerodinámicos menores a 2.5 micrómetros. A comparación de las partículas gruesas (diámetros mayores a 10 micras), el PM2.5 tiene mayor tiempo de residencia y afecta significativamente la visibilidad y el cambio climático, además de la salud de las personas. Tanto las propiedades ópticas de los aerosoles, como los efectos sobre la salud y el medio ambiente, dependen de la caracterización fisicoquímica de la partícula, que a su vez depende de la fuente emisora del contaminante^[11].

I. Composición química

Conocer la composición química del PM2.5 es de vital importancia para determinar los impactos e identificar las fuentes principales de este tipo de contaminante. Para esto se utilizan diferentes tipos de instrumentos de medición, desde la etapa de recolección de muestras, hasta lograr la caracterización de la partícula. Múltiples estudios se han llevado a cabo en diferentes sectores y ciudades del mundo para establecer los componentes que generalmente contiene el PM2.5, los cuales son^[12]:

Elementos inorgánicos

La composición elemental del PM2.5 normalmente contiene metales pesados como As y Sb, los cuales son tóxicos para el ser humano, aún en concentraciones bajas [13]. La caracterización típica de metales pesados en el PM2.5 contiene: Cl, Ca, Na, Fe, Al, Mg, Mn, Ba, Br, Ba, Sb, Ni, Cr, entre otros.

B. MATERIAL PARTICULADO GRUESO

se pueden definir como aquellas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento ó polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro varía entre 2,5 y 10 µm (1 micrómetro corresponde la milésima parte de 1 milímetro). La exposición prolongada o repetitiva a las PM10 puede provocar efectos nocivos en el sistema respiratorio de la persona, no obstante, son menos perjudiciales que las PM2,5 ya que, al tener un mayor tamaño, no logran atravesar los alveolos pulmonares, quedando retenidas en la mucosa que recubre las vías respiratorias superiores. La Directiva 2008/50/CE indica que para la protección de la salud no pueden superarse los 50 microgramos por metro cúbico durante 24 horas más de 35 veces por año civil.

I. Composición química

Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono (hollín). Se caracterizan por poseer un pH básico debido a la combustión no controlada de materiales.

Fuentes de emisión y aplicaciones de las PM10

Las fuentes de emisión de estas partículas pueden ser móviles ó estacionarias, destacando que un 77,9% de la cantidad total emitida de PM10 procede del polvo resuspendido existente en la atmósfera. La industria, la construcción y el comercio con un 7,6% y el transporte rodado con un 6,5% representan otros focos de

contaminación de especial relevancia. Como fuentes minoritarias de contaminación es importante señalar que el 3,7% del total procede de quemas agrícola y un 3,3% es de origen doméstico. [14]

C. TEORÍA DE LA PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA

La teoría de la operación del PE (Precipitador electrostático) requiere de muchas disciplinas científicas para describirla completamente. El PE es básicamente una máquina eléctrica, para la cual sus principales acciones son cargar eléctricamente las partículas y forzarlas hacia las paredes recolectoras. La cantidad de materia particulada cargada afecta al punto de operación eléctrico del precipitador

El transporte de las partículas se afecta por el nivel de turbulencia en el gas. Las pérdidas mencionadas anteriormente, el escabullimiento y el reencauzamiento por el golpeteo, son las principales influencias en el comportamiento total del sistema. Las propiedades de partícula también causan un efecto importante en la operación de la unidad.

Las siguientes subsecciones explicarán matemáticamente el proceso de precipitación electrostática de la siguiente manera:

- I. Punto de operación eléctrico en el PE.
- II. Proceso de cargado de partículas.

- I. Punto de operación eléctrico:

El punto de operación eléctrico de una sección de precipitador electrostático es el valor del voltaje y la corriente al cual opera la sección. Tal y como podría ser, la mejor recolección ocurre cuando está presente el mayor campo eléctrico, lo cual corresponde aproximadamente con el voltaje más alto en los electrodos. En este

trabajo, el término “sección” representa un conjunto de tubos y electrodos en la dirección del flujo.

Esta unidad es comúnmente llamada un “campo” o “sección conductora” y representa una subdivisión de un “campo” perpendicular a la dirección del flujo. En un precipitador electrostático modelo y en aplicaciones para determinar el tamaño, los dos términos “sección” y “campo” son utilizados equivalentemente porque la subdivisión en secciones conductoras no debe tener efecto en el modelo. Esta terminología probablemente ha surgido debido al uso frecuente de la palabra “campo” para referirse al campo eléctrico.

El voltaje más bajo aceptable es el voltaje requerido para la formación de la corona, la descarga eléctrica que produce iones para cargar las partículas. La corona (negativa) se produce cuando un electrón libre ocasional cerca del electrodo a alto voltaje, producido por un rayo cósmico, gana suficiente energía del campo eléctrico para ionizar al gas y producir más electrones libres.

El campo eléctrico por el cual este proceso se auto-sostiene, ha sido determinado experimentalmente. Para alambres redondos, el campo en la superficie del alambre está dado por:

$$E_c = 3.126 \times 10^6 * dr \left[1 + 0.0301 \left(\frac{dr}{rw} \right)^{0.5} \right]$$

Donde:

E_c = campo de formación de la corona en la superficie del alambre (V/m)

dr = densidad relativa del gas, referido a 1 atm. de presión y 20°C (adimensional)

rw = radio del alambre, metros (m)

Este es el campo requerido para producir una corona “resplandeciente”, la forma usualmente vista en el laboratorio sobre electrodos lisos y limpios. El resplandor aparece como una luz difusa, uniforme y moviéndose rápidamente alrededor del

electrodo. Después de un período de operación, el movimiento se concentra en pequeños puntos sobre la superficie del electrodo y la corona adquiere una apariencia como de penacho. El campo para producir la corona en “penacho”, la forma encontrada en PE’s a escala completa es de 0.6 veces el valor de E_c .

