





**RECOLECCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN ÁREAS COMUNES,
MEDIANTE UN PROTOTIPO DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO
ELABORADO CON RESIDUOS ELECTRÓNICOS**

AUTOR(ES):

IVÁN ANDRES MURGAS DAZA

LEWIS MUEGUEZ PACHECO

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR – CESAR
2021**



**RECOLECCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN ÁREAS COMUNES,
MEDIANTE UN PROTOTIPO DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO
ELABORADO CON RESIDUOS ELECTRÓNICOS**

AUTOR (ES):

IVÁN ANDRES MURGAS DAZA
LEWIS MUEGUEZ PACHECO

DIRECTOR:

ÁNGEL DAVID POLO CÓRDOBA

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR – CESAR
2021**



DEDICATORIA

Gracias a Dios por guiarnos con sabiduría e inteligencia en este proceso de formación, por ser incondicional y maravilloso en cada peldaño escalado. Este trabajo lo dedicamos a nuestros padres Pedro Alfonso Murgas, Neidis Liliana Daza, José Leonel Mueguez y Josefina Pacheco, por su apoyo absoluto, por incentivarnos a cumplir nuestras metas, por edificarnos y educarnos con buenas costumbres, por ser el motor que nos impulsaba a dar lo mejor de nosotros durante toda nuestra formación, por su esfuerzo, constancia y firmeza para lograr nuestro anhelo de ser unos profesionales en ingeniería y de calidad.

A mi esposa Karina Vega (Lewis Mueguez) y mi mejor amiga Lennys Henriquez (Iván Murgas), por creer en nuestras capacidades, por darnos las palabras necesarias y el impulso para recobrar fuerzas después de una batalla perdida, por sus aportes y apoyo incondicional.

Por último, una dedicatoria mutua entre Lewis Mueguez e Iván Murgas, por la amistad y compañerismo, por nuestra lealtad, paciencia y apoyo incondicional durante todo este proceso de formación, por el compromiso y entrega en esta investigación, por cada uno de nuestros sacrificios para culminar con éxito este proyecto.

Lewis Mueguez

Iván Murgas



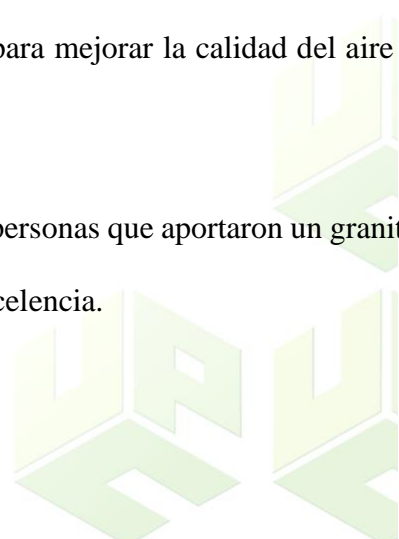
AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios porque tuvo el control en este trabajo de investigación, fue el ser maravilloso y supremo que nos regaló la sabiduría y la inteligencia para emprender este arduo proceso; la resiliencia y paciencia para culminar con éxito esta investigación, y por ende nuestra carrera profesional.

A nuestras familias en especial a nuestros padres por todo su esfuerzo y apoyo incondicional, por sus palabras de aliento cuanto necesitábamos vencer un obstáculo, por su amor y perseverancia durante nuestra formación, pero sobre todo por creer e impulsarnos para hacer profesionales ejemplares y de calidad.

Al programa de ingeniería ambiental y sanitaria y sus docentes, pero en especial a nuestro director Ángel David Polo Córdoba, por dirigirnos, guiarnos, asesorarnos y motivarnos para que este proyecto no solo tuviera excelencia en su contenido, sino que fuera un marco de referencia para investigaciones que impulsen al desarrollo de tecnologías para mejorar la calidad del aire y por ende conservar y preservar el medio ambiente.

A nuestros amigos, compañeros de formula y a todas las personas que aportaron un granito de arena para que esta investigación se culminara con éxito y excelencia.





Resumen

La contaminación del aire por material particulado es uno de los mayores problemas ambientales en la actualidad, ya que constituye graves afectaciones de salud, causando enfermedades respiratorias y que provoca 4,2 millones de muertes prematuras. En la actualidad se han desarrollado tecnologías de control que reduzcan la carga contaminante, sin embargo, son pocos los estudios realizados en áreas urbanas con este fin. Conforme a lo anterior, se propuso recolectar material particulado en áreas comunes, mediante un prototipo de precipitador electrostático, elaborado con residuos electrónicos. Para cumplir con el objetivo plasmado, se hizo una búsqueda acerca de las tecnologías para control de material particulado, la cual permitió seleccionar, diseñar y construir un precipitador electrostático de dos etapas. Se eligieron las partes y secciones internas del prototipo, para luego determinar los materiales a utilizar, seguidamente buscar los componentes en chatarrerías y lugares que almacenan residuos aprovechables, después se evaluaron las características físicas y técnicas de los materiales, posteriormente se realizaron cálculos de diseño y se llevó a cabo su construcción, por último, se realizaron las pruebas experimentales y se comprobó la eficiencia en recolectar material particulado. El prototipo demostró una eficiencia de 90% para material particulado de tamaño Pm10, un 90% para Pm2.5 y un 94% para Pm1.0. Se evidenció que el prototipo construido con materiales reciclables es eficiente, ya que maneja valores entre 90 y 95% en la captura de material particulado, por ende, puede ser utilizado para recolectar MP en áreas comunes.



Palabras clave: precipitador electrostático, prototipo, material particulado, residuos aprovechables.

Abstract

Air pollution by particulate matter is one of the biggest environmental problems today, since it constitutes serious health effects, causing respiratory diseases and causing 4.2 million premature deaths. At present, control technologies have been developed that reduce the pollutant load, however, few studies have been carried out in urban areas for this purpose. In accordance with the above, it was proposed to collect particulate material in common areas, using a prototype electrostatic precipitator, made with electronic waste. To meet the stated objective, a search was made about the technologies for the control of particulate matter, which will arrive at, design and build a two-stage electrostatic precipitator. The internal parts and sections of the prototype were chosen, to then determine the materials to be used, then look for the components in junkyards and places that store usable waste, then the physical and technical characteristics of the materials were evaluated, then design calculations and its construction was carried out, finally, the experimental tests were carried out and the efficiency in collecting particulate material was verified. The prototype demonstrated an efficiency of 90% for Pm10 size particulate material, 90% for Pm2.5 and 94% for Pm1.0. It was evidenced that the prototype built with recyclable materials is efficient, since it manages values between 90 and 95% in the capture of particulate material, therefore, it can be used to collect PM in common areas.



Key words: electrostatic precipitator, prototype, particulate matter, recyclable waste.

Tabla de Contenido

1. Planteamiento Del Problema.....	8
Justificación	10
3. Objetivos	12
3.1 Objetivo General.....	12
3.2 Objetivos específicos	12
4. Marco Referencial.....	13
4.1 Antecedentes de la Investigación	13
A nivel internacional.....	13
A Nivel Nacional	17
4.2 Marco Teórico.....	20
4.2.1 Control De Material Particulado	20
4.2.2 Material Particulado.....	21
4.2.3 Sistemas y Tecnologías de Control.....	23
4.2.4 Precipitadores Electrostáticos	27
4.2.5 Reutilización de residuos	45



4.3 Marco Conceptual.....	45
4.4 Marco Legal	48
4.5 Marco Contextual.....	54
5. Marco Metodológico.....	58
5.1 Línea de Investigación	58
5.2 Tipo de investigación	58
5.3 Población de estudio y muestra.....	59
5.4 Desarrollo Metodológico	59
5.4.1 Etapa 1. Determinar el tipo, características y componentes que integraran el prototipo de precipitador electrostático, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, como la humedad, temperatura y precipitaciones en áreas comunes.....	59
5.4.2 Etapa 2. Verificar las características técnicas de los residuos electrónicos para su reutilización como componentes del PES.	60
5.4.3 Etapa 3. Evaluar la eficiencia del precipitador, en función de la potencia de voltaje aplicado, distancia entre los electrodos, velocidad entrada de flujo y tiempo de residencia.	61
6. Resultados y análisis	62

6.1. Resultados de la etapa 1. Determinar el tipo, características y componentes que integraran el prototipo de precipitador electrostático, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, como la humedad, temperatura y precipitaciones en áreas comunes.	62
6.1.1 Revisión Bibliográfica y selección de tipo de Precipitador electrostático.	63
6.1.2 Secciones y partes del precipitador electrostático	64
6.1.3 Materiales utilizados para construcción del PES.	66
6.2 Resultado de la etapa 2. Verificar las características técnicas de los residuos electrónicos para su reutilización como componentes del PES	80
6.2.1 Consecución de materiales reutilizables.	80
6.2.2 Evaluación de condiciones físicas de los materiales.	81
6.3 Resultado de etapa 3. Evaluar la eficiencia del precipitador, en función de la potencia de voltaje aplicado, distancia entre los electrodos(placas), velocidad de flujo y tiempo de residencia.	81
6.3.1 Distancia entre los electrodos de descarga y placas colectoras	81
6.3.2 Cálculos de diseño	81
6.3.3 Construcción y ensamblaje del precipitador electrostático.	87
6.3.4 Pruebas experimentales de eficiencia del prototipo de precipitador electrostático.	95



6.3.5 Cálculo de la eficiencia 101

7 conclusiones 102

8. Recomendaciones 104

9. Referencias..... 105

ANEXOS 110



Lista de Tablas

Tabla 1 Parámetros del PESs	42
Tabla 2 Normatividad aplicada en Colombia para control de contaminación atmosférica.	48
Tabla 3 Rangos y valores de los parámetros de diseño.....	86



Lista de Figuras

Figura 1	_____	22
Tamaños típicos de partículas y los tiempos teóricos de caída a 1m, según la ley de Stokes.		22
Figura 2	_____	23
Eficiencia de tecnologías de control de MP.	_____	23
Figura 3	_____	24
Tamaño y tipos de MP, gases dispersos y sistemas de limpieza de MP.	_____	24
Figura 4	_____	28
Configuración PESs placa-alambre	_____	29
Figura 5	_____	30
Configuración PESs placa-alambre	_____	30
Figura 6	_____	30
Configuración PESs Tubular.	_____	30
Figura 7	_____	32
Configuración PESs de dos etapas.	_____	32
Figura 8	_____	34
Representación del funcionamiento básico de un PES	_____	35



Figura 9 _____	54
Imágenes de áreas comunes, Avenida Fundación. _____	54
Figura 9.1 _____	54
Imágenes de áreas comunes, Universidad Popular del Cesar. _____	54
Figura 9.2 _____	55
Imágenes de áreas comunes, carrera 31 Valledupar. _____	55
Figura 9.3 _____	55
Imágenes de áreas comunes, mercado público Valledupar. _____	55
Figura 9.4 _____	56
Imágenes de áreas comunes, Universidad Popular del Cesar. _____	56
Figura 9.5 _____	56
Imágenes de áreas comunes, carrera 31 Valledupar. _____	57
Figura 9.6 _____	57
Imágenes de áreas comunes, Obelisco Valledupar. _____	57
Figura 9.6 _____	57
Imágenes de áreas comunes, obelisco Valledupar. _____	57
Figura 10 _____	63

Secciones básicas del PES de dos etapas _____	63
Figura 11 _____	65
Sensor para material particulado _____	65
Figura 12 _____	65
Representación de las secciones del PES. _____	65
Figura 13 _____	67
Chasis de CPU _____	67
Figura 14 _____	67
Tipos de geometría de electrodos _____	67
Figura 15 _____	68
Electrodos _____	68
Figura 15.1 _____	69
Malla metálica _____	69
Figura 15.1 _____	69
Electrodos _____	69
Figura 16 _____	70
Tipos de geometrías de placas colectoras. _____	70

Figura 17 _____	71
Placa colectora _____	71
Figura 17.1 _____	71
Placa colectora _____	71
Figura 18 _____	72
Extractor _____	72
Figura 18.1 _____	73
Extractor _____	73
Figura 19 _____	74
Diagrama básico de un balastro. _____	74
Figura 20 _____	75
Balastro electrónico _____	75
Figura 21 _____	77
Transformador Flyback. _____	77
Figura 22 _____	77
Ubicación del primario del flyback modelo 2431723 HR 6247. _____	77
Figura 23 _____	78

Diagrama del circuito de alto voltaje del PES. _____	78
Figura 24 _____	79
Modulo detector de material particulado _____	79
Figura 25 _____	82
Configuración segunda etapa. _____	82
Figura 26 _____	84
Medidas CPU. _____	85
Figura 27 _____	85
Velocidades optimas de flujo de gas. _____	85
Figura 28 _____	88
Estructura de soporte interna _____	88
Figura 28.1 _____	89
Estructura de soporte interna _____	89
Figura 29 _____	90
Zona de entrada de partículas _____	90
Figura 30 _____	90
Primera etapa, Electrodos ionizantes. _____	90

Figura 30.1 _____	91
Primera etapa, Electroodos ionizantes. _____	91
Figura 31 _____	92
Segunda etapa, palcas colectoras. _____	92
Figura 31.1 _____	93
Segunda etapa, palcas colectoras. _____	93
Figura 32 _____	93
Zona de salida. _____	94
Figura 33 _____	94
Estructura interna ensamblada. _____	94
Figura 34 _____	95
Precipitador Electrostático _____	95
Figura 35 _____	95
Imagen del montaje _____	95
Figura 35.1 _____	96
Imagen del montaje _____	96
Figura 36 _____	97



Máxima concentración de partículas medida por el sensor. _____ 97

Figura 37 _____ 98

Mínima concentración de partículas medida por el sensor. _____ 98

Figura 38 _____ 98

Gráfico de concentración de Pm10, Pm2,5 y Pm1.0 con el PES apagado. _____ 98

Figura 39 _____ 100

Gráfico de concentración de Pm10, Pm2,5 y Pm1.0 con el PES encendido. _____ 100



1. Planteamiento Del Problema

La contaminación del aire por material particulado es un problema que surge como consecuencia de procesos antropogénicos tales como: la quema de combustibles fósiles, minería, desarrollo urbano, actividades industriales entre otras; sin embargo, estas partículas también pueden tener su origen en fuentes naturales como las erupciones volcánicas y polvo arrastrado por corrientes de aire, Este tipo de partículas se encuentran suspendidas en la atmosfera de forma sólida las cuales poseen tamaños cuyo diámetro aerodinámico oscila entre $10\ \mu\text{m}$ y $1\ \mu\text{m}$. Es importante mencionar que el material particulado produce efectos negativos muy marcados en lo que respecta a la calidad del aire y otros factores ambientales como la visibilidad, el clima, ecosistemas, edificaciones y principalmente tiene graves afectaciones sobre la salud del ser humano, siendo las enfermedades respiratorias y cardiovasculares las que se presentan con mayor incidencia. Es así como personas con enfermedades cardiopulmonares, tales como; niños y adultos mayores son los más propensos al deterioro de su salud por la exposición al material particulado.

Sobre el material particulado se debe anotar que es un contaminante que afecta la calidad del aire de lugares y espacios de uso frecuente como parques, plazas, vías peatonales, estaciones de transporte, universidades, colegios, hospitales, entre otras áreas comunes. También hay que decir que en la actualidad estas partículas en las áreas comunes no son monitoreadas por las autoridades ambientales mediante los sistemas de vigilancia de calidad del aire, por lo tanto, no se implementan equipos y dispositivos afines a esa actividad.



Considerando lo anterior, es innegable que la problemática ambiental producida por estas partículas afecta en gran medida a la calidad del aire de ciudades como Valledupar, Medellín, Cali, Bucaramanga y Bogotá, las cuales, a pesar de poseer sistemas de vigilancia de la calidad del aire y disponer de la normatividad como la resolución 2254 del 2017, emitida por el ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible, no cuenta con las mismas herramientas ni la tecnología para hacerle seguimiento al material particulado en las áreas comunes afectadas por este contaminante.