El voltaje que debe aplicarse al electrodo para obtener este valor de campo V_c , se encuentra integrando el campo eléctrico desde el electrodo hasta la placa. El campo sigue una dependencia simple de “1/r” en geometría cilíndrica. Esto lleva a una dependencia logarítmica del voltaje en las dimensiones del electrodo. En la geometría placa-electrodo, la dependencia del campo es algo más compleja, pero el voltaje aún muestra la dependencia logarítmica. V_c que está dado por:

$$V_c = E_c * r_w * \ln\left[\frac{d}{r_w}\right]$$

Donde:

V_c = voltaje de formación de la corona (V)

d = radio del cilindro exterior para PE tubular (m) $4/B \times$ (separación placa-electrodo)
para PE de placa-electrodo (m)

II. Proceso de cargado de partículas:

El cargado de las partículas toma lugar cuando los iones bombardean la superficie de una partícula. Una vez que un ión está cerca de la partícula, es ligado fuertemente debido a la carga imagen en la partícula. La “carga imagen” es una representación de la distorsión de la carga que ocurre cuando una carga real se aproxima a una superficie conductora. La distorsión es equivalente a una carga de magnitud opuesta a la carga real, localizada tan abajo de la superficie porque la carga real está por encima de ella. La noción de una carga ficticia es similar a la noción de una imagen en el espejo, de ahí el nombre de carga imagen. A medida

que más iones se acumulan sobre la partícula, la carga total tiende a prevenir más bombardeo iónico.

Hay dos mecanismos de carga principales: carga por difusión y carga por campo. La carga por difusión resulta de la energía cinética térmica de los iones venciendo la repulsión de los iones que ya están sobre en la partícula. La carga por campo ocurre cuando los iones siguen las líneas del campo eléctrico hasta que terminan sobre una partícula. En general, ambos mecanismos operan para todos los tamaños de partículas. La carga por campo, sin embargo, agrega un porcentaje más grande de carga de partículas mayores de cerca de $2\mu\text{m}$ en diámetro, y la carga por difusión agrega un porcentaje mayor de partículas menores a acerca de $0.5\mu\text{m}$. [15]

D. CORRIENTE CONTINUA Y CORRIENTE ALTERNA

La electricidad es un tipo de energía transmitida por el movimiento de electrones a través de un material conductor que permite el flujo de electrones en su interior. La capacidad conductora se representa a través de la conductancia eléctrica, que en el Sistema Internacional se mide en siemens (S). Dentro del material conductor, los electrones se pueden mover en un solo sentido o alternar dos sentidos, en función de lo cual se pueden distinguir dos tipos de corriente:

Corriente continua (DC): el flujo de corriente eléctrica se da en un solo sentido.

Corriente alterna (AC): el flujo eléctrico se da en dos sentidos.

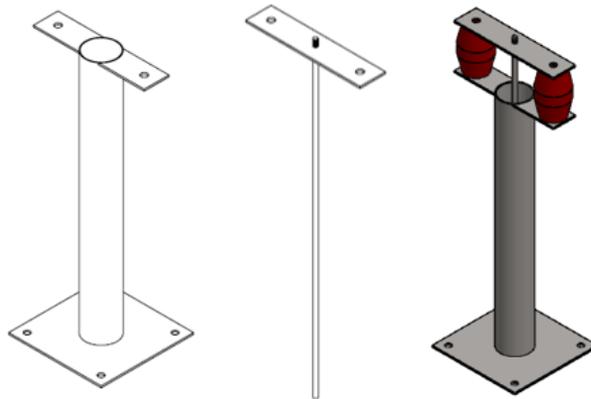
Para lograr el voltaje necesario para el correcto funcionamiento de un precipitador electrostático se requiere de una fuente de alimentación que este regulada y ensamblada para convertir un alto voltaje de corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). En este proceso se convierte la primera variable de voltaje de AC a un pulso de corriente continua DC. Luego dicha corriente continua pulsada es suavizada y regulada para obtener una salida de corriente continua fija (DC).

7. METODOLOGIA

I. Prototipo de ensayo:

Se construyo un prototipo de ensayo cilíndrico con una longitud de 400mm, con diámetro de 2", en acero inoxidable. Este contiene una tapa o base matriz en lamina de acero inoxidable con calibre 14 (2mm), un electrodo compuesto por una varilla lisa de 1/4" con una longitud de 495 mm en acero inoxidable además de dos aisladores de teflón los cuales cumplen la función de mantener el circuito aislado de tierra y de otros conductores.

Ilustración 2. Diseño de prototipo de ensayo (Cilindro, base matriz, tapa, electrodo y aisladores.)



Fuente: Autora 2019

Se realizó la revisión bibliográfica acerca de otros estudios o artículos científicos similares que permitieron fortalecer los conocimientos ya obtenidos e implementar estrategias para llevar a cabo un buen diseño del equipo.

Para pasar al diseño ingenieril del equipo se establecieron los factores más importantes del mismo con los cuales se logró llevar a cabo su correcto funcionamiento, factores tales como: Materiales, determinación de la eficiencia de recolección deseada (de manera cualitativa), voltaje, equipos y condiciones de operación. Esto se definió a partir de pruebas de laboratorio con el tubo de ensayo sobre el cual se definió el tamaño, diámetro, voltaje requerido y se corroboró así a su vez la efectividad del principio electrostático.

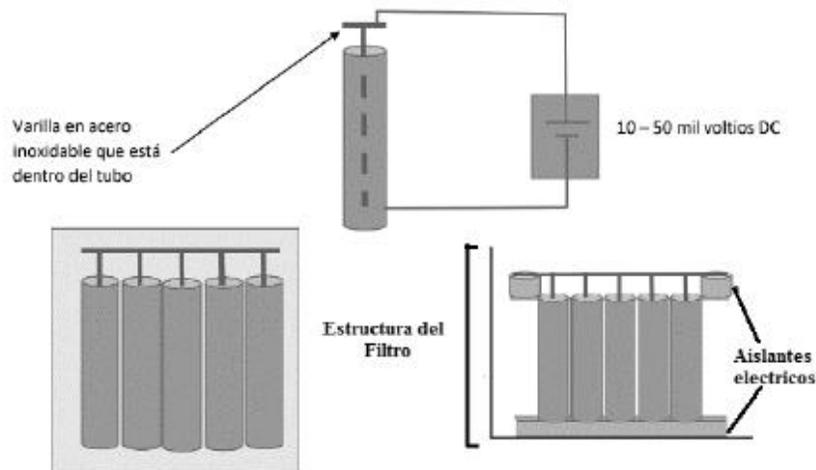
MATERIALES

Acero inoxidable: este tipo de material es una aleación de hierro y carbono, se escogió este tipo de material puesto que es un tipo de acero que es resistente a la corrosión, tiene gran afinidad con el oxígeno y al ser el precipitador electrostático un equipo que para lograr una óptima eficiencia de remoción de partículas depende de los altos voltajes que se logren para la carga de las partículas requiriendo así de un material con buena conductividad eléctrica (76 Ohmios/ por cm) el cual solo baste unir con una toma a tierra que permita dejar la carcasa externa del equipo con una carga totalmente neutra, disminuyendo todo tipo de riesgo para los usuarios del equipo y no perjudicando de ninguna manera su eficiencia.