Preguntas de la investigación

¿Cuáles son los niveles de concentración por material particulado en áreas comunes?

¿Podría alguna tecnología minimizar el impacto del material particulado en las áreas comunes?



Justificación

El aire es un fluido que está constituido por una mezcla de gases, de los cuales algunos hacen parte de las funciones vitales de los seres vivos, además contiene ciertas sustancias como lo es el material particulado, que, dependiendo su concentración y exposición, afectan en mayor y menor proporción la salud de las personas, por esta razón, es de gran importancia contar con un aire limpio para respirar, sobre todo en lugares por donde frecuentan diariamente las personas. De acuerdo con lo mencionado, es beneficioso plantearse nuevas alternativas en aras de minimizar el material particulado en áreas comunes, esto con el fin de ayudar al mejoramiento de la calidad del aire y, por tanto, la salud y calidad de vida de la población.

Generalmente las fuentes que más emiten material particulado al aire son las móviles, como los vehículos de carga pesada y las fijas como las fábricas e industrias. Para estas últimas, existen múltiples tecnologías para controlar sus emisiones a la atmosfera, como lo son los ciclones, lavadores Venturi, filtros mangas y los precipitadores electrostáticos; que permiten depurar el flujo de aire contaminado con altas eficiencias del 99.9 % en depuración de aire contaminado como lo afirma Fernández (2008) “mantiene una alta eficiencia de recolección (generalmente mayor al 99.9%) en partículas de todos los tamaños, incluyendo sub-micras”.

Teniendo en cuenta que existen estas tecnologías y considerando que el MP solo es medido de forma general, a través de un sistema de vigilancia ubicado en ciertas zonas urbanas de un municipio o de población en particular, pero que en las áreas comunes no se cuenta con información real y específica de los índices de calidad de aire, se pretende mediante este estudio



diseñar, un prototipo de un precipitador electrostático construido con residuos electrónicos, como tecnología para recolectar material particulado en las áreas comunes.

Por otra parte, con este trabajo se quiere fortalecer el aprovechamiento de residuos electrónicos desechados, porque normalmente estos no son reciclados y lo que se hace es depositarlos junto con otros residuos en un relleno sanitario, incluso en botaderos. Con esto se busca promover la cultura y práctica de la reducción, reutilización y reciclaje de materiales.



3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Recolectar material particulado en áreas comunes, mediante un prototipo de precipitador electrostático, elaborado con residuos electrónicos.

3.2 Objetivos específicos

Determinar el tipo, características y componentes que integrarán el prototipo de precipitador electrostático, teniendo en cuenta las condiciones ambientales como humedad y temperatura en áreas comunes.

Verificar las características técnicas de los residuos electrónicos para su reutilización como componentes del PES.

Construir y evaluar la eficiencia del precipitador, en función de la potencia de voltaje aplicado, distancia entre los electrodos, velocidad entrada de flujo y tiempo de residencia.



4. Marco Referencial

4.1 Antecedentes de la Investigación

Para dar soporte a la presente investigación, se llevó a cabo una revisión bibliográfica que relaciona todos los estudios significativos y de importancia que puedan fortalecer las bases conceptuales de la presente tesis. Dicho lo anterior, las diferentes investigaciones relacionadas a continuación exponen criterios de diseños, recomendaciones, datos e información valiosa para el diseño del prototipo.

A nivel internacional

Kim et al. (2013) llevaron a cabo el “Submicrometer particle removal indoors by a novel electrostatic precipitator with high clean air delivery rate, low ozone emissions, and carbon fiber ionizer” [Eliminación de partículas submicrométricas en interiores mediante un nuevo precipitador electrostático con alta tasa de suministro de aire limpio, bajas emisiones de ozono e ionizador de fibra de carbono]. Esta investigación se realizó en colaboración de: Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea, Department of Electrical Engineering and Information Systems, School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, R&D Department, MFtech Co. LTD, Seoul, Korea. En este estudio, para lograr un CADR (tasa de suministro de aire limpio) alto ($> 12 \text{ m}^3 / \text{min}$) con una producción de ozono insignificante en una cámara de prueba estándar de menos de 10 ppb, desarrollaron un nuevo filtro de aire ESP de dos etapas con un ionizador compuesto por celdas separadas y fibras de carbono que se ubicaba en el centro de cada celda y con placas colectoras

metálicas paralelas, las cuales estaban cubiertas por materiales aislantes no metálicos en los bordes Kim et al. (2013).

Los resultados de la prueba de este precipitador desarrollado por Kim et al. (2013), indicaron que las emisiones del filtro de aire ESP dieron como resultado niveles de ozono inferiores a 10 ppb, que es solo 1/5 de las regulaciones de ozono actuales para un filtro de aire de habitación en una cámara cerrada. El ESP también logró una alta tasa de suministro de aire limpio ($> 12 \text{ m}^3 / \text{min}$). Los aportes directos al presente estudio son la viabilidad de implementar pruebas en un precipitador de dos etapas.

Como objetivo principal los autores desarrollaron e investigaron el rendimiento de limpieza de aire de un nuevo purificador de aire pequeño tipo precipitador electrostático (ESP), con un ionizador de escobillas de carbón y un filtro de fibra de carbón activado (ACF). La versión anterior tenía una alta tasa de carga de partículas y una baja tasa de emisión de ozono. La aplicación de un voltaje negativo de 10 kV al ionizador de escobillas de carbón aumentó la eficiencia de recolección de partículas de un solo paso de partículas de $0.3 \mu\text{m}$ de 17.8% a 47.1%. La velocidad de flujo se mantuvo a 362 L/min, y la eficiencia aumentó a 64.2% cuando aplicamos un voltaje negativo a la etapa de recolección y aumentamos el voltaje a 10 kV. Esto fue relativamente bajo en comparación con un purificador de aire pequeño tipo filtro HEPA comercial líder en el mercado (80.7%). Como resultados finales, el nuevo purificador mostró una tasa de suministro de aire limpio de partículas (CADR) de $0.31 \text{ m}^3 / \text{min}$, aproximadamente 1.7 veces mayor que la del purificador comercial ($0.18 \text{ m}^3 / \text{min}$) debido a su alto caudal y baja caída de presión. Se midió la eficiencia de eliminación de gas en una cámara de prueba de 1 m^3 con ácido acético, acetaldehído y amoníaco;



después de 30 minutos de operación, los resultados fueron 97.9%, 92.4% y 87.8% para el nuevo purificador y 95.2%, 65.4% y 57.9% para el purificador comercial, respectivamente. La concentración de ozono se midió en una cámara de prueba cerrada (30.4 m³) durante 15 horas de operación continua, y mostró un valor máximo de 2.5 ppb, mucho más bajo que el estándar actual para ESP (50 ppb).

Por otra parte, el estudio de los autores citados se realizó con la aplicación de cargas negativas para crear el campo eléctrico, si bien es cierto que este tipo de cargar muestra eficiencias más altas que las cargas positivas, también genera concentraciones mínimas de ozono. Por lo tanto, para la presente tesis recolección de material particulado en áreas comunes, mediante un prototipo de precipitador electrostático elaborado con residuos electrónicos, el campo eléctrico se generará con la aplicación de cargas positivas. Por último, es importante destacar que este trabajo contribuye muy significativamente para el diseño de nuestro prototipo, ya que presenta alternativas adicionales al principio electrostático como lo es; el ionizador de fibra de carbono y el carbón activado como filtro, para mejorar la eficiencia.

Otra investigación importante fue la desarrollada por Li et al. (2019) “Experimental and theoretical study of the collection efficiency of the two-stage electrostatic precipitator” [Estudio experimental y teórico de la eficiencia de recolección del precipitador electrostático de dos etapas]. Estudio experimental y teórico de la eficiencia recaudatoria del precipitador electrostático de dos etapas. Este estudio se realizó en el Laboratorio clave de Tianjin, Control de Calidad Ambiental del Aire Interior, Escuela de Ciencias e Ingeniería Ambiental, Universidad de Tianjin, Tianjin 300072 y en el Segundo Instituto de Investigación y Diseño de Buques de Wuhan de China, Wuhan



430205, China. Tuvo como propósito diseñar un módulo electrostático de dos etapas y se estudiaron experimentalmente los efectos de siete parámetros sobre la eficiencia de la recolección de partículas de neblina de aceite con diferentes tamaños de partículas. Sobre la base de estos resultados experimentales, se desarrolló un modelo de eficiencia semi-empírico, se compararon la eficiencia medida y la eficiencia calculada del modelo actual y el modelo Deutsch. Los resultados de la comparación muestran que el modelo semi-empírico propuesto puede predecir bien la eficiencia fraccional del ESP de dos etapas, mientras que el modelo Deutsch claramente no es aplicable en este caso. Los resultados muestran que el grado de influencia de varios parámetros en la eficiencia de recolección de partículas de $0.31 \mu\text{m}$, de mayor a menor, es el siguiente: el voltaje aplicado al precargador, la distancia heteropolar del precargador, la velocidad, la distancia heteropolar del colector, el voltaje aplicado al colector, la longitud de la placa del colector y la longitud del precargador placa de puesta a tierra Li (2019).

Otro hallazgo importante de la investigación de Li (2019) fue que el estudio desarrolló un modelo de eficiencia semi-empírico para predecir la eficiencia de recolección del precipitador electrostático de dos etapas. Este modelo proporciona resultados mucho mejores que el modelo Deutsch. Este estudio es de vital importancia para la presente tesis, ya que proporciona valores y medidas de los diferentes parámetros que se tienen en cuenta para el diseño del precipitador, como, por ejemplo, la separación de los electrodos de descarga y distancia entre las placas colectoras, lo cual es una base para los experimentos realizados en el presente trabajo.

En el año 2019 Mamani Revilla, realizó el “Diseño e implementación de un prototipo a escala de un precipitador electrostático para el control de polución en una industria cementera”.



Esta tesis fue realizada en la Universidad Católica Santa María, Arequipa - Perú. Tuvo como finalidad la construcción de un supresor electrostático para el control de partículas de polvo en la industria cementera. El diseño se basó en las estructuras de fajas transportadoras de material cementante, por lo que se optó por un diseño semicircular o cilíndrica de la placa colectora, el electrodo ionizante se diseñó en forma de plancha estrellada, distribuidos a lo largo del cilindro recolector. En el cálculo de los parámetros de diseño se tuvo como referencia el Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire de la EPA (EPA, 2002) y para la determinar la eficiencia se usó el modelo de Deutsch. Para la parte eléctrica, se implementó un circuito aumentador de voltaje impulsado por un flyback el cual tenía una salida de 18KV, también se usó un circuito de control de alta diferencia de potencial CXDZ con una salida de 30KV.

Este trabajo en la presente tesis apporto un modelo para determinar los parámetros de diseño, por otra parte, proporciono una base para el circuito eléctrico con flyback, el cual se implementó en esta tesis.

A Nivel Nacional

Rodríguez et al. (2017) realizaron el “Diseño y prototipo de un precipitador electrostático”. Desarrollaron este trabajo en la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia. Este proyecto tiene como objetivo, diseñar y construir un precipitador electrostático con elementos de fácil adquisición, con la finalidad de entender cómo puede ser usado en hogares y zonas urbanas. Se logró realizar un prototipo eficaz para limpiar el aire con elementos y materiales de bajo costo. El proceso se realiza por medio de alta tensión de voltaje en placas de metales para generar campos



eléctricos que atrapan las partículas de contaminantes. De esta manera se purifica el aire del ambiente. Para el proyecto se utiliza un circuito que aumenta la tensión de la red local (120 V) a 27 000 voltios por medio de un transformador conocido como flyback.

El prototipo de precipitador electrostático fue implementado satisfactoriamente. Las ventajas del prototipo son los materiales de construcción, que son fáciles de conseguir y que tienen un costo de mantenimiento cercano a cero. Se aplicó el modelo de placas planas debido a que el diseño era más sencillo de construir con elementos de fácil obtención.

Este prototipo se puede aplicar en contaminantes como el humo y las cenizas que produce la quema de carbón, papel, cigarrillos y madera. Fue desarrollado un sistema de instrumentación con dispositivos de prototipado para medir los efectos del precipitador electrostático utilizando sensores de calidad del aire. En los resultados obtenidos analizaron que a mayor cantidad de voltaje aplicado en las placas se generaba mayor atracción de partículas, incluso partículas más pequeñas. Para el presente trabajo hace un valioso aporte, principalmente porque muestra ciertos materiales de fácil adquisición, los cuales sirven como referencia para la construcción y diseño del nuevo prototipo.

Flórez et al. (2018) realizaron una investigación sobre el “Diseño de un filtro electrostático a escala piloto”. Realizado en la universidad mariana, pasto, Nariño, Colombia. Este estudio de caso se realizó con el fin de disminuir las concentraciones de partículas contaminantes del aire, a partir de una combustión de papel reciclado, beneficiando a los seres vivos, ya que se disminuye la densidad del humo, con esto se genera que descendan las enfermedades respiratorias ya sean agudas o episodios asmáticos. Por lo anterior, se planteó un diseño y construcción de un



precipitador electrostático a escala piloto, para lo cual se empleó el equipo tubo Venturi como fuente emisora, el cual sirvió para simular la combustión en una típica caldera industrial. A partir de lo cual se obtuvo que el precipitador electrostático diseñado, fue capaz de reducir 98% de PM sobre la fuente emisora. Esta investigación es importante para la presente tesis, porque proporciona referencias metodológicas basadas en el Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire de la EPA, (2002), lo cual es la base para la mayoría de los cálculos de diseño del PES.

Gelis et al. (2014) llevaron a cabo una investigación sobre “Principios para el modelamiento de precipitadores electrostáticos de sólidos”. Realizado en la Universidad de Sam Buenaventura, Cartagena, Colombia. Este trabajo fue realizado con la finalidad de presentar un modelo matemático de la intensidad de campo eléctrico, la densidad de carga espacial, el potencial eléctrico y la capacitancia en un PES. En este modelo se describen los principales problemas asociados a la operación y funcionamiento de los precipitadores electrostáticos y algunas técnicas de solución para estos problemas. Con Comsol multiphysics es simulada la geometría básica de un PES sometido a tensión. Los resultados generados en la simulación muestran gráficamente como se afecta la intensidad de campo eléctrico a diferentes niveles de tensión como variable fundamental en la recolección de partículas suspendidas en corrientes de gas.

Para el presente trabajo este modelo realiza un importante aporte, ya que por medio de este se pueden calcular algunos de los parámetros elementales en lo que respecta a el diseño operacional del prototipo que se quiere construir.

4.2 Marco Teórico

En esta sección se presentan las bases teóricas relacionadas con el control de material particulado; su clasificación; tipo y el origen de esta sustancia. De manera semejante también se describirán las tecnologías y sistemas de recolección, en particular, los precipitadores electrostáticos; su principio físico; funcionamiento y operación. Así mismo, las características y parámetros que los componen.

4.2.1 Control De Material Particulado

La mayor parte de las grandes ciudades en el mundo se han visto muy afectadas por la mala calidad del aire, esto es causado por diferentes fuentes, ya sea naturales (erupción de volcanes, arrastre y transporte de polvo por vientos etc.) o por actividad humana (Quema de combustibles fósiles, Industria, transporte, minería, construcciones, demoliciones etc.) lo cual es preocupante para salud de la población como lo afirma Calua Carrasco, (2018) “La contaminación es uno de los mayores problemas ambientales en la actualidad, especialmente, en las ciudades. Además, constituye un grave problema de salud, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo” (p. 11). La contaminación atmosférica es el principal problema, ya que altera el estado natural de la composición del aire con altas concentraciones de gases y partículas que provocan enfermedades respiratorias y efectos negativos en los seres vivos. Lo anterior es sustentado por la OMS (2021) cuando afirma que, en el 2016, las estimaciones de la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4,2 millones de defunciones prematuras.



En la actualidad diversas organizaciones mundiales, regionales y nacionales han centrado esfuerzos creando normas; políticas y estándares de calidad para el control de emisiones; dirigidos a la disminución de los impactos ambientales negativos que causa las diferentes actividades del ser humano.

Los principales contaminantes atmosféricos han sido catalogados como criterios en las normativas de cada país. En el caso de Colombia la resolución 2254 establece los límites máximos permisibles a condiciones de referencia de contaminantes criterios (2017, art 2). En este sentido, dentro de los compuestos contaminantes están: el material particulado (MP); dióxidos de azufre SO₂; óxidos de nitrógeno NO_x; monóxidos de carbono CO y el ozono O₃ (Fernández Sandoval, 2008, p. 3).

4.2.2 Material Particulado

Se define el material particulado como una mezcla de sustancias sólidas y de pequeñas gotas líquidas suspendidas en el aire. El MP₁₀ es descrito por la Agencia para la Protección Ambiental (Environment Protection Agency - EPA), como partículas que poseen un diámetro aerodinámico nominal de 10 μm o menos (Fernández Sandoval, 2008, p. 3). El mismo autor define MP_{2.5} como la MP con diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 μm . En general, “MP gruesa” se refiere a MP₁₀, mientras que MP “fina” se refiere a MP_{2.5}.

Gaviria et al (2011) afirman que “el material particulado es un contaminante primario generado por la combustión ineficiente de combustibles fósiles; para el caso del menor de 10 micrómetros (pm₁₀), el mayor precursor es la combustión de diésel”.

De acuerdo con Fernández Sandoval:

“Entre más pequeña sea una partícula, el tiempo que permanecerá en suspensión va a ser mayor y por consiguiente va a ser transportada a grandes distancias. En una atmósfera seca, las partículas pequeñas pueden, en la práctica, no sedimentar nunca. Por otro lado, en atmósferas húmedas pueden actuar como núcleos de condensación de humedad y precipitar con la lluvia. Dependiendo de su composición química pueden llevar contaminación al suelo y a las aguas. Además, una vez depositadas, pueden ser movilizadas nuevamente y transportadas por las aguas o incorporarse a los seres vivos”, (2008, p. 3).

Figura 1

Tamaños típicos de partículas y los tiempos teóricos de caída a 1m, según la ley de Stokes.

Tipo de Partículas	Diámetros de partículas (μm)	Tiempo teórico para caer 1 m
Polvos de carbón	100 a 1	1.1 seg a 168 min
Polvos de cemento, fragmentación de minerales	100 a 0.1	1.1 seg a 142 horas
Cenizas voladoras	100 a 0.1	1.1 seg a 142 horas
Humos de combustión de aceites	1 a 0.1	168 min a 142 horas
Núcleos de combustión	0.1 a 0.01	142 horas a 99 días
Polvos y humos metálicos	100 a 0.001	1.1 seg a 3 años

Fuente: Fernández, 2008.

4.2.3 Sistemas y Tecnologías de Control

Según Arciniégas Suárez:

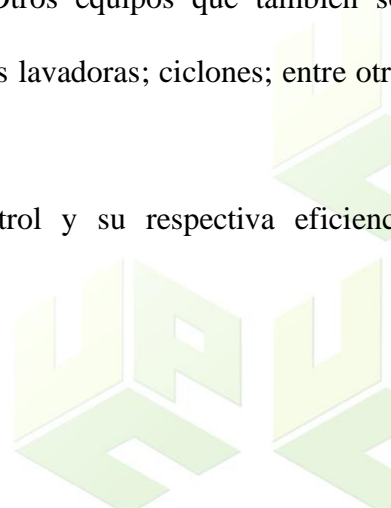
Los equipos utilizados para la medición de material particulado, succionan una cantidad medible de aire ambiente hacia una caja de muestreo a través de un filtro, durante un periodo conocido, generalmente 24 horas. El filtro es pesado antes y después para determinar el peso neto ganado. El volumen total de aire muestreado se determina a partir de la velocidad promedio de flujo y el tiempo de muestreo. La concentración total de partículas en el aire ambiente se calcula como la masa recolectada dividida por el volumen de aire muestreado, ajustado a las condiciones de referencia. (2012, p. 201).

Para el control del material particulado se emplean múltiples tecnologías, que, de acuerdo con las características de la emisión, se utilizan diferentes métodos y dispositivos. Como es el caso de los filtros de mangas, los cuales, son equipos comunes y bastante empleados. Sin embargo, muchos de estos dispositivos no sirven cuando hay gases a altas temperaturas, debido a que las mangas normalmente son fabricadas de material sintético. Otros equipos que también son ampliamente utilizados son: precipitadores electrostáticos; torres lavadoras; ciclones; entre otros dispositivos. (Fernández Sandoval, 2008)

A continuación, se muestra los dispositivos de control y su respectiva eficiencia dependiendo del tamaño de partícula.

Figura 2

Eficiencia de tecnologías de control de MP.



EQUIPO	DIAMETRO (μm)				
	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 44	> 44
Ciclón de baja presión	12	33	57	82	91
Ciclón de alta presión	40	54	74	95	98
Filtro de Mangas	99	100	100	100	100
Torre Lavadora de mediana energía	80	90	98	100	100
Torre Lavadora de alta energía (Venturi)	95	99.5	100	100	100
Precipitador Electrostático	97	99	99.5	100	100

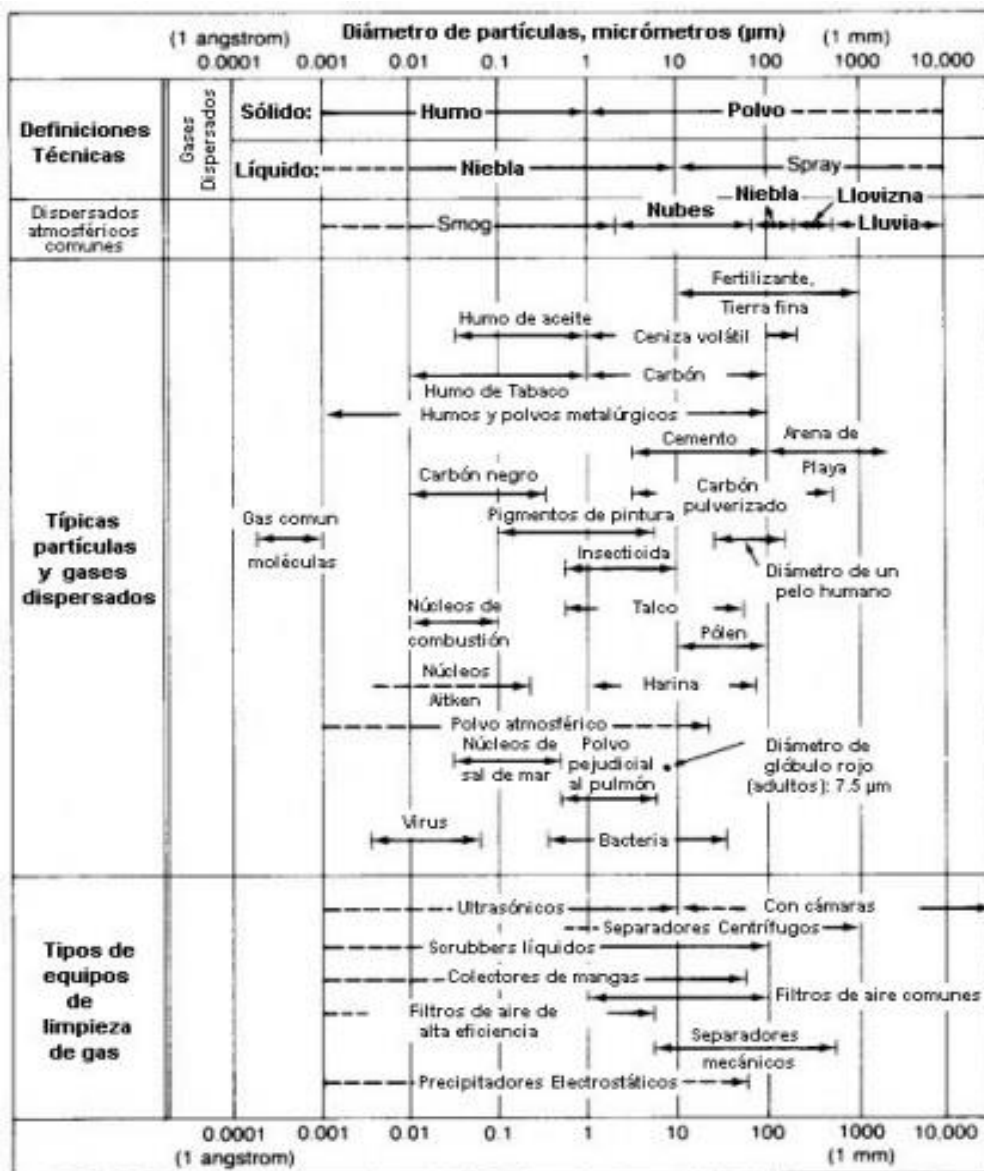
Fuente: Fernández, 2008.

Los colectores son diseñados de acuerdo con la composición, origen, tamaño y distribución de partículas en el fluido, esto permite tener una variedad de tecnologías para el control de material particulado, que hace cada uno opere bajo ciertos rangos de diámetro de partícula. Existen los que tienen mejor rendimiento con partículas de mayor tamaño otros con las de menor tamaño, así como también los que controlan diferentes tipos de partículas con buena eficiencia. En la siguiente tabla se evidencia el rango en que opera los colectores de MP.

Figura 3

Tamaño y tipos de MP, gases dispersos y sistemas de limpieza de MP.





Fuente: Fernández, 2008.

En todos los dispositivos para determinar su eficiencia se basan en el porcentaje de masa entrante de MP que es quitada de la corriente del gas. (Fernández, 2008).

La eficiencia de colección se calcula como:

$$n = \frac{MP_C}{MP_e} * 100\% \quad (1)$$

n: Eficiencia de colección de partículas. [%]

MP_C: Razón de MP colectada.

MP_e: Razón de MP entrante.

Otra forma para calcular la eficiencia es basada en la concentración de partículas en la entrada y salida de la corriente de gas, usada por S. Li et al. (2019), pg3 en su investigación.

Se utiliza la siguiente formula:

$$n = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) * 100\% \quad (1.2)$$

Donde:

C₁: Concentración de MP a la salida cuando el dispositivo este apagado. [µg/m³]

C₂: Concentración de MP a la salida cuando el dispositivo este encendido. [µg/m³]

Después de analizar los diferentes tipos de tecnologías de control de material particulado, por su eficiencia en la recolección, se optó por diseñar un precipitador electrostático. A continuación, se muestra la teoría relacionada con estos dispositivos.

4.2.4 Precipitadores Electrostáticos

De acuerdo con Gelis et al. “el precipitador electrostático, es un equipo eléctrico desarrollado industrialmente a partir de 1906 utilizado para eliminar impurezas de material particulado que se encuentran suspendidas en el aire o en otros gases”, (2014, p. 3). En este orden de ideas, se define a un precipitador electrostático (PES) como un dispositivo de control de emisiones, es decir, que ha sido diseñado para atrapar y remover el material particulado de los gases de salida de las chimeneas, utilizando fuerzas eléctricas, para las cuales el tamaño sea menor de $20\mu\text{m}$.

EPA afirma que:

Los precipitadores electrostáticos utilizan fuerzas eléctricas para mover las partículas fuera de la corriente de gas y sobre las placas del colector. A las partículas se les da una carga eléctrica forzándolas a que pasen a través de una corona, una región en la cual fluyen iones gaseosos. El campo eléctrico que fuerza a las partículas cargadas hacia las paredes, proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo. (2002 p. 3)

En el trabajo de graduación realizado por Saravia Morales, asegura que los precipitadores electrostáticos se utilizan sobre todo en procesos de alto índice de escape y de emisión, como en generadoras de electricidad, y en industrias tales como: cemento, productos químicos, metales, papel e ingenios azucareros. El mismo autor afirma que “la eficiencia de recolección de estos equipos varía, dependiendo de su tamaño y calidad, pero en algunos casos se han registrado niveles de reducción superiores a 99%”. (2008, p. 1)

4.2.4.1 Tipos de PESs. La agencia para la protección ambiental EPA, señala que:

Los PESs están configurados de diferentes formas, dependiendo el tipo de control a realizar, y el tipo de partículas a colectar. A nivel industrial existen los siguientes tipos (1) el precipitador de placa-alambre, la variedad más común, (2) el precipitador de placa plana, (3) el precipitador tubular, (4) el precipitador húmedo, el cual puede tener cualquiera de las configuraciones mecánicas anteriores; y (5) el precipitador de dos etapas. (2002, p. 3)

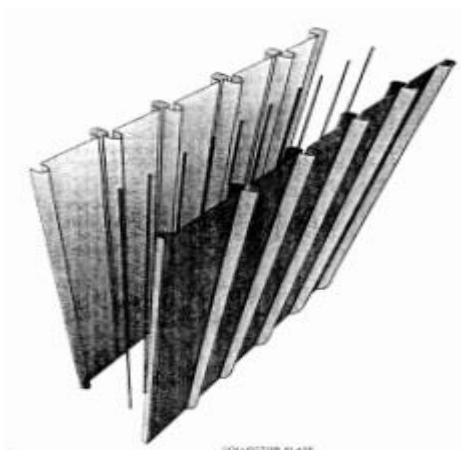
4.2.4.1.1 Precipitadores de Placa-Alambre. Las aplicaciones industriales de los PESs de placa-alambre han sido amplia, incluyendo calderas que queman carbón, hornos de cemento; incineradores de residuos no-peligrosos; calderas de recuperación en plantas de papel; unidades de refinación de petróleo por desintegración catalítica; plantas de sinterización; hornos básicos de oxígeno; hornos de chimenea abierta; hornos de arco eléctrico; baterías de hornos de coque y hornos de vidrio (EPA, 2002, pág. 3).

El funcionamiento de un PESs de placa-alambre es descrito por la agencia de protección ambiental EPA cuando afirma que:

En un PESs de placa-alambre el gas fluye entre placas paralelas de metal y electrodos a alto voltaje. Estos electrodos son alambres largos con pesas, colgando entre las placas o soportados ahí por estructuras tipo viguetas (armazones rígidas). En cada dirección de flujo, el flujo del gas debe pasar por cada alambre en secuencia a medida que fluye a través de la unidad. (2002, pág. 3).

Figura 4

Configuración PESs placa-alambre



Fuente: EPA,2002.

4.2.4.1.2 Precipitadores de Placa-plana. Este tipo de precipitador utiliza placas planas en lugar de alambres para los electrodos a alto voltaje. Estas placas planas (patente de la Corporación United McGill), incrementa el campo eléctrico promedio que es aprovechado para recolectar las partículas y proporcionan un área superficial aumentada para la recolección de las partículas. Simultáneamente, las coronas no pueden generarse sobre las placas planas por sí mismas, de tal modo que se colocan electrodos generadores de coronas por delante de, y a veces por detrás de las zonas de recolección de las placas planas. Estos electrodos pueden ser agujas puntiagudas adheridas a los bordes de las placas o alambres de corona independientes. (EPA, 2002).