VOLTAJE, EQUIPOS Y CONDICIONES DE OPERACIÓN

El montaje está compuesto por el campo eléctrico y los tubos donde este se encuentra, los tubos estarán inmersos en un campo eléctrico de alto voltaje DC. En la siguiente figura se muestra como los tubos estarán sometidos al campo eléctrico. Los tubos al igual que la estructura estarán hechos de acero inoxidable y tendrán unas proporciones de 40 cm de altura por un diámetro de 2.5 pulgadas.

Ilustración 3. Estructura interna del filtro electrostático y su sistema de eléctrico



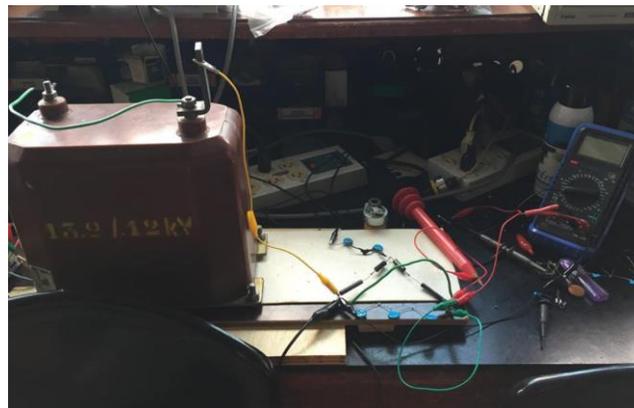
Se tendrán entonces dos electrodos el primero estará cargado positivamente y estará ubicado como una varilla dentro de cada tubo (en total serán 25 tubos) y el

otro electrodo se ubicará sobre la superficie del tubo y estará cargado negativamente. Para soportar los electrodos se usarán unas piezas cilíndricas que también cumplirán la función de aislante, están elaboradas en torno en material teflón.

Para lograr el alto voltaje se utilizará:



Ilustración 4. Montaje eléctrico



Fuente: Autora 2019

Se llevó a cabo la construcción de un montaje de alto voltaje el cual consta de un circuito que comienza con un transformador que eleva o reduce la tensión alterna entrante (AC) según sea necesario. A la salida del transformador se añadió un rectificador el cual se encargó de convertir la corriente alterna en corriente pulsada. Un puente rectificador con cuatro diodos el cual convierte la tensión alterna en tensión continua (positivo y negativo). Se suavizó la salida de DC con un condensador eléctrico para que la tensión DC varié lo menos posible. El condensador se carga y descarga continuamente con los picos de la tensión de DC pulsada, produciendo en la salida una tensión de DC atenuada. Se eliminó dicha atenuación de la corriente continua (DC) mediante la colocación de un regulador de tensión para establecer la salida de tensión de DC deseada.

La tensión de entrada de DC resulto siendo unos voltios mayores que la tensión de salida deseada puesto que se buscaba omitir fluctuaciones causadas por la atenuación. Este montaje nos permitió corroborar que alcanzando un voltaje aproximado de 10.000 diez mil voltios se obtuvieron resultados cualitativos muy satisfactorios respecto a lo que corresponde a corroborar el principio electrostático funciona.

Ilustración 5. Generación de gas antes de la aplicación del voltaje



Fuente: Autora 2019

Se utilizo una maquina de humo la cual es un aparato que genera un vapor denso cuyo aspecto se asemeja al del humo o la niebla, el humo que se genera es vaporizando agua mezclada con un fluido basado en el Glicol o el glicerol, el cual es un liquido muy usado y conocido como glicerina. Para generar este humo se inyectó el fluido sobre una base caliente que logro que se evapore rápidamente, y cuando el vapor resultante entra en contacto con el aire exterior frio genera una niebla artificial. La glicerina ($C_3H_8O_3$) Se presenta en forma de líquido a una temperatura ambiental de $25^{\circ}C$ y es higroscópico e incoloro. Posee un coeficiente de viscosidad alto y tiene un sabor dulce como otros polialcoholes.

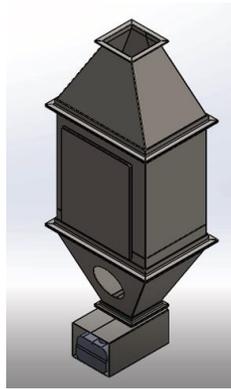
II. Diseño básico:

Con base a los estudios obtenidos por las pruebas realizadas, se continuo con el diseño básico e ingenieril del precipitador electrostático a escala de laboratorio en donde se aplicaron los diferentes factores definidos en el prototipo de ensayo tales

como: dimensiones del equipo, materiales utilizados, funcionamiento, principio básico del equipo y demás. A su vez también se identificación de las tres etapas fundamentales del proceso de precipitación:

- I. Carga electrostática de las partículas
- II. Recolección de partículas
- III. Evacuación del material recolectado

Ilustración 6. Diseño ingenieril de precipitador electrostatico a escala de laboratorio.



Fuente: Autora 2019

IV. Estructuración de pruebas experimentales útiles para la docencia.

Se estructuraron pruebas de desempeño las cuales se enfocan en la medición de concentraciones iniciales que entran al precipitador electrostático Vs las concentraciones finales que salen del equipo luego de exponerse a la fuerza electrostática de manera cuantitativa por medio de sensores de opacidad y de manera cualitativa donde visualmente se demuestra la disminución del material contaminante a la salida del equipo. Este tipo de pruebas se estructuraron con el fin de rectificar el correcto funcionamiento del equipo en el laboratorio de aire de la Universidad Pontifica Bolivariana.