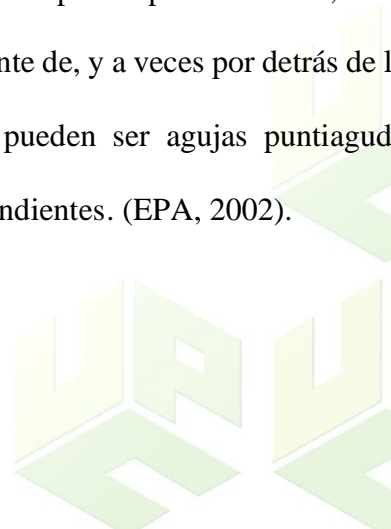
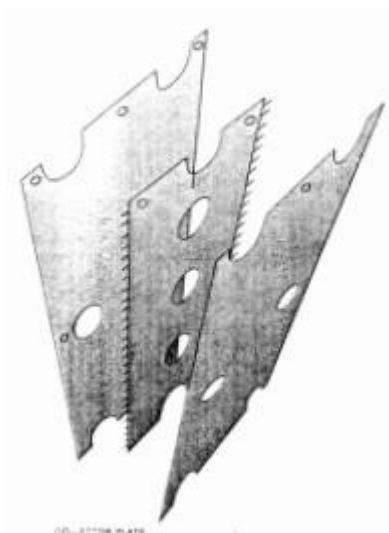


Figura 5

Configuración PESs placa-alambre

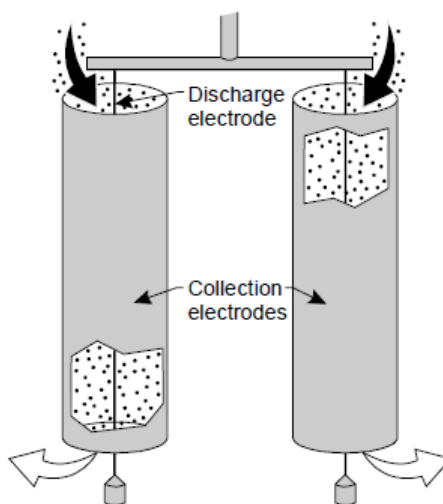


Fuente: EPA, 2002.

4.2.4.1.3 Precipitadores Tubulares. Este tipo de precipitador es básicamente una unidad de una etapa y es única, en que tiene a todo el gas pasando a través de la región del electrodo. El electrodo a alto voltaje trabaja a un voltaje en toda la longitud del tubo y la corriente varía a lo largo de su longitud a medida que las partículas son removidas del sistema. Los tubos pueden tener forma como un panal circular, cuadrado o hexagonal con el gas fluyendo hacia arriba o hacia abajo. La longitud de los tubos puede seleccionarse según las condiciones. (EPA, 2002).

Figura 6

Configuración PESs Tubular.



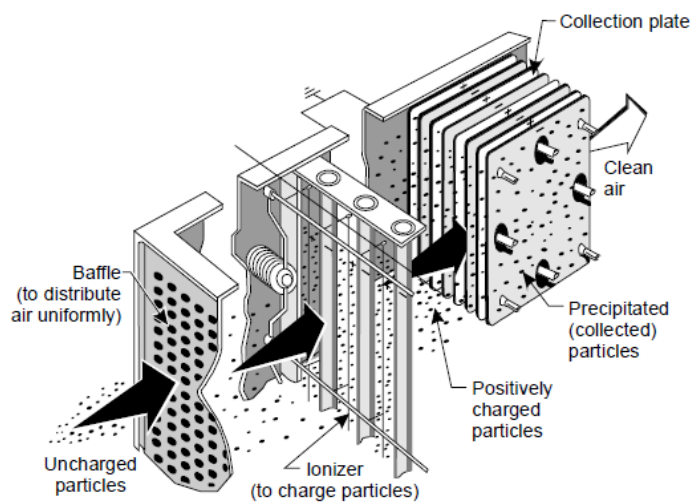
Fuente: Globalspec, (2021).

4.2.4.1.4 Precipitadores Húmedos. Cualquiera de las configuraciones del precipitador discutidas anteriormente puede operar con paredes húmedas en vez de secas. El flujo del agua puede aplicarse intermitente o continuamente, para lavar las partículas recolectadas hacia un cárcamo para su disposición. La ventaja del precipitador de pared húmeda es que no tiene problemas con el reencauzamiento por golpeo o con coronas invertidas. (EPA, 2002, pág. 9).

4.2.4.1.5 Precipitadores de dos Etapas. El precipitador de dos etapas, inventado por Penney es un dispositivo en serie con el electrodo de descarga o ionizador, precediendo a los electrodos de recolección. Para aplicaciones en interiores, la unidad es operada con una polaridad positiva para limitar la generación de ozono. Las ventajas de esta configuración incluyen más tiempo para cargar las partículas, menos propensión a corona invertida y construcción económica para tamaños pequeños. (EPA, 2002).

Figura 7

Configuración PESs de dos etapas.



Fuente: Khaddam Fuliful, (2017).

4.2.4.2 Componentes del PESs. Todos precipitadores electrostáticos independientemente de sus características particulares tienen en común los siguientes componentes principales:

- Estructura del precipitador.
- Zona de tratamiento.
- Electrodo de descarga.
- Electrodo de colección (colectores).
- Tolva.
- Mecanismos de descarga.
- Aisladores.



- Sacudidores y vibradores.
- Circuito eléctrico.

4.2.4.3 Teoría de la Precipitación Electrostática. Las acciones principales son cargar eléctricamente las partículas y posteriormente forzarlas hacia las placas recolectoras. Es importante tener muy presente que la cantidad de materia particulada cargada, afecta al punto de operación eléctrico del PES. Por otra parte, el transporte de las partículas se afecta por el nivel de turbulencia en el gas. las principales influencias en el comportamiento total del sistema están dadas por las pérdidas mencionadas anteriormente, el escabullimiento y el reencauzamiento por el golpeteo. Las propiedades de partícula también causan un efecto importante en la operación de la unidad. (EPA, 2002, p. 12)

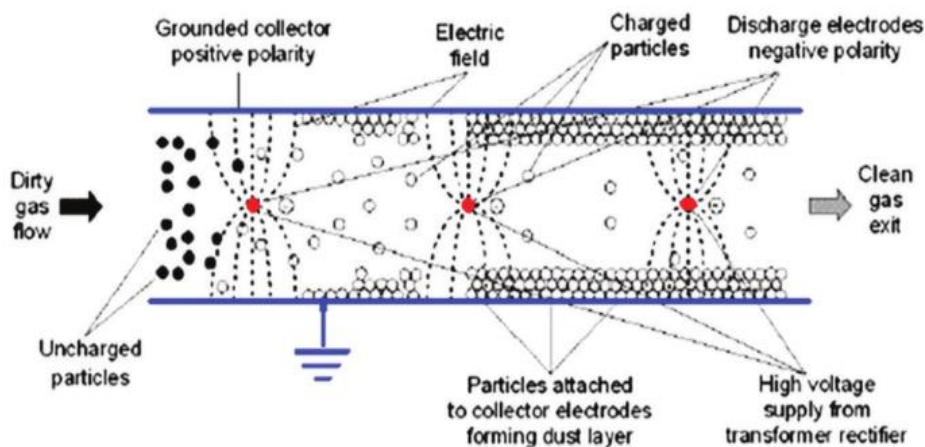
4.2.4.3.1 Descripción del fenómeno físico. Fonseca realizó el estudio y Evaluación Del Precipitador Electrostático en Cementos Bío Bío en el cual describe el fenómeno físico de un precipitador así:

Un precipitador electrostático es un dispositivo utilizado para el control de partículas basado en fuerzas eléctricas. Un alto voltaje (45.000 a 70.000 V) es aplicado a un alambre ubicado en el centro del precipitador. La pared externa del precipitador se conecta a tierra a potencial cero. Al alambre en el centro del precipitador se lo denomina electrodo de descarga y a la pared externa electrodo colector. El electrodo de descarga mantiene un potencial negativo respecto del electrodo colector y así el campo eléctrico está dirigido hacia el alambre. El campo eléctrico cerca del alambre alcanza valores suficientemente

altos como para provocar una corona de descarga en torno a él y la formación de electrones e iones negativos como por ejemplo los del O₂. A medida que los electrones y los iones negativos son acelerados hacia el electrodo colector por las líneas del campo eléctrico no uniforme las partículas que se encuentran suspendidas en la corriente de gas ingresante, que fluye horizontalmente y paralelo a las placas verticales, se cargan por las colisiones y la captura de iones y llegan a depositarse en la superficie de los electrodos colectores. De este modo el gas sale del precipitador prácticamente libre de impurezas. Puesto que las partículas mayores de 10 μ de diámetro absorben varias veces más iones que las menores de 1 μ de diámetro, las fuerzas eléctricas son mucho más fuertes en las partículas mayores. El hecho de impartir una polaridad negativa a los electrodos se debe a que una corona negativa tolera un voltaje más alto antes de producir chispa a que una corona positiva. Debido al espacio libre necesario en la parte superior del precipitador electrostático una fracción del gas se desvía alrededor de las zonas de carga. A este fenómeno se lo llama “fuga furtiva” e impone un límite máximo a la eficiencia de recolección. A medida que las partículas comienzan a depositarse sobre la superficie colectora, el espesor de la capa de material particulado se incrementa. Como consecuencia de esto el campo eléctrico va disminuyendo por lo que es necesario golpear periódicamente las superficies colectoras, el material cae y se recoge en el fondo, en tolvas de recolección. Sin este golpe periódico y la consecuente disminución en la recolección, la eficiencia del precipitador electrostático se ve disminuida. (2018, p. 8)

Figura 8

Representación del funcionamiento básico de un PES



Fuente: Taha Ahmad, (2018).

A continuación, se explica la teoría base de los puntos de operación eléctricos en el PES, carga de partículas, recolección de partículas.

4.2.4.3.2 Punto de Operación Eléctrico. En cuanto al punto de operación eléctrico de una sección de PES 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 placas y electrodos en la dirección del flujo. Esta unidad es comúnmente llamada un “campo” y una “sección” o “sección conductora” representa una subdivisión de un “campo” perpendicular a la dirección del flujo. (EPA, 2002, p. 12)

El campo en la superficie del alambre está dado por:

$$E_c = 3.126 \times 10^6 d_r \left[1 + 0.0301 \left(\frac{d_r}{r_w} \right)^{0.5} \right] \quad (2)$$

Donde:

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

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

r_w = radio del alambre, metros (m).

4.2.4.3.2.1 Intensidad de campo eléctrico. La intensidad de campo eléctrico se puede calcular dividiendo el voltaje aplicado y la distancia heteropolar (la medida entre el electrodo de descarga y la placa colectora).

$$E = \frac{V}{b} \quad v/m \quad (3)$$

Donde:

E = Intensidad de campo eléctrico. (V/m)

V = Voltaje aplicado (V)

b = Distancia heteropolar.

4.2.4.3.3 Ionización de partículas. Básicamente es el fenómeno que ocurre dentro del equipo, cuando las partículas son cargadas negativamente o positivamente gracias a los electrodos de descarga en el centro de éste. Estas partículas son atraídas a los electrodos de recolección (cargadas positivamente), debido al campo eléctrico generado dentro del dispositivo. (Fonseca, 2018).

4.2.4.3.4 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 como la carga real está por encima de ella. (EPA, 2002, p. 15)

Existen 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. (EPA, 2002). La diferencia entre estas dos radica en el tamaño de la partícula, ya que para la carga por campo domina más para tamaño mayores a 1µm.

La carga por campo eléctrico según DE NEVERS, (2000, pág. 242) está dada por:

$$q_c = \left(\frac{3k}{k+2} \right) \pi \epsilon_0 d^2 E \quad (4)$$

Fuente: (Mamani Revilla, 2019).

Dónde:

q_c: Carga por campo [C]

E: Intensidad de Campo eléctrico [V/m] [N/C]

k: Constante dieléctrica de la partícula [adimensional]



d: Diámetro de la partícula [m]

ϵ_0 : Permitividad del espacio vacío [C²/Nm²]

k=1.0 (vacío-aire) y 4<k<8 (partículas sólidas-aire).

Cuando una partícula ya no recibe carga de iones, se dice que se ha saturado. Las partículas cargadas saturadas emigran al electrodo de recolección Fernández Sandoval, (2008) cómo se citó en Mamani Revilla, (2019, p. 66)

Según la agencia de protección ambiental EPA a carga de saturación está dada por:

$$q_s = 12\pi\epsilon r^2 E \quad (4.2)$$

Fuente: (EPA, 2002, p. 16)

Donde:

ϵ_0 = Permitividad de espacio libre (F/m)

E = campo eléctrico externo aplicado a la partícula (V/m).

R² = diámetro de la partícula.

La carga por difusión se obtiene según Parker & Plaks (2004, págs. 2-3) con la ecuación:

$$q_d = \frac{1}{2} \frac{dKT}{q_e^2} \quad (4.1)$$

Fuente: Mamani Revilla (2019, pág. 67)

Dónde:

qd: Carga por difusión [C]

d: Diámetro de la partícula [m]



K: Constante de boltzmann [J/K]

K $\approx 1.38 \times 10^{-23}$

T: Temperatura absoluta [K]

qe: Carga del electrón [C]

qe $\approx 1.67 \times 10^{-19}$

4.2.4.3.5 Recolección de la Partícula. El campo eléctrico en la zona de recolección produce una fuerza sobre una partícula, proporcional a la magnitud de su campo y a la carga, Debido a que el mecanismo de carga por campo proporciona una carga última proporcional al campo eléctrico, la fuerza sobre las partículas grandes es proporcional al cuadrado del campo, lo cual muestra la ventaja de mantener un campo tan alto como sea posible.

Donde:

$$F_e = qE$$

(5)

F_e = fuerza debida al campo eléctrico

$(N)q$ = carga en la partícula (C)

E = campo eléctrico (V/m)

4.2.4.3.5.1 Velocidad de migración. Poco tiempo después que las partículas son cargadas o ionizadas, estas migran hacia la superficie o placa colectora y adherirse a esta, las cuales se mantienen ahí hasta que la placa sea limpiada, este movimiento hacia se da por las fuerzas electrostáticas producidas por el campo eléctrico.

La velocidad de migración w es el resultado del balance entre la fuerza electrostática, gracias a la carga Fe , y la fuerza de arrastre, Fd , ejercida por el aire debido a la relación del movimiento entre el aire y las partículas, es decir la capacidad de recopilación de partículas dentro de los límites del PES. Rodríguez et al. (2017).

Según Theodore (2008, p. 407) está dada por la ecuación:

$$W = \frac{q_t E}{3\pi\mu d} \quad (6)$$

Fuente: Mamani Revilla (2019, pág. 68).

Donde:

w: Velocidad de migración [m/s]

d: Diámetro de la partícula [m]

E: Intensidad de campo eléctrico [V/m] [N/C]

μ : Viscosidad dinámica del gas [Kg/ms]

qt: Carga total de la partícula [C]

Otra forma de calcular la velocidad de migración es:

$$\omega = \frac{C_u q E}{3\pi\mu d_p} \quad (6.1)$$

Fuente: Li et al. (2019)

Donde:

C_u : coeficiente de corrección Cunningham.



Que se calcula con la ecuación:

$$C_u = 1 + (2\lambda/d_p) \left[1.257 + 0.4 \exp\left(-\frac{0.55d_p}{\lambda}\right) \right] \quad (7)$$

Fuente: Li et al. (2019)

Donde λ es el camino libre promedio de las moléculas de gas ($\approx 0.066 \times 10^{-6}$ m).

4.2.4.3.6 Eficiencia de recolección. La eficiencia del precipitador generalmente está por encima de valores de 98%, esto depende de muchos parámetros y condiciones físicas, como son el tamaño y tipo de partículas, voltaje aplicado, geometría, temperatura del gas, velocidad de flujo volumétrico y otros fenómenos físicos que se presentan dentro del PES.

La fórmula clásica utilizada para obtener este parámetro es la fórmula de Deutsch, que esta expresada por:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A\omega}{Q}\right) \quad (8)$$

Fuente: Li et al. (2019)

Fuente: Mamani Revilla (2019, pág. 69)

Dónde:

n: Eficiencia de recolección del PES

W: Velocidad de migración [m/s]

A: Área de la placa de recolección efectiva del PES [m²]

Q: Razón de flujo de gas a través del PES. [m³/s]

e (exp): Base de logaritmo natural ≈ 2.718

4.2.4.4 Principales parámetros del PES. Para el diseño de un precipitador electrostático se deben calcular los siguientes parámetros que influyen significativamente en funcionamiento y la eficiencia del sistema.

Tabla 1

Parámetros del PESs

<p>SCA (El área de recolección específica (SCA)).</p>	<p>Es un parámetro utilizado para comparar PESs y estimar burdamente su eficiencia de recolección. El SCA es el área total de la placa recolectora dividida por la rapidez de flujo volumétrico del gas y tiene unidades de s/m o s/pie.</p>
<p>Voltaje – corriente V/I.</p>	<p>Este se necesita aplicar una diferencia de potencial para crear la intensidad de campo eléctrico.</p>
<p>Diferencia de potencial suministrado</p>	<p>Este parámetro es el que interviene en el funcionamiento del equipo y la aplicación de la intensidad de campo eléctrico entre electrodo y la placa colectora.</p>
<p>Intensidad de campo eléctrico.</p>	<p>Parámetro de mucho interés en el rendimiento del equipo, sobre todo en ionizar material particulado, influyendo en la eficiencia del PES.</p>

Distancia entre el electrodo y el colector.	La distancia entre el electrodo y la placa colectora influye en el funcionamiento del equipo y la creación de la corona eléctrica, ya que el diseño tendrá que ser el eficiente para crear una atmosfera de ionización requerida para cargar las partículas y un efecto corona optimo antes de que se produzca la chispa.
Forma geométrica del electrodo.	La geometría del electrodo influye en la generación del efecto corona, en él se forma la corona de iones y la dispersión de corona eficiente para luego ionizar las partículas y llevarlas a la placa colectora
Tamaño de la partícula.	El tamaño de la partícula tiene mucha influencia en el precipitador electrostático, ya que de acuerdo con su tamaño será diseñado el PES, y se verá muy influenciado en la carga por ionización, afectándola colección en las placas.
Tipo de material a recolectar.	Indica los diferentes tipos de material particulado a coleccionar, estos son según el tipo de material a transportar, ya sea en diferentes industrias de aplicación.
Velocidad de las partículas.	Al ingresar a la cámara, la mezcla aire-material particulado con una velocidad muy alta, fuera del requerido por el diseño, no permite que se ionice las partículas, por lo cual no podrá ser recolectado. Debe seleccionarse una velocidad optima que se

	acomode a los requerimientos eléctricos y estructura física (el espaciado alambre-placa).
Resistividad de las partículas.	Es un factor que afecta a la eficiencia de recolección del precipitador electrostático, la resistividad es la resistencia eléctrica que puede describir como la resistencia a la transferencia de carga del polvo.
Acumulación de MP en las placas.	Al acumularse material particulado en la placa colectora hace que las demás partículas que migren hacia la placa colectora no puedan ceder su carga o descargarse para poderse desprender fácilmente mediante el mecanismo de sacudido.
Dimensiones del equipo.	Las dimensiones del equipo es un factor de diseño según la cantidad de polvo extraer y el flujo de mezcla aire y material particulado a colectar.
Concentración de MP en la entrada y salida.	Parámetro que debe determinarse ya que es indispensable para obtener la eficiencia del sistema.
Aislamiento eléctrico.	Es un parámetro muy importante ya que el equipo tendrá que estar aislado, es decir el electrodo será aislado y la placa colectora será también aislado.
Eficiencia del equipo.	Parámetro que indica que tan eficaz trabaja en la recolección del material particulado que ingresa al precipitador electrostático.

Fuente: Mamani Revilla, (2019, pág. 81)

4.2.5 Reutilización de residuos

Los residuos electrónicos son clasificados como fuente útil para la recuperación de unidades, piezas y materiales aprovechables como los que poseen televisores, computadores, entre otros dispositivos que normalmente son reutilizables. Esto trae como consecuencia que se reduzcan los procesos de extracción para lograr estos materiales, y de igual manera se reducen los impactos ambientales que estas actividades llevan consigo. De manera que al implementar la reutilización de residuos electrónicos en el desarrollo de esta investigación se está aportando a minimizar las afectaciones al ambiente, ya que se estará incorporando materiales aun dispositivos que tiene como finalidad reducir la contaminación por material particulado. (Autores ,2021).

4.3 Marco Conceptual

Aire: Fluido que forma la atmósfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica.

Área-Fuente: Es una determinada zona o región, urbana, suburbana o rural, que, por albergar múltiples fuentes fijas de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de sustancias contaminantes del aire.

Atmósfera: Es la capa gaseosa que rodea a la Tierra.

PM10 (Material Particulado Menor a 10 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales.



PM2.5 (Material Particulado Menor a 2,5 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros nominales.

CO (Monóxido de carbono): Gas inflamable, incoloro e insípido que se produce por la combustión de combustibles fósiles.

Contaminación Atmosférica: Es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire.

Contaminantes: Fenómenos físicos o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de éstas.

Emisión: Descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.

NO2 (Dióxido de Nitrógeno): Gas de color pardo rojizo fuertemente tóxico cuya presencia en el aire de los centros urbanos se debe a la oxidación del nitrógeno atmosférico que se utiliza en los procesos de combustión en los vehículos y fábricas.

Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión: Es el nivel de concentración legalmente permisible de sustancias o fenómenos contaminantes presentes en el aire, establecido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

Fuente de Emisión: Actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire.

Fuente Fija: Fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

Fuente Móvil: Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

Inmisión: Transferencia de contaminantes de la atmósfera a un “receptor”. Se entiende por inmisión a la acción opuesta a la emisión. Aire inmiscible es el aire respirable a nivel de la troposfera.

Alimentador eléctrico: Circuito normalmente conectado a una estación receptora, que suministra energía eléctrica a uno o varios servicios directamente a varias subestaciones distribuidoras.

Campo eléctrico: Un campo eléctrico es un campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas (la causa del flujo eléctrico) y se mide en Voltios por metro (V/m). El flujo decrece con la distancia a la fuente que provoca el campo.

Carga: Cantidad de potencia que debe ser entregada en un punto dado de un sistema eléctrico.

Circuito: Trayecto o ruta de una corriente eléctrica, formado por conductores, que transporta energía eléctrica entre fuentes.

Potencia: Es el trabajo o transferencia de energía realizada en la unidad de tiempo. Se mide en Watt (W).

Resistencia: Cualidad de un material de oponerse al paso de una corriente eléctrica. La resistencia depende de la longitud del conductor, su material, de su sección y de la temperatura del mismo. Las unidades de la resistencia son Ω .

Sistema eléctrico: Instalaciones de generación, transmisión y distribución, físicamente conectadas entre sí, operando como una unidad integral, bajo control, administración y supervisión.

4.4 Marco Legal

Colombia para reducir y mitigar los contaminantes presentes en la atmosfera, así como también controlar y regular las emisiones atmosféricas, se rige por diferentes leyes, decretos y resoluciones, que a lo largo de la historia se han venido modificando, de manera que sean puntuales y eficaces; que contribuyan para la protección y el mejoramiento de la calidad del recurso aire.

Tabla 2

Normatividad aplicada en Colombia para control de contaminación atmosférica.

Título De La Norma	Contenido	Aplicabilidad
Decreto 948 de 1995	Por el cual se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 75 del Decreto-Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la	En aras de mejorar la calidad de aire en el territorio colombiano, es indispensable la utilización de tecnologías de control para

Ley 99 de 1993, en relación con contaminantes la prevención y control de la atmosféricos, es por eso contaminación atmosférica y la que deben implementar protección de la calidad del aire. tecnologías como lo es nuestro prototipo de precipitador electrostático.

Decreto 2107 de 1995 Por medio del cual se modifica parcialmente el decreto 948 de 1995 que contiene el reglamento de protección y control de la calidad del aire.

Decreto 1697 de 1997 Por medio del cual se modifica parcialmente el decreto 948 de 1995 que contiene el reglamento de protección y control de la calidad del aire.

Decreto 979 de 2006	<p>Por el cual se modifican los artículos 7°, 10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995.</p>
Resolución 005 de 1996	<p>Por la cual se reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diésel, y se definen los equipos y procedimientos de medición de dichas emisiones y se adoptan otras disposiciones.</p> <p>Las áreas comunes se ven afectadas por el tránsito de fuentes móviles, una buena manera de medir y capturar partículas para hacer estudios es utilizar un precipitador electrostático</p>
Resolución 058 de 2002	<p>Por la cual se establecen normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos.</p> <p>Una buena propuesta para controlar el material particulado en estos sitios es la instalación de un precipitador electrostático para que disminuya las emisiones atmosféricas</p>

Resolución 886 de 2004	<p>Por la cual se modifica parcialmente la Resolución número 0058 del 21 de enero de 2002 y se dictan otras disposiciones.</p>
Resolución 3500 de 2005	<p>Por la cual se establecen las condiciones mínimas que deben cumplir los Centros de Diagnóstico Automotor para realizar las revisiones técnico mecánica y de gases de los vehículos automotores que transiten por el territorio nacional.</p> <p>Este prototipo puede ser una herramienta para medir el nivel de contaminación en los centros de diagnósticos Automotor.</p>
Resolución 653 de 2006	<p>Por la cual se adopta el procedimiento para la expedición de la certificación en materia de revisión de gases, a</p>

	que hace referencia el literal e) del artículo 6° de la Resolución 3500 de 2005.
Resolución 601 de 2006	Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.
Resolución 610 de 2010	Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006.
Resolución 650 de 2010	Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.
Resolución 651 de 2010	Por la cual se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire –SISAIRE. Este prototipo puede adaptado para integrar al sistema de mediciones y entregar información de

		la calidad de aire en tiempo real.
Resolución 2154 de 2010	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.	Mediante este protocolo se pueden validar los niveles máximos permisibles de contaminantes y de ahí tomar decisiones para mejorar la calidad aire.
Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.	Es importante porque muestra los niveles de inmisión a la cual deben estar expuestos las personas, entonces nuestro prototipo puede contribuir en las áreas comunes al mejoramiento de la calidad de aire.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), (2017).

4.5 Marco Contextual

Una de las características principales del prototipo de precipitador electrostático a diseñar y construir, es que este se puede instalar en diferentes áreas comunes, ya que por su portabilidad, este dispositivo puede colocarse fácilmente en cualquier lugar donde se requiera, como puede ser, en una zona residencial, un hospital, oficinas, restaurantes, parqueaderos, salones de cualquier índole, parques, centros comerciales en otros sitios, en donde se identifique la presencia de material particulado en suspensión. Por esta razón esta investigación no tiene una delimitación o espacio definido para su aplicación.

Figura 9

Imágenes de áreas comunes, Avenida Fundación.



Elaboración propia, 2021

Figura 9.1

Imágenes de áreas comunes, Universidad Popular del Cesar.





Elaboración propia, 2021

Figura 9.2

Imágenes de áreas comunes, carrera 31 Valledupar.



Elaboración propia, 2021

Figura 9.3

Imágenes de áreas comunes, mercado público Valledupar.





Elaboración propia, 2021.

Figura 9.4

Imágenes de áreas comunes, Universidad Popular del Cesar.



Elaboración propia., 2021

Figura 9.5

Imágenes de áreas comunes, carrera 31 Valledupar.



Elaboración propia, 2021

Figura 9.6

Imágenes de áreas comunes, Obelisco Valledupar.



Elaboración propia, 2021.

Figura 9.6

Imágenes de áreas comunes, obelisco Valledupar.





Elaboración propia, 2021

5. Marco Metodológico

5.1 Línea de Investigación

La línea de investigación de este proyecto es Sostenibilidad y Gestión Ambiental, que a su vez tiene la sublínea de investigación; gestión integral de la calidad del aire, la cual contiene, áreas temáticas según las sublíneas de investigación como lo es; uso y desarrollo de tecnologías para el control de las emisiones y la contaminación atmosférica.

5.2 Tipo de investigación

La investigación llevada a cabo en este trabajo es de tipo experimental, en la cual el investigador, manipula una variable experimental no comprobada Palella & Martins, (2010) es



decir; las variables son controladas de tal forma que se esperan distintos resultados para llegar a una conclusión de una hipótesis planteada.

Este tipo de investigación es fundamental para cualquier tipo de trabajo que se quiera llevar a cabo, para continuar con una investigación más rigurosa, de igual forma, la información obtenida o planteada se podrá retomar para nuevas investigaciones.

5.3 Población de estudio y muestra

La población objeto de estudio de esta investigación, son todas las personas que están bajo la influencia del material particulado, que en mayor y menor proporción su salud es afectada. La muestra para este trabajo es el material particulado, ya que este será el contaminante a tratar, y por tanto el principal indicador que servirá para hacer comparaciones en materia de reducción.

5.4 Desarrollo Metodológico

Para lograr el cometido de este proyecto, se llevaron a cabo una serie de actividades inherentes a los objetivos específicos. La siguiente metodología se desarrolló por etapas.

5.4.1 Etapa 1. Determinar el tipo, características y componentes que integraran el prototipo de precipitador electrostático, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, como la humedad, temperatura y precipitaciones en áreas comunes.

Para lograr este objetivo planteado fue necesario efectuar las siguientes actividades:

Actividad 1.1 Revisión Bibliográfica y selección de tipo de Precipitador electrostático.

Descripción: Para obtener toda la información necesaria se hizo una revisión e investigación minuciosa de diferentes fuentes bibliográficas, como proyectos o tesis de

investigación, artículos o papers científicos, revistas indexadas, documentos, diferentes sitios web, libros, tiendas virtuales, páginas web regionales, nacionales, agencias y organizaciones internacionales, que permitieron seleccionar el tipo y características del precipitador electrostático diseñado.

Actividad 1.2 Secciones y partes del precipitador electrostático

Descripción: Se determinaron las secciones que conforman el prototipo de precipitador electrostático, considerando: La zona de entrada de gas, sección de principio electrostático, etapa de ionización, etapa de colección, sistema de succión de salida de partículas y la configuración del circuito para generar el voltaje. Posteriormente, se elaboró un listado de las secciones y partes que integraron el prototipo.

Actividad 1.3: Materiales utilizados para construcción del PES.

Descripción: Definidas las secciones y partes del sistema, se determinaron los materiales aprovechables que se utilizaron como partes del PES, para ello se tuvo en cuenta cada una de las etapas internas del prototipo. En este apartado se describen los componentes y el porqué de su elección.

5.4.2 Etapa 2. Verificar las características técnicas de los residuos electrónicos para su reutilización como componentes del PES.

Actividad 2.1 Consecución de materiales reutilizables

Descripción: Se logró la consecución los residuos o elementos aprovechables que conformaron prototipo de precipitador electrostático. Para la adquisición de materiales se llegó a sitios de acopio y chatarrerías en donde se almacenan materiales de este tipo.

Actividad 2.2 Evaluación de condiciones físicas de los materiales

Descripción: Se realizar pruebas de calidad a los residuos aprovechables seleccionados, de esta forma se eligieron los que presentaron mejores condiciones de durabilidad; resistencia a condiciones atmosféricas, utilidad y funcionalidad.

5.4.3 Etapa 3. Evaluar la eficiencia del precipitador, en función de la potencia de voltaje aplicado, distancia entre los electrodos, velocidad entrada de flujo y tiempo de residencia.

Después de adquirir y seleccionar los residuos aprovechables que cumplieran con las características requeridas, se procedió a realizar los cálculos para el diseño, luego la construcción del prototipo, así como también, la ejecución de pruebas experimentales, por último, la evaluación de la eficiencia del prototipo de precipitador electrostático.