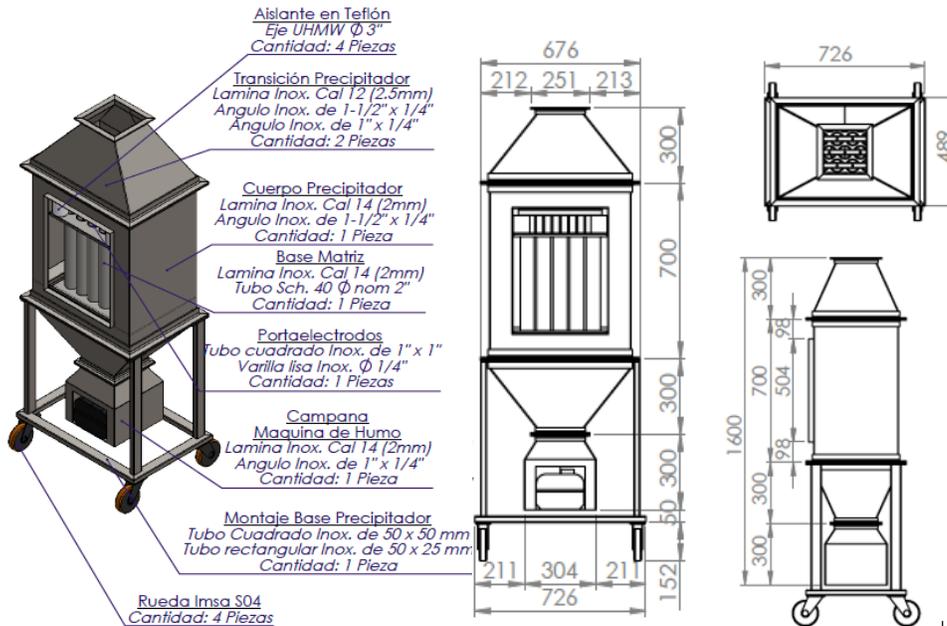
8. RESULTADOS

a. Resultados obtenidos

III. Diseño básico:

Basado en las pruebas realizadas con el prototipo de ensayo, se definieron los siguientes aspectos para el diseño del prototipo a escala piloto:

Ilustración 7. Dimensiones y características generales de prototipo a escala piloto



Fuente: Autora 2019

Se aplicó un voltaje aproximado de 10 mil a 13 mil voltios los cuales nos permitieron evidenciar la efectividad de una manera cualitativa del principio electrostático en el prototipo de ensayo, cargando las partículas y reduciendo la salida del humo al exterior del tubo de ensayo tal y como se puede evidenciar a continuación:

Ilustración 8. Aplicación de alto voltaje



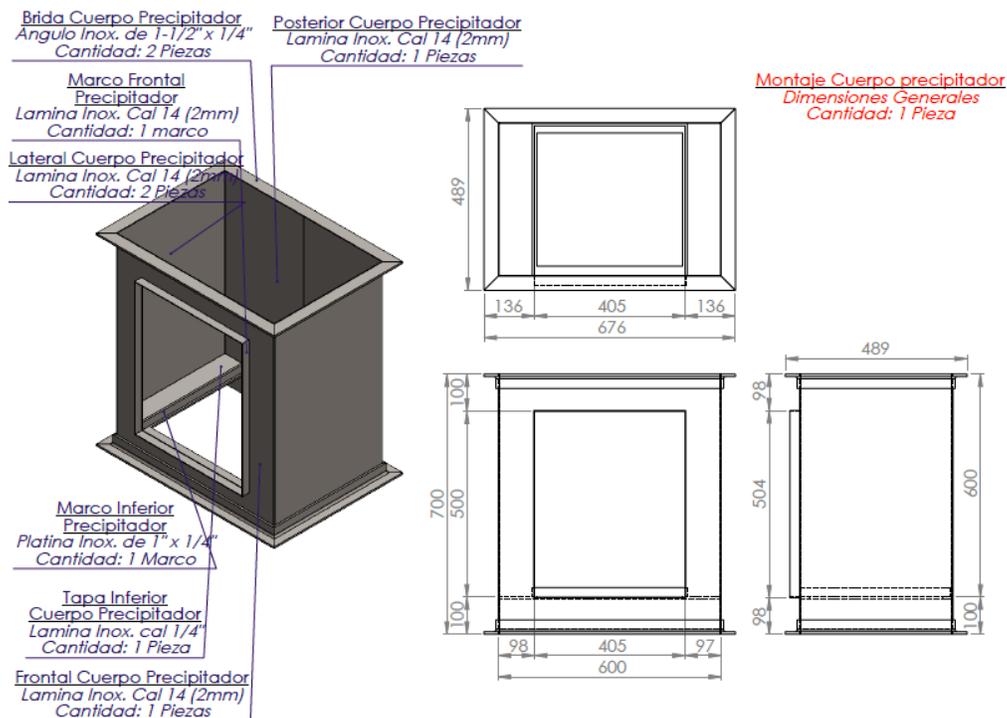
Fuente: Autora 2019

El precipitador electrostático diseñado se compone principalmente de las siguientes partes:

A. CUERPO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

Su material es en lamina de acero inoxidable de calibre 14 (2mm) principalmente contiene un marco frontal, otro lateral, uno posterior e inferior, los cuales serán los portadores o contendrán en su interior la base matriz que será mostrada posteriormente. Este cuerpo deberá ir conectado a un polo a tierra permitiendo así que el exterior del equipo este libre de toda carga evitando así riesgos de algún tipo en la salud de los estudiantes y/o personal involucrado.

Ilustración 9. Montaje cuerpo del precipitador electrostático.