Actividad 3.1 Cálculos de diseño

Descripción: Se realizaron los cálculos de diseño del prototipo de precipitador electrostático, ajustándolo a las características de material particulado a remover y las condiciones ambientales definidas. En este procedimiento se utilizó como referencia la metodología de la agencia de protección ambiental EPA, (2002) esta estipula los diferentes parámetros y variables a considerar para el diseño de los precipitadores electrostáticos existentes a nivel industrial. De igual manera se tomó como referencia la metodología aplicada por Mamani Revilla, (2019).

Actividad 3.2 Construcción y ensamblaje del precipitador electrostático

Descripción: Luego de establecer el diseño final del prototipo, se llevó a cabo su construcción, para este proceso se construyó y se ensamblaron los componentes del precipitador, como lo son: cámara de entrada de gas, sección de principio electrostático, etapa de ionización,

etapa de colección, sistema de succión de partículas con ventiladoras, la configuración del circuito para generar el voltaje y la ubicación de otros dispositivos auxiliares como sensores de cantidad de material particulado.

Actividad 3.3 Distancia entre los electrodos de descarga y placas colectoras

Descripción: Se ajusto experimentalmente la distancia entre los electrodos de descarga y las placas colectoras, para esto se midió el espacio mínimo a la cual se formaba un arco eléctrico, determinando el espacio entre estas dos secciones.

Actividad 3.4 Pruebas experimentales de eficiencia del prototipo de precipitador electrostático.

Descripción: Se realizaron las pruebas experimentales para determinar el rendimiento del precipitador, para ello se definió el tiempo de funcionamiento, durante ese periodo se tomaron lecturas utilizando un sensor de calidad de aire ubicado en salida del prototipo. Para el cálculo de la eficiencia se usó la ecuación (1.2).

6. Resultados y análisis

6.1. Resultados de la etapa 1. Determinar el tipo, características y componentes que integraran el prototipo de precipitador electrostático, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, como la humedad, temperatura y precipitaciones en áreas comunes.

Para lograr este objetivo planteado fue necesario llevar a cabo las siguientes actividades las cuales dieron los resultados continuación.

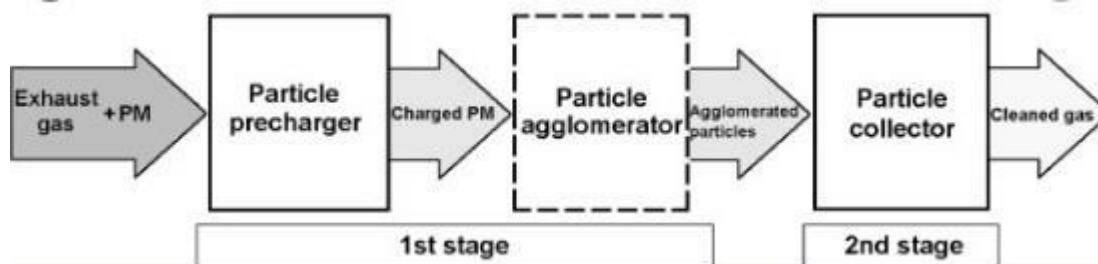
6.1.1 Revisión Bibliográfica y selección de tipo de Precipitador electrostático.

En consideración con la información recolectada, la selección del tipo de PES estuvo basada en factores como la eficiencia en la recolección de partículas, tamaño del prototipo, existencia de información para el cálculo de parámetros de diseño, el tipo y tamaño de MP a tratar, características físicas internas y externas del PES, principio de funcionamiento, facilidad y practica al construir, ya que los materiales utilizados la mayoría fueron usados o reciclables, por último, economía para la consecución de materiales.

De acuerdo con los factores mencionados el tipo de PES escogido fue el de dos etapas, que cuenta con un electrodo de descarga ionizador en la primera etapa, precedido de una segunda etapa conformada de placas recolectoras, esta configuración ofrece ventajas en el tiempo de carga de partículas, menos efecto de corona invertida y menor costo de construcción y manejo volúmenes de gas pequeños en comparación con los más grades.

Figura 10

Secciones básicas del PES de dos etapas



Fuente: Jaworek.et al, (2018).

6.1.2 Secciones y partes del precipitador electrostático

Luego de ser seleccionado el tipo de PES, procedimos a determinar las secciones de operación y componentes, se tuvo en consideración que este dispositivo no estaría conectado a una fuente directa de emisión, ya que su función principal es recolectar MP en distintos puntos de una ciudad, definido por los autores como áreas comunes.

Prefiltro: se optó por disponer de un filtro en la zona de entrada de MP, con la finalidad de acondicionar el flujo de aire antes de la ionización, de igual forma para proteger el dispositivo de objetos o partículas extrañas que pueda obstruir o dañar el PES.

Carga de partículas o ionización: esta es la primera etapa del principio de funcionamiento, para inducir la carga a las partículas, se utilizó como configuración en paralelo electrodos o varillas de descarga, separados a una distancia mínima que al aplicarle un voltaje lo suficientemente grande, forme la corona de energía necesaria para ionizar las partículas.

Placas Colectoras: esta es la segunda etapa del principio de funcionamiento, en esta se usó un conjunto de placas planas dispuestas en serie con una separación mínima para aumentar la capacidad de colección del PES y mejorar su eficiencia.

Extractores o ventiladores: a diferencia de los PES industriales que están conectados a una fuente de emisión directa como por ejemplo una chimenea, las partículas se mueven hacia el colector por presión y características de movimiento de los gases, en el presente modelo las partículas son dirigidas hacia el PES por acción de succión de las extractoras que están en la etapa final o zona de salida.

Sistema para generación de alto voltaje: De acuerdo con diferentes fuentes investigadas, encontramos suficiente material en páginas web y en la plataforma Youtube, en la que se usaba como fuente de alimentación para flyback, un balasto o balastro electrónico para luz blanca o fluorescente. Aplicamos la configuración utilizada por Buchin, (2016) para hacer un generador de ozono utilizado un balastro y un flyback. Dos materiales aprovechables y de fácil adquisición.

Sensor de calidad de aire: la eficiencia del PES depende de la concentración partículas en la entrada y la salida del proceso, para comprobar esta se utilizó un sensor de calidad de aire, ubicado a la salida del PES, con estos datos se comprobó de manera precisa la efectividad de recolección.

Figura 11

Sensor para material particulado

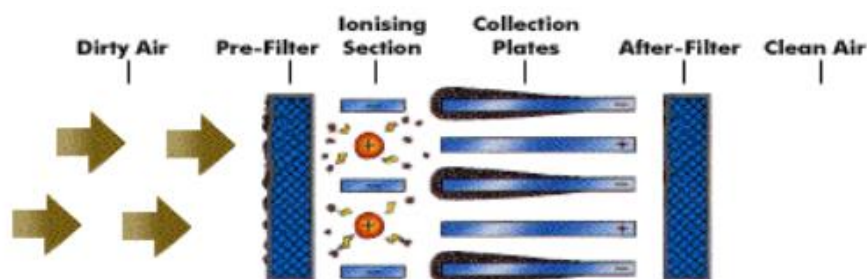


Fuente: Banggood, (2020).

Figura 12

Representación de las secciones del PES.





Fuente: Karunakaran et al. (2019, pág. 322)

6.1.3 Materiales utilizados para construcción del PES.

Definidas las secciones y componentes del sistema, procedimos a determinar qué tipo de materiales conformarían cada una de las etapas del precipitador, se buscaron similitudes entre las estructuras usadas en los PES actuales, con ciertos elementos o aparatos electrónicos si utilidad o en abandono, para ello se tuvo en consideración que residuos sin uso, podrían ser reciclados y servir para las unidades del presente modelo.

6.1.3.1 Estructura externa o cáscara del PES: Debido a que la mayoría de precipitadores electrostáticos tienen geometría cuadrada o rectangular, decidimos usar una torre o CPU de computador como estructura externa del PES, esta proporcionó las medidas del sistema, las cuales tuvimos en cuenta para diseñar todas las unidades internas.

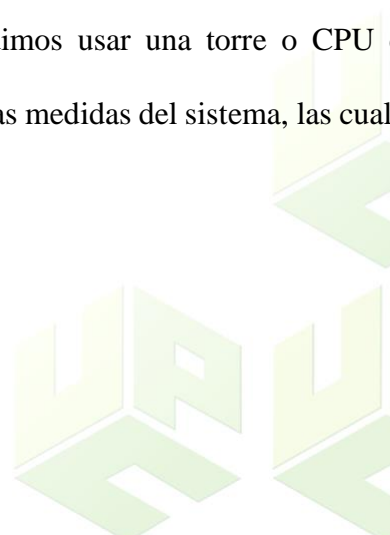


Figura 13

Chasis de CPU

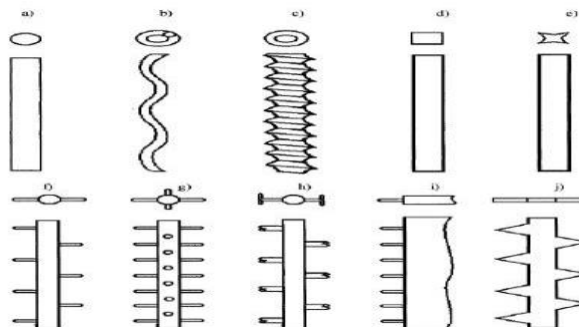


Fuente: Autores, 2021

6.1.3.2 Electrodo y malla mosquitera. Existen diferentes tipos de electrodos dependiendo de la finalidad con que se requiera, pero todos son para proporcionar la corona de energía que carga las partículas.

Figura 14

Tipos de geometría de electrodos



Fuente: Altun & Kilic, (2019, p. 4)

a) alambres o varillas lisas, **(b)** alambres helicoidales o en espiral, **(c)** alambres roscados y varillas, **(d)** varillas rectangulares o cuadradas retorcidas, **(e)** en forma de estrella varillas, **(f)** varilla con agujas dispuestas escalonadas u opuestas, **(g)** varilla con agujas dispuestas en cruz, **(h)** varilla con emisores, **(I)** placa con agujas, y **(j)** tipo banda con púa. Altun & Kilic, (2019, p. 4)

El tipo de electrodo seleccionado fue el de alambres o varillas lisas de material aluminio. Estos fueron tomados de una antena antigua de señal de Televisor. Miden 30 cm de largo y un diámetro de 0.9 mm. Adicional a estos se usó una malla mosquitera para asegurar la correcta ionización de partículas en la primera etapa del precipitador electrostático.

Figura 15

Electrodos



Elaboración propia, 2021

Figura 15.1

Malla metálica



Elaboración propia, 2021

Figura 15.1

Electrodos



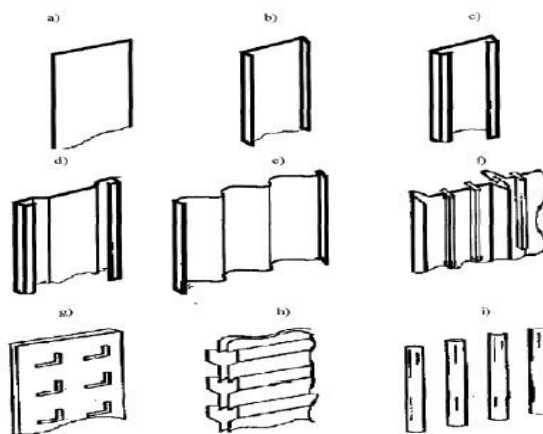


Fuente: Autores, 2021

6.1.3.4 Placas colectoras. Estas son las distintas configuraciones de placas colectoras utilizadas en los precipitadores electrostáticos.

Figura 16

Tipos de geometrías de placas colectoras.



Fuente: Altun & Kilic, (2019, p. 4)

a) placa lisa o tipo I, b) tipo U, (c) tipo C, (d) tipo G o a veces referido como tipo Z, e) tipo de onda sinusoidal, (f) tipo cerca, (g) placa con Bolsillos en L, (h) placa con bolsillos tulipa, (i) cortina de varilla. Altun & Kilic, (2019, p. 4)

La placa seleccionada para el presente modelo fue de tipo placa lisa o tipo I, ya que fue más fácil su obtención y cómoda al diseñar, para estas se usó un perfil de aluminio rectangular y a partir de este se sacaron las placas que miden 20x20 cm.

Figura 17

Placa colectora



Elaboración propia, 2021

Figura 17.1

Placa colectora





Fuente: Autores, 2021.

6.1.3.5 Extractores. estas cumplen la función de succionar el aire con partículas hacia la salida del PES.

- Marca: Hi-tronic
- Modelo: VB-12038110-7
- Voltaje: 100-125v Ac
- Corriente: 0.28 AMP
- Caudal: 0.0509 M³/s
- Frecuencia: 55-60 Hz

Figura 18

Extractor





Elaboración propia., 2021

Figura 18.1

Extractor

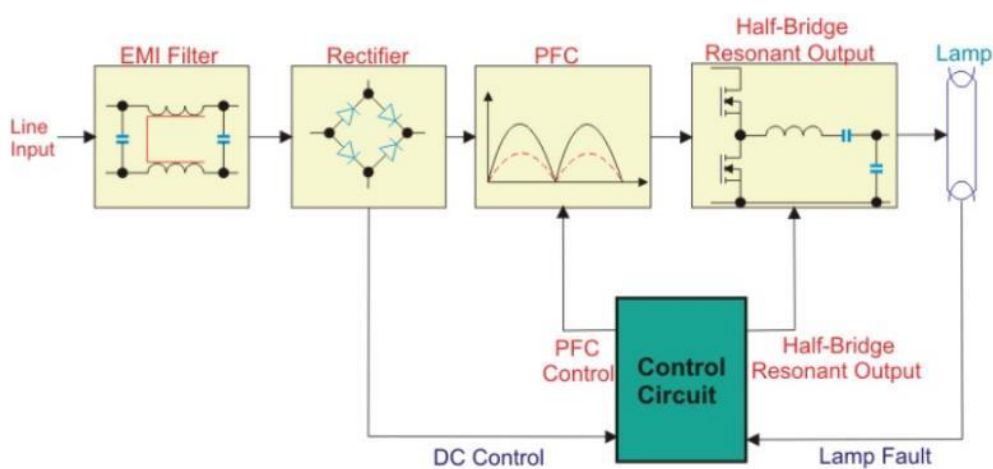


Fuente: Autores, 2021.

6.1.3.6 Circuito de alto voltaje. La fuente de alimentación del sistema está compuesta por un balastro electrónico para luz blanca o fluorescente, el cual se encarga proporcionar altas frecuencias y alta tensión para hacer excitar la bobina primaria del flyback, seguido de esto excite la bobina secundaria, logrando aumentar el voltaje de salida. (Autores, 2021).

Figura 19

Diagrama básico de un balastro.



Fuente: Top, (2020).

Balastro

Un balastro es un dispositivo que sirve para mantener un flujo corriente estable en tubos fluorescentes, lámparas PL y otras lámparas de descarga de gas. Un balastro crea un pico de tensión con el fin de hacer que la lámpara funcione. También se asegura de limitar la corriente que pasa a través de él. Lamparayluz, (2021).

El balastro electrónico toma el suministro a 50 60 Hz. Primero convierte el voltaje de CA en voltaje de CC. Después de eso, la filtración de este voltaje de CC se hace usando condensador configuración. Ahora el voltaje de CC filtrado se alimenta a la etapa de oscilación de alta frecuencia donde la oscilación es típicamente de onda cuadrada y el rango de frecuencia es de 20 kHz a 80 kHz. Top, (2020).

A continuación, se presentan las especificaciones del balastro utilizado para el circuito del prototipo.

Marca: Sylvania

Tensión de corriente: 120 V

Corriente de entrada: 0.58 A, 50/60 Hz

Potencia nominal de entrada: 66 W

Factor de potencia: 0.90

FEB: 1.25

VCA: 600V Max

Temp. de operación: 75 °C

Tipo de bombilla: Fluorescente T12 48” 2X39W

Figura 20

Balastro electrónico





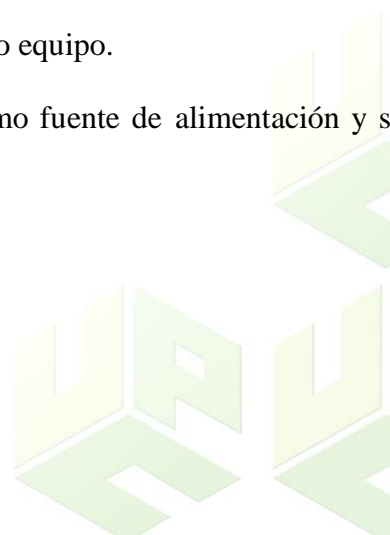
Fuente: Autores, 2021.

6.1.3.7 Transformador flyback. Los precipitadores electrostáticos industriales trabajan con voltajes altos con rangos entre (20 Kv-100 Kv), teniendo en cuenta esto, para el presente prototipo y modelamiento del mismo, se usó un transformador flyback que eleva el voltaje de (10Kv – 30Kv) en corriente directa.

Estos dispositivos los encontramos en los televisores antiguos, el cual reutilizamos para proporcionar el voltaje necesario en el funcionamiento de nuestro equipo.

Este componente trabaja con corriente directa (DC) como fuente de alimentación y sus características son las siguientes:

- Voltaje de entrada: 0 - 20 V
- Voltaje de salida: 10 Kv - 30 Kv
- Frecuencia: 15 Khz – 50 Khz
- Potencia: 50W – 150W



- Corriente directa (DC)

Figura 21

Transformador Flyback.



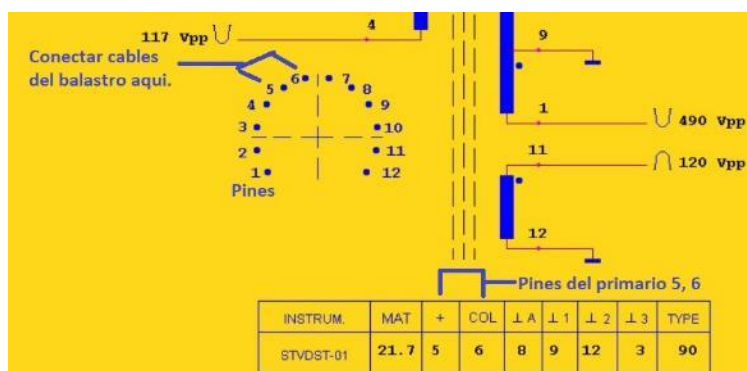
Fuente: Autores, 2021.

6.1.3.8 Diagrama del circuito de alto voltaje del PES. Este diseño se configuró para elevar la frecuencia que necesita el flyback y asegurar su correcto funcionamiento. El balastro tiene dos cables de entrada uno negro y blanco esta entrada se conectó a la corriente de casa a 120v, también tiene tres cables a la salida que van hacia los tubos fluorescentes, en este caso conectamos dos cables en los pines del primario del flyback.

Figura 22

Ubicación del primario del flyback modelo 2431723 HR 6247.

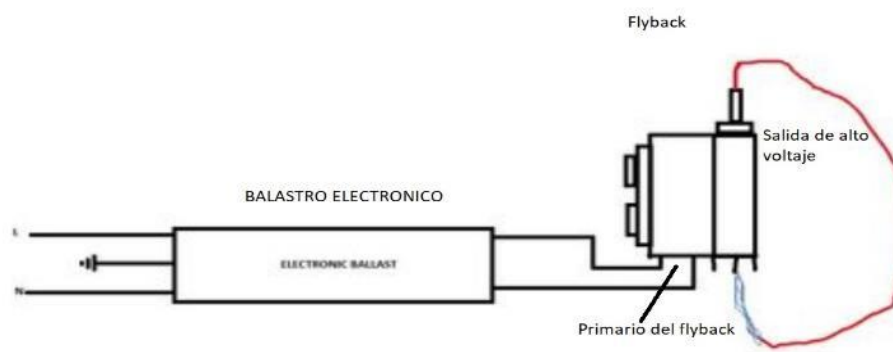




Fuente: HRDiemen, (2021).

Figura 23

Diagrama del circuito de alto voltaje del PES.



Fuente: Askix, (2021).

6.1.3.8 Modulo Detector de Pm1.0, Pm 2.5 y Pm 10. Para ver la concentración de partículas en tiempo real, se usó un sensor compacto que mide este tipo o tamaño de partícula contaminante.

Especificaciones

- Material: acrílico Caso + componentes electrónicos

- Tamaño: Aprox. 8.5x6.5x3.7cm / 3.35x2.56x1.46 "
- Procesador: para chips ARM de 32 bits
- Color de fuente: varios colores
- Pantalla: 2.8 "TFT
- Relación de resolución: 320x240
- Fuente de alimentación: DC 5V
- Corriente de operación: 1-2A
- Rango de medición de temperatura: -20 a 60 °C
- Precisión: $\pm 0,1$ °C

Figura 24

Modulo detector de material particulado





Fuente: Autores, 2021.

6.2 Resultado de la etapa 2. Verificar las características técnicas de los residuos electrónicos para su reutilización como componentes del PES.

6.2.1 Consecución de materiales reutilizables.

Luego de hacer un recorrido por chatarrerías y diferentes lugares en donde se almacena residuos aprovechables o reutilizables, se adquieren los siguientes materiales:

Antena receptora de señal para antiguos televisores.

Transformador Flyback

Balastro electrónico

Malla mosquitera

Chasis de CPU

Madera

Ventiladores extractores

Filtro de aire acondicionado



6.2.2 Evaluación de condiciones físicas de los materiales

Para asegurarnos que los materiales conseguidos presentaran idóneas condiciones físicas y resistentes, se realizaron pruebas de calidad a los residuos aprovechables seleccionados, de esta forma se eligieron los que presentaron mejores condiciones de durabilidad; resistencia a condiciones atmosféricas, utilidad y funcionalidad.

6.3 Resultado de etapa 3. Evaluar la eficiencia del precipitador, en función de la potencia de voltaje aplicado, distancia entre los electrodos(placas), velocidad de flujo y tiempo de residencia

Después de adquirir y seleccionar los residuos electrónicos que cumplieran con las características requeridas, procedimos a ejecutar los cálculos para el diseño, construcción y ensamblaje del prototipo, por último, la evaluación de la eficiencia del prototipo de PES.

6.3.1 Distancia entre los electrodos de descarga y placas colectoras

Esta distancia se ajustó experimentalmente, para ello se puso en funcionamiento el Flyback conectando la salida de alto voltaje positiva en las placas y la salida a tierra o negativa a los electrodos de descarga, luego estas dos partes se acercaron hasta que se formara un arco eléctrico entre estos y se obtuvo la medida de la distancia mínima definitiva entre las placas colectoras y electrodos de ionización: la separación fue de 3 centímetros.

6.3.2 Cálculos de diseño

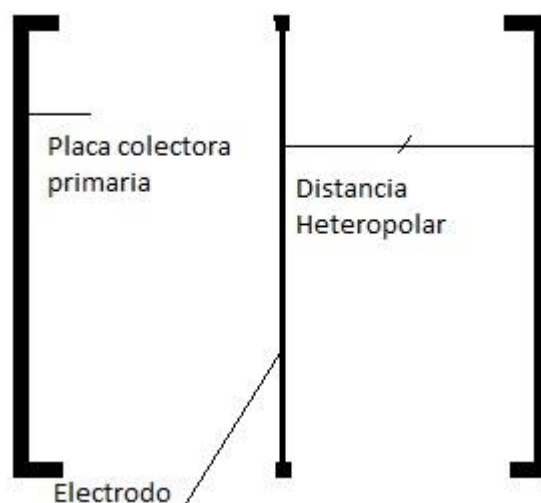
A continuación, se muestra el procedimiento para calcular los principales parámetros de diseño que influyen en la eficiencia del PES.

6.3.2.1 Intensidad de campo eléctrico

Como el PES es de dos etapas, la segunda sección es llamada etapa de ionización y colección que está configurada según el siguiente esquema:

Figura 25

Configuración segunda etapa.



Fuente: Autores, 2021.

En este sentido la intensidad de campo está definida por la ecuación (3)

$$E = \frac{V}{b} \quad v/m$$

Tenemos los siguientes datos:

- $V = 30000$ voltios
- $B = 0,03$ metros

Entonces:



$$E = \frac{30000 v}{0,03 m} = \frac{v}{m}$$

$$E = 10.0 \times 10^5 \frac{v}{m}$$

6.3.2.2 Carga eléctrica de la partícula. Teniendo en cuenta que el tamaño de partícula a recolectar es mayor o igual $1\mu\text{m}$, la carga que domina en este caso es la carga por campo la cual está definida por la ecuación (4):

$$q_c = \left(\frac{3k}{k+2} \right) \pi \epsilon_0 d^2 E$$

Datos:

$$E = 10.0 \times 10^5 \text{ [V/m]}$$

$$K = 4$$

$$d = 2.5 \times 10^{-6} \text{ [m]}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ [C}^2/\text{Nm}^2\text{]}$$

Entonces:

$$q_c = \left(\frac{3 * 4}{4 + 2} \right) \pi * 8.85 \times 10^{-12} * (2.5 \times 10^{-6})^2 * 10.0 \times 10^5$$

$$q_c = 3.475 \times 10^{-16} \text{ [C]}$$

6.3.2.3 Velocidad de migración de la partícula. Esta describe la velocidad de recorrido que tiene las partículas hacia la placa recolectora, y está definida por la ecuación (6);

$$W = \frac{q_t E}{3\pi\mu d}$$

Datos:

$$d = 2.5 \mu\text{m} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ [m]}$$

$$E = 10.0 \times 10^5 \text{ [V/m] [N/C]}$$

$$\mu = 1.84 \times 10^{-5} \text{ [Ns/m}^2\text{]}$$

$$q_t = 3.475 \times 10^{-16} \text{ [C]}$$

Entonces:

$$W = \frac{3.475 \times 10^{-16} * 10.0 \times 10^5}{3\pi * 1.84 \times 10^{-5} * 2.5 \times 10^{-6}}$$

$$W = 0.801 \text{ m/s}$$

6.3.2.4 Área de recolección. Esta es el área total de recolección de partículas para la segunda etapa (Placas recolectoras), para este parámetro se utilizó la formula (8), despejando de ella el área (A):

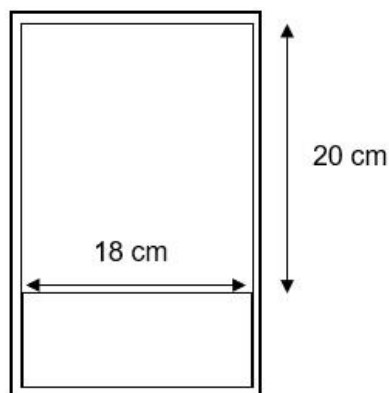
$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A\omega}{Q}\right)$$

$$A = \frac{Q}{W} \ln\left(\frac{1}{1 - \eta}\right)$$

El caudal Q se obtuvo de acuerdo con las medidas de la CPU y la velocidad promedio de flujo proporcionado por las extractoras.

Figura 26

Medidas CPU.

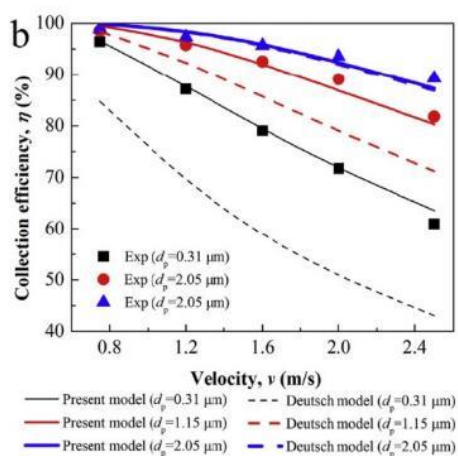


Fuente: Autores, 2021.

6.3.2.5 Velocidad de gas. De acuerdo con el estudio realizado por S. Li et al. (2019) Pg.8 la velocidad del gas influye sobre la eficacia del precipitador electrostático, evidenciándose en la siguiente figura.

Figura 27

Velocidades optimas de flujo de gas.



Fuente: S. Li et al. (2019).

Basándonos en sus resultados y observando la eficiencia de colección de su modelo, la cual estuvo por encima del 90% para partículas de diámetro 2.0 μm , se optó por tomar una velocidad de 1.25 m/s para realizar el cálculo del caudal de entrada del nuestro prototipo.

6.3.2.6 Caudal de entrada

$$Q = L * H * V$$

$$Q = 0.18 * 0.20 * 1.25 \text{ m/s}$$

$$Q = 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$$

Datos:

$$Q = 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$W = 0.801 \text{ m/s}$$

n= Se tomó una eficiencia del 99%

Entonces el área de recolección se calcula así:

$$A = \frac{0.045}{0.801} \text{Ln} \left(\frac{1}{1 - 0.99} \right)$$

$$A = 0.26 \text{ m}^2$$

6.3.2.7 Características de los parámetros de diseño

Tabla 3

Rangos y valores de los parámetros de diseño

Parámetro	Dato
Material (Humo)	Papel, Madera, Carbón

Tamaño de partícula	>1 μm
Temperatura	<100 °C
Área de colección	0.26m ² (2500 cm ²)
Longitud PES	38 cm
Altura PES	36 cm
Ancho PES	18 cm
Caudal	0.045 m ³ /s
Diámetro electrodo	9 mm
Distancia Entre electrodo y placas	3 cm
Distancia entre placas colectoras	1.3 cm
Velocidad de flujo	0.8 m/s – 1,5 m/s
Voltaje aplicado	30000 VDC
Intensidad de campo eléctrico	10.0x10 ⁵
Carga de la partícula	3.475x10 ⁻¹⁶ [c]
Velocidad de migración	0.801m/s
Eficiencia	90%

Fuente: Autores, 2021

6.3.3 Construcción y ensamblaje del precipitador electrostático

De acuerdo con las especificaciones de los parámetros de diseño se construyó el prototipo de precipitador electrostático, la mayoría de las piezas y materiales del sistema son reutilizadas ya

que no tenían uso alguno, estas fueron seleccionadas teniendo en cuenta las partes de cada zona o etapa del PES.

Partes del prototipo de precipitador electrostático a construir:

- Estructura de soporte interna.
- Zona de entrada
- Primera etapa (ionización).
- Segunda etapa (Colección).
- Zona de salida.
- Circuito control de flyback.

6.3.3.1 Estructura de soporte interna. Para su fabricación se utilizó madera ya que cumple con características aislantes y evitar cortos circuitos, además tiene bajo costo y son de fácil adquisición

Figura 28

Estructura de soporte interna





Elaboración propia, 2021

Figura 28.1

Estructura de soporte interna



Fuente: Autores, 2021.

6.3.3.2 Zona de entrada de partículas. Esta se diseñó teniendo en cuenta las medidas proporcionadas por la CPU reutilizada, la cual tiene geometría rectangular, esta zona cuenta con una malla con agujeros con fin de permitir la entrada de flujo y así mismo evitar el ingreso de elementos de mayor tamaño que pueden afectar el funcionamiento del PES.