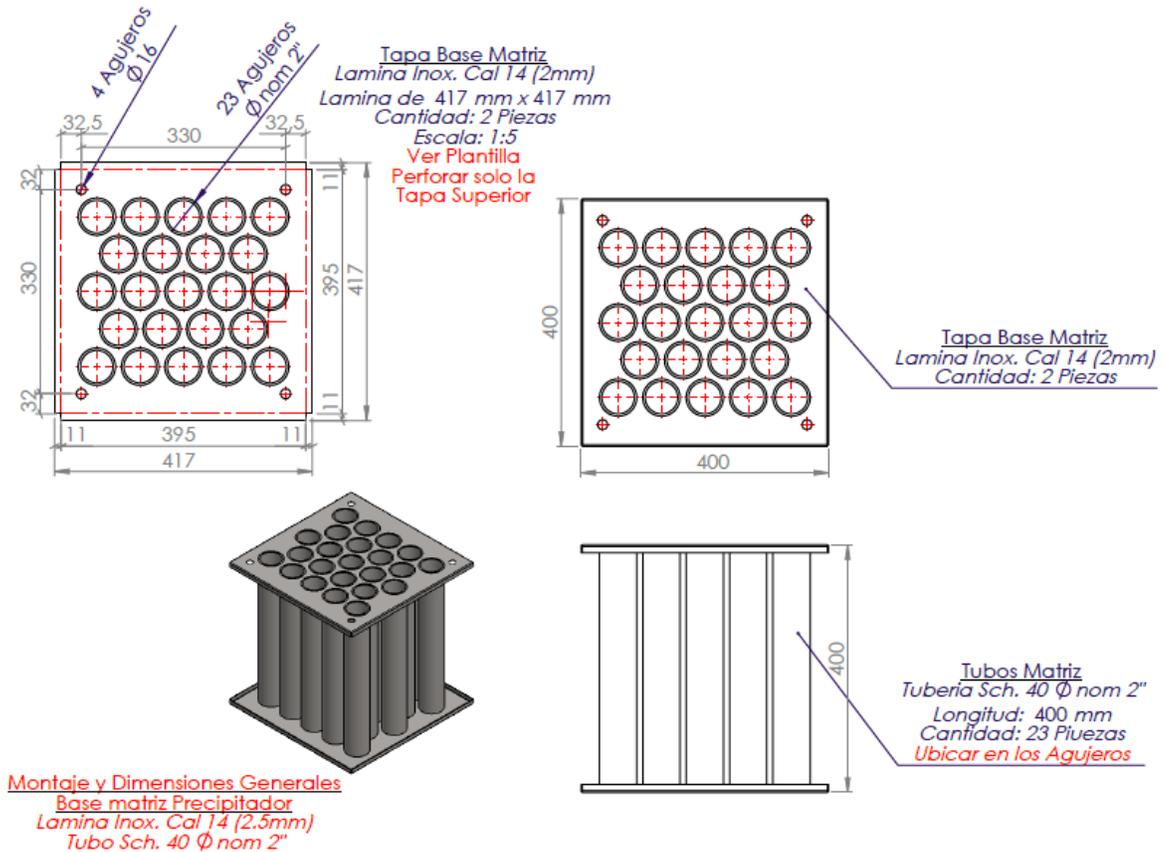


Fuente: Autora 2019

B. BASE MATRIZ DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

Su material es en lamina de acero inoxidable de calibre 14 (2mm) con dimensiones de 417mmx417mm compuesta por dos piezas, esta base matriz contiene 23 tubos localizados en forma de panel logrando que el gas vaya fluyendo hacia arriba, los tubos presentan un diámetro nominal de 2" y su longitud aproximada de 400 mm todo en acero inoxidable tal y como se puede apreciar a continuación:

Ilustración 10. Montaje y dimensiones generales de base matriz para precipitador electrostático

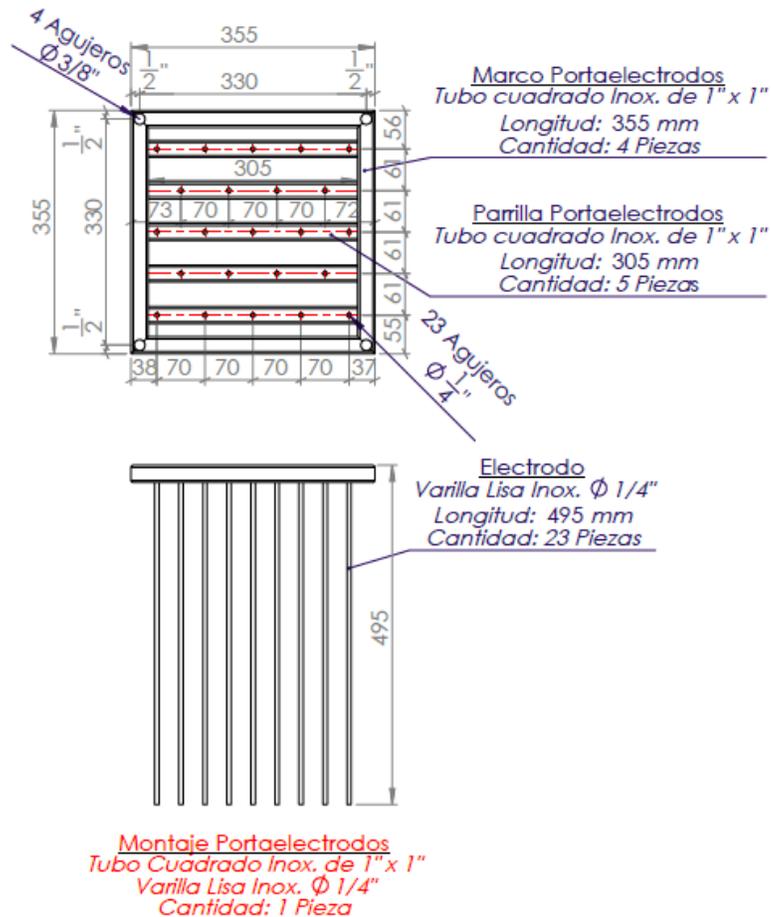


Fuente: Autora 2019

C. PORTAELECTRODOS DEL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

Contiene un montaje de portaelectrodos con varillas lisas de 1/4" y una longitud de 495 mm acero inoxidable para cada uno de los cilindros, estos portaelectrodos realizaran la labor de cuando el gas pase a través de la región del electrodo, este se encuentre operando con un alto voltaje en toda su longitud a medida que las partículas van siendo cargadas y quedando adheridas a las paredes de cada uno de los cilindros, evitando así su salida por la parte superior del equipo proporcionando un aire más puro y limpio. El portaelectrodos va sujeto a un marco compuesto por un tubo cuadrado de 1" con una longitud de 355 mm y una parrilla de 1" con una longitud de 305 mm, tal y como se puede visualizar a continuación:

Ilustración 11. Montaje de portaelectrodos para precipitador electrostático



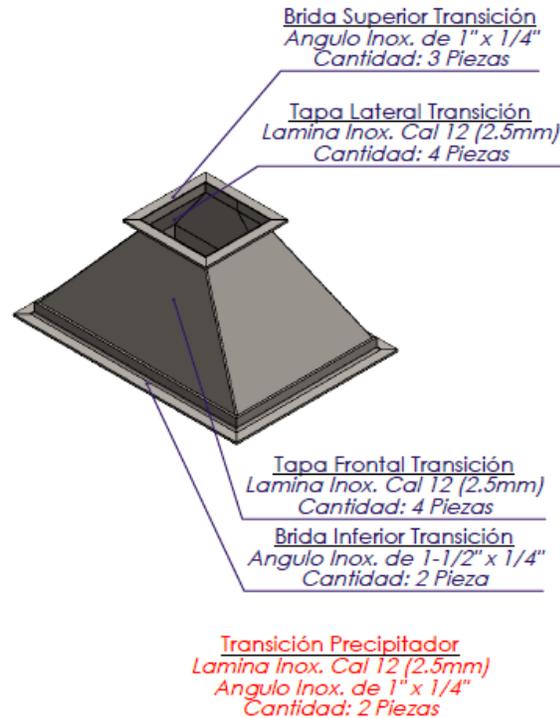
Fuente: Autora 2019

D. TRANSICIÓN DEL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

Se compone de una brida superior e inferior y unas tapas laterales, frontales y traseras, en acero inoxidable. La transición que se ubicará en la parte superior del equipo permitirá visualizar la salida del humo y material particulado antes de ser aplicado el alto voltaje, además de que luego de ser cargadas las partículas por el portaelectrodos, en esta transición se podrá visualizar la efectividad de la remoción del humo gracias al principio electrostático. La transición ubicada en la parte inferior será la responsable de la captación de todo el humo generado por la maquina y

material particulado que será inducido hacia la base matriz del precipitador electrostático.

Ilustración 12. Diseño de zona de transición precipitador electrostático

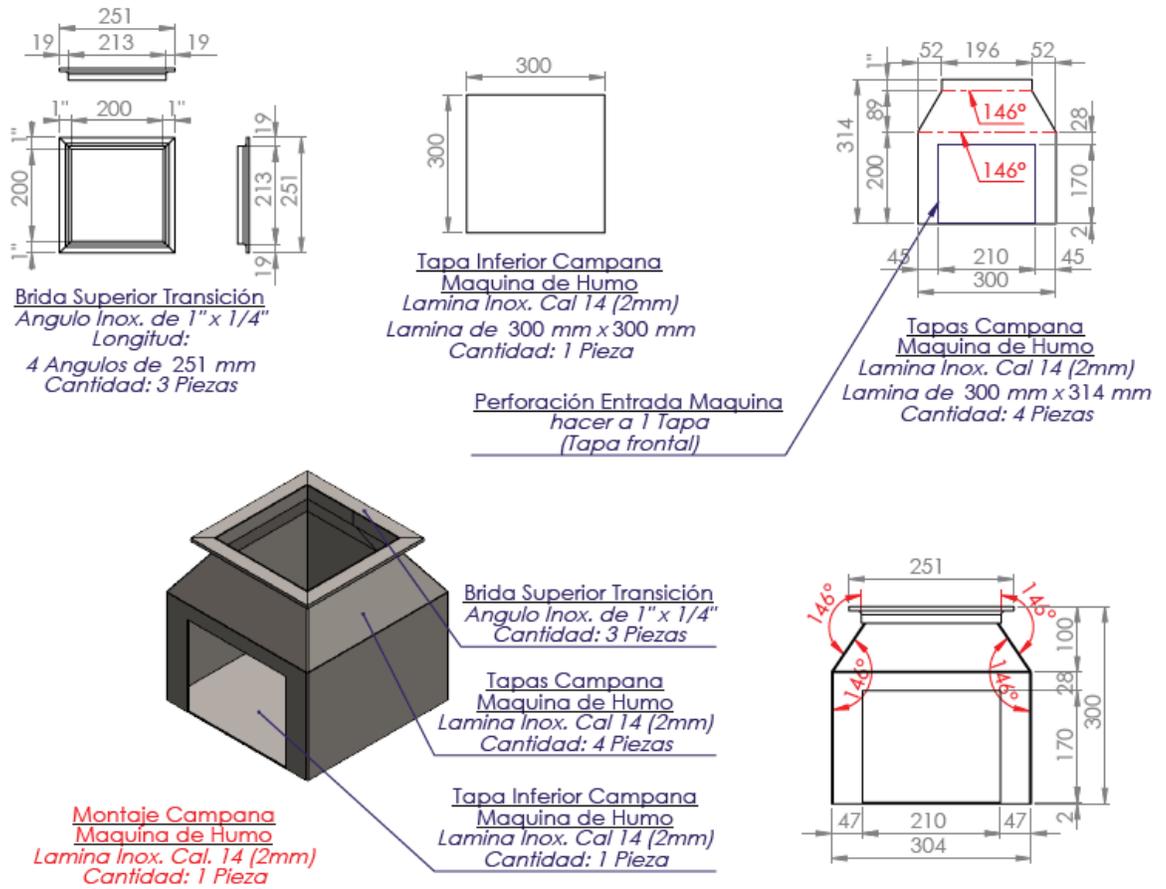


Fuente: Autora 2019

E. CAMPANA DE MÁQUINA DE HUMO PARA EL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

El diseño se compone de una campana que contendrá la maquina de humo la cual será la fuente de emisión de material particulado, esta campana se colocara antes de la brida de transición logrando así encapsular el humo generado y conducirlo de manera propicia desde la brida de transición hasta la base matriz en donde serán cargadas electrostáticamente las partículas.

Ilustración 13. Diseño de campana para máquina de humo del precipitador electrostático.



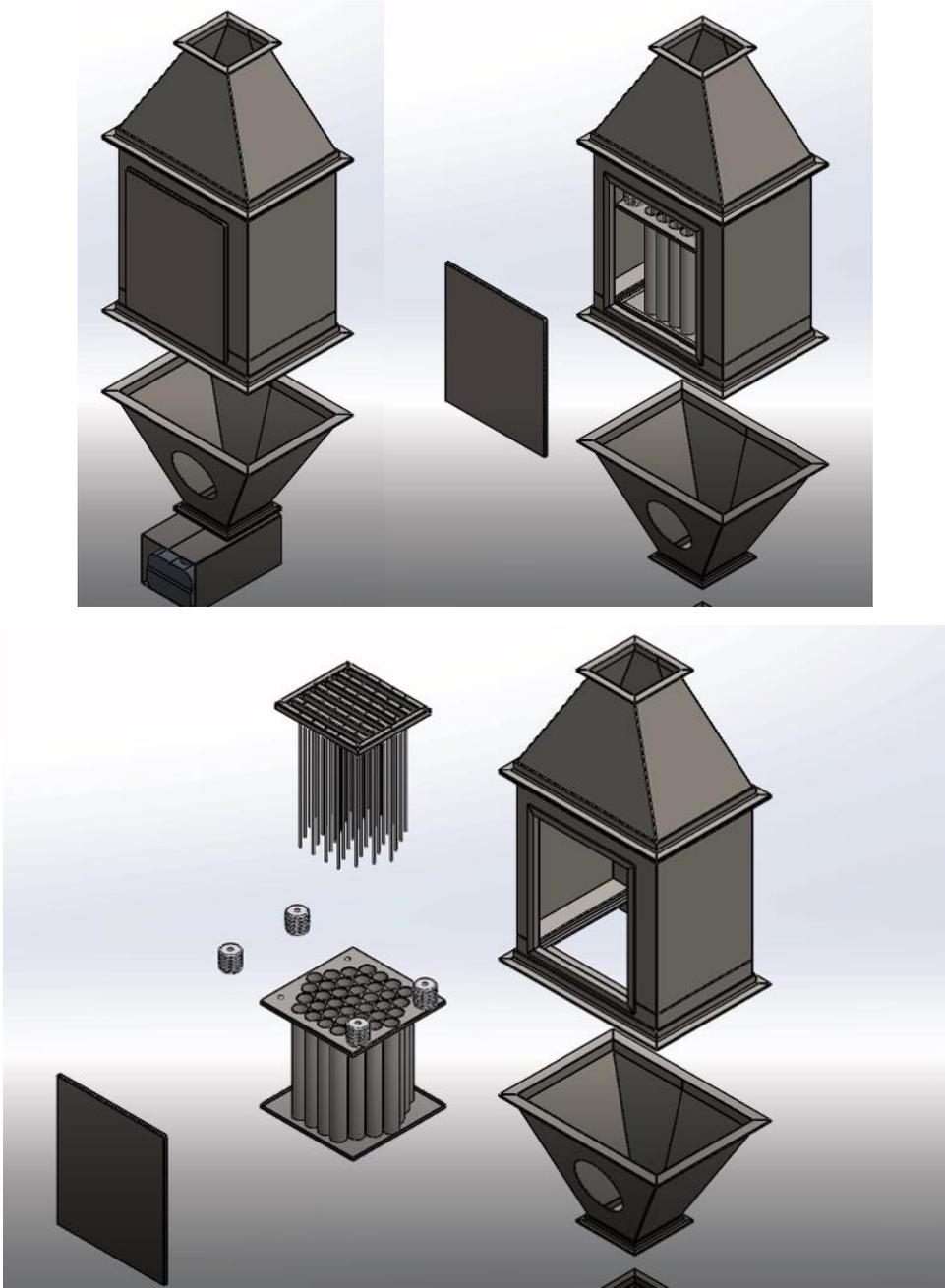
Fuente: Autora 2019

F. GABINETE PARA MONTAJE ELÉCTRICO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

El montaje contiene en la parte trasera un gabinete con doble fondo de las mismas dimensiones de alto y ancho del cuerpo del precipitador electrostático el cual acondicionará y contendrá todo el montaje eléctrico, ya explicado en la metodología.

A continuación, en el siguiente bosquejo se podrá apreciar todas y cada una de las partes explicadas con anterioridad.

Ilustración 14. Montaje total del precipitador electrostático



Fuente: Autora 2019

G. PRUEBAS EXPERIMENTALES ÚTILES PARA LA DOCENCIA.

Primeramente, se deberá llevar a cabo la instalación de sensores de opacidad. Las mediciones de eficiencia se deberán realizar una vez cerrada y sellada completamente la carcasa. Solamente con el aire encerrado y sin circular el humo.

Se deberá realizar una medición por cada minuto de tiempo transcurrido por medio de sensores de opacidad, luego de transcurrido cinco minutos se deberá encender la fuente de alto voltaje de 10 mil a 13 mil voltios y se continuará midiendo por cada minuto de tiempo transcurrido. Se repetirán las mediciones para la obtención de los valores más representativos. Los sensores de opacidad trabajaran según el método de luz modulada de haz doble siguiendo el principio de autocolimación, contando con un cabezal de medición, un reflector, una unidad de alimentación de aire de limpieza y un reflector de punto cero, se deberá instalar uno en la entrada y otro en la salida del equipo para realizar la medición de opacidad en cada uno de los puntos y lograr así obtener un valor aproximado de porcentaje de remoción.

Ilustración 15. Sensor de opacidad



Fuente: Industria SIEMENS.

La ionización del aire contenido en la carcasa se empieza a notar cuando transcurren aproximadamente cinco minutos desde que se encendió la fuente de alto voltaje, de esta forma la rapidez de remoción debe ser mayor, posteriormente se realiza el mismo tipo de medición agregándole la fuente que genera humo ya sea la cámara de humo o la quema de algún material especial para aumentar así la cantidad de material particulado del interior de la carcasa y simular una situación más real. Encendido el alto voltaje diez minutos después aproximadamente de

haberse iniciado el registro de datos el proceso de remoción deberá incrementar su rapidez.

Posteriormente y con los datos obtenidos se podrá visualizar de manera cualitativa la reducción de la salida del humo luego de ser cargadas las partículas a través de una fuente de alto voltaje y cuantitativamente a través de los sensores de opacidad los cuales posteriormente nos permitirán la obtención de la eficiencia de remoción del sistema a partir de la ecuación:

$$n = 1 - \frac{qt}{q_0}$$

En donde (n) es la eficiencia, (q) es la cantidad de partículas contadas transcurrido un tiempo (t) y (q₀) la cantidad máxima de partículas medida y usada como referencia. Con todo esto se pretenderá obtener como resultado una remoción de aproximadamente el 90% de las partículas bajo todas las condiciones expuestas con anterioridad.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha presentado un diseño de precipitador electrostático cuya finalidad es poder ser construido y utilizado en un futuro en el laboratorio de aire de la facultad de ingeniería ambiental de la universidad pontificia bolivariana para fines didácticos. El tipo de precipitador escogido es tubular, el diseño presentado y los resultados obtenidos por las pruebas preliminares indican que los parámetros son los adecuados permitiendo su uso en pequeñas y medianas industrias además de la universidad Pontificia bolivariana, debido a su óptimo tamaño lo cual es difícil de encontrar puesto que las dimensiones generalmente manejadas en este tipo de equipos son exorbitantes. En general una masificación de dispositivos como este permitiría una mejora en la calidad de vida de cada una de las personas logrando reducir notoriamente la emisión de materiales contaminantes a la atmósfera y permitiendo el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Una vez diseñado el prototipo de ensayo y verificado su funcionamiento, se diseñaron las condiciones óptimas y dimensiones apropiadas para el prototipo a escala de laboratorio el cual se proyecta para funcionar bajo un voltaje aproximado de 10 mil a 13 mil voltios, deberá ser conectando el cuerpo del precipitador a un polo a tierra que permita reducir todo riesgo a la salud de los usuarios.

Durante el desarrollo de las pruebas preliminares primeramente se llevó a cabo la quema de papel y luego la generación de humo con una cámara de humo que contiene glicerina, se pudo apreciar que el uso del precipitador electrostático reduce el tiempo de permanencia del contaminante en los diferentes recipientes, es decir genera una elevada rapidez de remoción de sustancias como lo es la glicerina, quema de papel y de la mano el PM10 y PM2.5. Además, mostró que el sistema de

prueba lograba eliminar una buena cantidad del contaminante en minutos apreciado desde un punto de vista cualitativo (Material que sale Vs Material que entra).

El material que prima en este diseño es el acero inoxidable puesto que es un material que posee una alta conductividad eléctrica lo cual es altamente necesario en este tipo de equipos además de que, evita todo tipo de corrosión. Es un material que puede ser reciclado al final de su vida útil, puesto que cualquier equipo que se construya con este material se puede desarmar y originar desechos seleccionados llamados chatarra.

Finalmente se diseñaron unas pruebas cualitativas y cuantitativas a través de la instalación de sensores de opacidad que permitirán en el momento de ser construido el equipo lograr una medición del porcentaje de remoción de material logrado a través de la aplicación del principio electrostático.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDEAM; Contaminación y calidad ambiental; Diciembre 2016.
- [2] Nick Tyler, Claudia Ramírez, Claudia Ramírez; Marco Teórico de contaminación atmosférica en Colombia; Universidad de los Andes; Abril de 2013
- [3] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial; política de prevención y control de la contaminación del aire.
- [4] Hoja de Datos- Tecnología de control de contaminantes del aire; Precipitador Electrostático Húmedo tipo tubo-alambre.
- [5] Juan Felipe Rodriguez, Uriel Faruk Alarcon pinto, Olmer Garcia bedoya, German Benavidez; Design and prototype of an electrostatic precipitator; Diciembre del 2017.
- [6] S.H. Kim, H.S Park, K.W. Lee. Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles; November of 2000.
- [7] Ye Zhuang, Yong Jin Kim, Tai gyu lee, Pratim Biswas; experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators. Aerosol and air quality research laboratory, environmental engineering and science division, department of civil and environmental engineering, university of Cincinnati; 6 December of 1999
- [8] Gediminas Mainelis, Klaus Willeke, Atin Adhikari, Tiina Reponen, and Sergey A. Grinshpun; design and collection efficiency of a new electrostatic precipitator for bioaerosol collection. department of environmental sciences, rutgers, the state university of new jersey, new brunswick, new jersey center for health related aerosol studies, department of environmental health, university of Cincinnati, Cincinnati, Ohio; December of 2016
- [9] Julian Gelis Orta, Gustavo Guerrero, Raul Narvaez Saenz; Principios para el

- modelamiento de precipitadores electrostáticos de sólidos; Facultad de Ingeniería Química, Universidad de San Buenaventura; Julio del 2014
- [10] James H. Turner, Phil A. Lawless, Toshiaki Yamamoto, David W. Coy; Precipitadores electrostáticos, Innovative Strategies and Economics Group, OAQPS- U.S. Environmental Protection Agency; Septiembre de 1999.
- [11] J. Deng, Y. Zhang, Y. Hong, L. Xu, Y. Chen, W. Du, and J. Chen, “Optical properties of PM_{2.5} and the impacts of chemical compositions in the coastal city Xiamen in China,” *Sci. Total Environ.*, vol. 557–558, pp. 665–675, 2016.
- [12] C. S. Liang, F. K. Duan, K. Bin He, and Y. L. Ma, “Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM_{2.5},” *Environ. Int.*, vol. 86, pp. 150–170, 2016.
- [13] B. Onat, U. A. Sahin, and T. Akyuz, “Elemental characterization of PM_{2.5} and PM₁ in dense traffic area in Istanbul, Turkey,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 101–105, 2013.
- [14] PRTR ESPAÑA; Registro estatal de misiones y fuentes contaminantes; Ministerio para la transición ecológica, Gobierno de España; Año 2017.
- [15] Henry Jeovany Saravia Morales; estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y aprovechamiento de precipitadores electrostáticos, en planta de generación arizona; Universidad de San Carlos de Guatemala; Guatemala, Julio de 2008