Figura 29

Zona de entrada de partículas

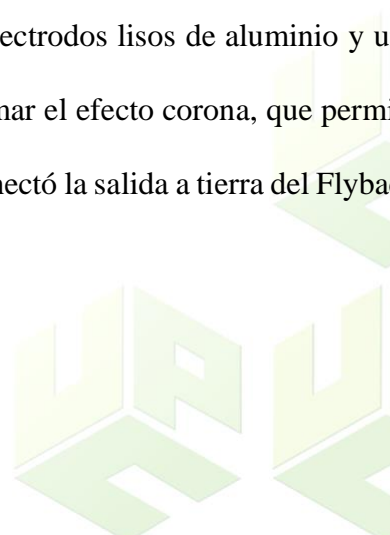


Fuente: Autores, 2021.

6.3.3.3 Primera etapa (ionización). Consta de cuatro electrodos lisos de aluminio y una malla mosquitera, a los cuales se les aplica alto voltaje para formar el efecto corona, que permite la ionización de las partículas. Cabe mencionar que a estos se conectó la salida a tierra del Flyback o negativa (-).

Figura 30

Primera etapa, Electrodo ionizantes.





Elaboración propia, 2021

Figura 30.1

Primera etapa, Electroodos ionizantes.



Fuente: Autores, 2021.

6.3.3.4 Segunda etapa (Colección). Se construyó esta zona en forma de caja de madera, de acuerdo con las medidas pre establecidas por la cubierta de la CPU reutilizada. Considerando el área calculada de 0.26m^2 y que las placas cortadas tienen medidas de $20\times 20\text{cm}$ cada una, el número aproximado de placas efectivo fue de 7, dando como resultado al sumar cada una un área de colección de 0.28 m^2 .

Conforme con la teoría y diferentes estudios revisados la capacidad de recolección de material particulado en los precipitadores electrostáticos depende del tamaño de la zona de colección, por lo que se decidió aumentar el número de placas colectoras al doble, con el objetivo de aumentar la eficiencia de captura de nuestro prototipo. En definitiva, el diseño final de la zona de colección está compuesta por 14 placas de aluminio.

Hay que mencionar que al sistema placas fue conectada la salida de alto voltaje positivo (+) del Flyback. Las conexiones se hicieron en serie de tal manera que la tensión se distribuya por todas las placas, así como se muestra en la figura.

Figura 31

Segunda etapa, placas colectoras.

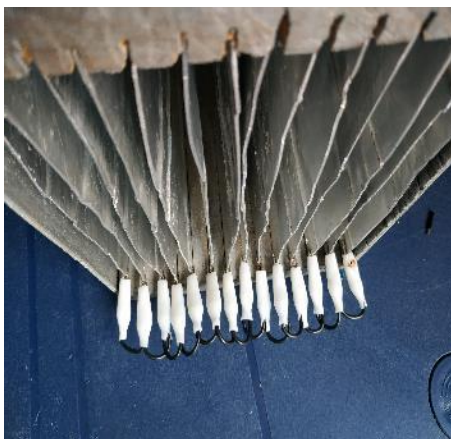




Elaboración propia, 2021

Figura 31.1

Segunda etapa, placas colectoras.



Fuente: Autores, 2021.

6.3.3.5. Zona de salida. Consta de dos ventiladoras extractoras que cumplen la función de encausar el flujo de aire con partículas hacia dentro del PES.

Figura 32

Zona de salida.

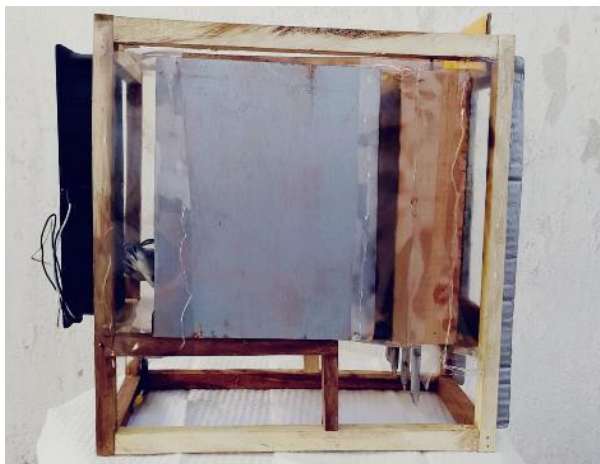


Fuente: Autores, (2021).

6.3.3.6 Estructura interna ensamblada

Figura 33

Estructura interna ensamblada.



Fuente: Autores, 2021.

6.3.3.7 Precipitador electrostático construido.

Figura 34

Precipitador Electrostático



Fuente: Autores, 2021.

6.3.4 Pruebas experimentales de eficiencia del prototipo de precipitador electrostático.

Se llevó a cabo el montaje para la realización de las pruebas y comprobar la eficiencia de recolección de material particulado, mediante el prototipo de precipitador electrostático.

Figura 35

Imagen del montaje





Elaboración propia, 2021

Figura 35.1

Imagen del montaje



Elaboración propia, 2021

6.3.4.1 Fuente de partículas. Para ello se construyó una cámara en la que se quemó materiales como carbón, cartón, papel y madera. Esta combinación proporcionó la generación de material particulado de diferentes tamaños. Se conectó por medio de un tubo de metal que resistiera alta temperatura a una segunda cámara ubicada en la zona de entrada del dispositivo, que permitió la distribución uniforme del flujo de gas hacia los confines del precipitador. En la salida del sistema se ubicó un sensor para medir tamaños de partículas de PM10, PM2.5 y PM1.0.

Se aplicó un voltaje fijo de 25000 a 30000 Volts aproximadamente, el cual fue proporcionado por un transformador Flyback. La salida de alto voltaje positiva de este se conectó a las placas colectoras y salida a tierra a la malla de metal y electrodos.

Se realizaron diferentes corridas para obtener los niveles de concentración con el dispositivo apagado. Al hacer pasar el humo por el precipitador el sensor empezó medir a los 12 segundos después de inicio de la prueba, de ahí tomamos los valores reflejados hasta llegar a una concentración inicial promedio en un lapso de 40 segundos, luego a los 50 segundos se encendió el PES para obtener los datos hasta conseguir una concentración promedio final de material particulado.

A continuación, se presentan los resultados experimentales.

Figura 36

Máxima concentración de partículas medida por el sensor.



Fuente: Autores 2021

Figura 37

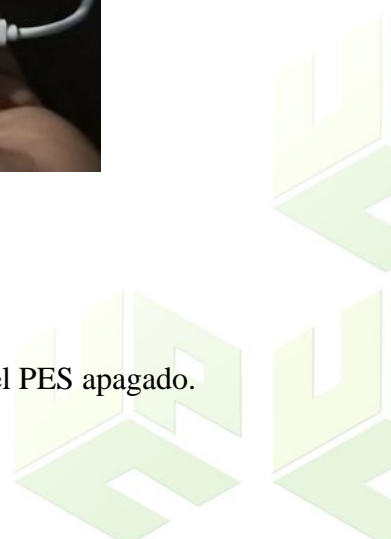
Mínima concentración de partículas medida por el sensor.

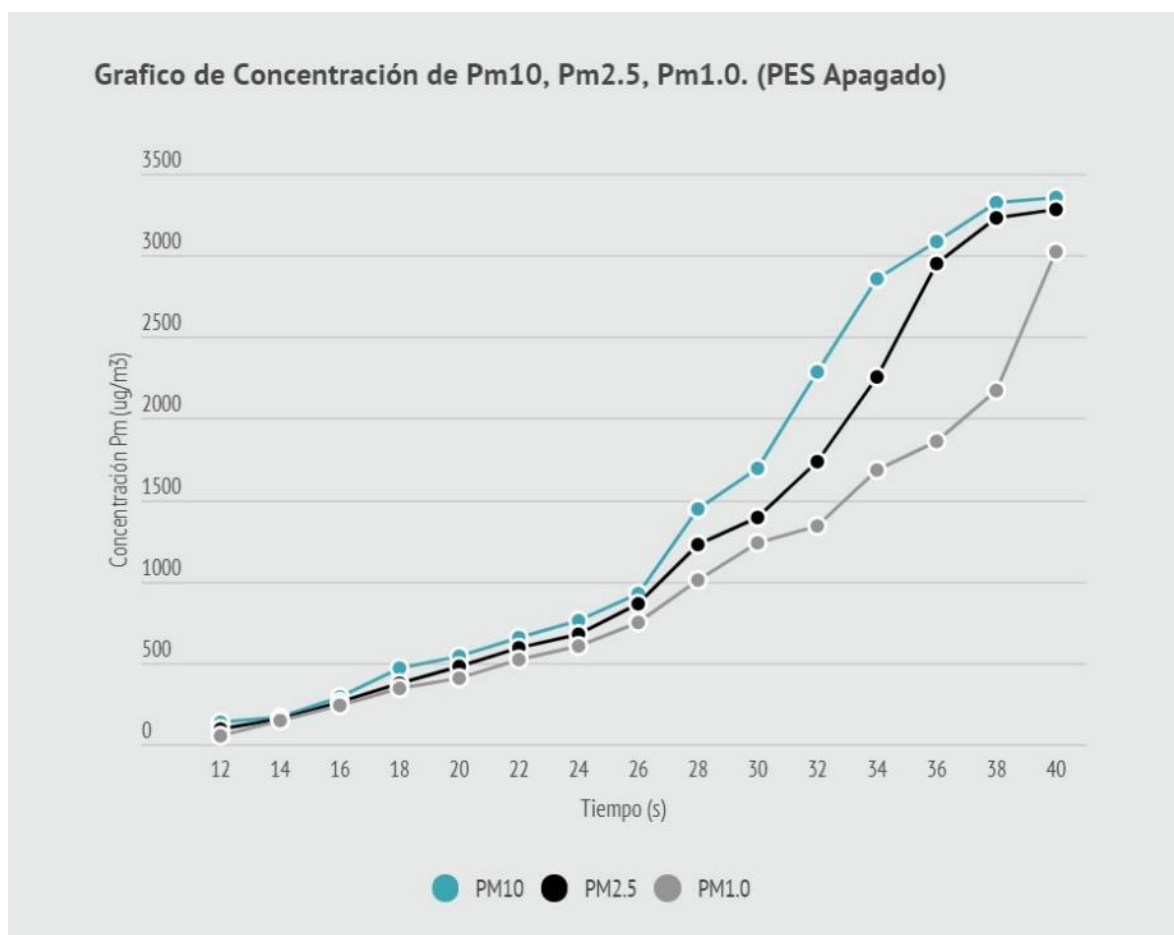


Fuente: Autores 2021

Figura 38

Gráfico de concentración de Pm10, Pm2,5 y Pm1.0 con el PES apagado.



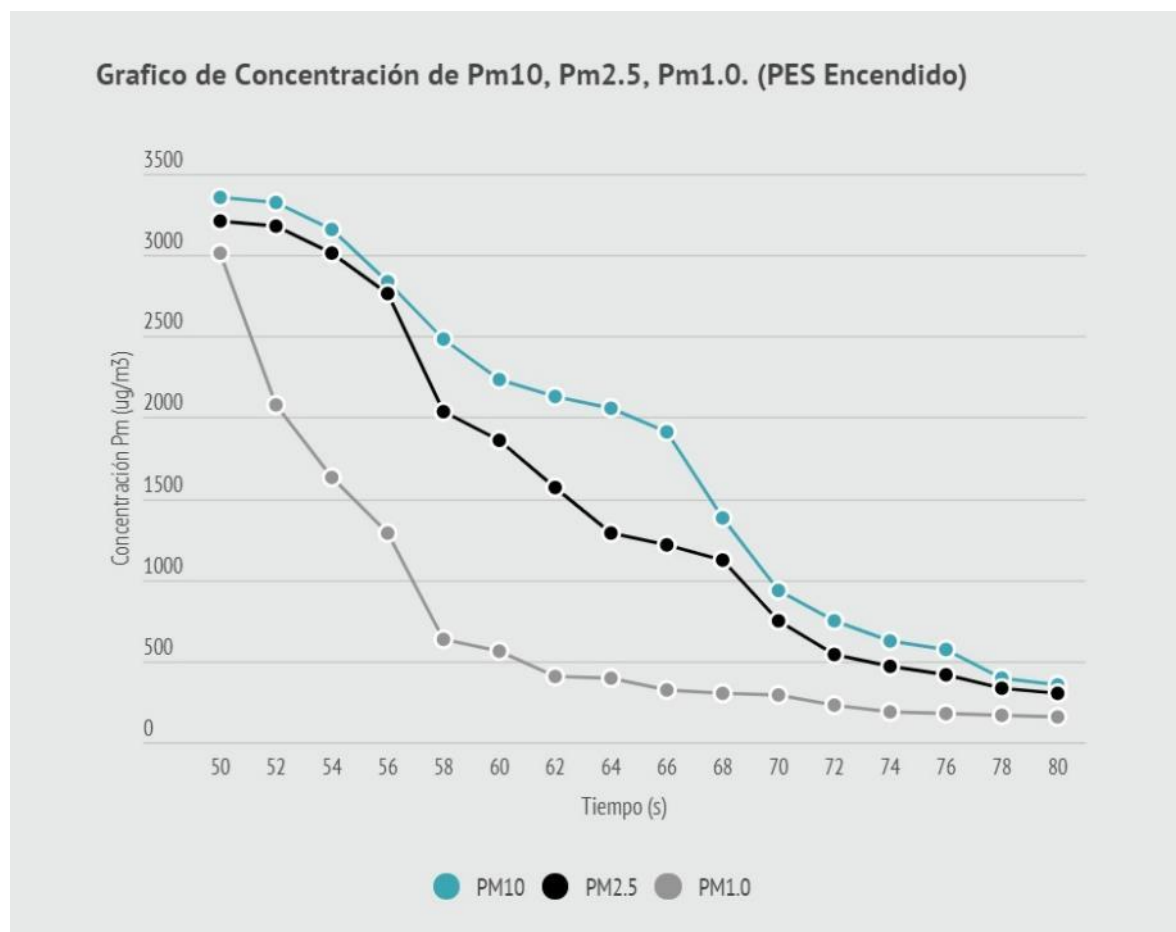


Fuente: Autores 2021

Antes de iniciar la prueba la concentración de material particulado ambiente era de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Pm2,5), 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Pm10) y 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Pm1.0). Se evidencia que a partir del segundo 12 la concentración de partículas aumenta hasta llegar una medida estable en un rango de 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 3350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ después de los 40 segundos. También se observa que la concentración de Pm10 es mayor que Pm2,5 y esta a su vez mayor que Pm1.0.

Figura 39

Gráfico de concentración de Pm10, Pm2,5 y Pm1.0 con el PES encendido.



Fuente: Autores 2021

Luego de encender el dispositivo a los 50 segundos del experimento se observa que la concentración de material particulado empezó a disminuir de manera considerable hasta llegar una medida promedio entre un rango 300-350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Pm10, de 300-310 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Pm2.5 y de 150-200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Pm1,0 a partir de los 80 segundos de prueba.

6.3.5 Cálculo de la eficiencia

Como se ha dicho anteriormente la concentración de partículas fue medida con un Modulo detector de Pm1.0, Pm 2.5 y Pm 10. El cálculo de la eficiencia del PES de dos etapas se realizó mediante la siguiente ecuación (1.2):

$$\eta = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) \times 100$$

Aplicando la fórmula usando las concentraciones de partículas tomadas, se tiene los siguientes porcentajes de eficiencia;

Pm10

$$\eta = \left(1 - \frac{335}{3353}\right) \times 100 = 90\%$$

Pm2.5

$$\eta = \left(1 - \frac{304}{3279}\right) \times 100 = 90,72\%$$

Pm1.0

$$\eta = \left(1 - \frac{153}{3027}\right) \times 100 = 94.94\%$$



7 conclusiones

De acuerdo con las investigaciones realizadas se logró seleccionar el tipo de precipitador electrostático, el cual fue de dos etapas, así como también, diseñar las partes y secciones que lo integraron, de igual manera fueron seleccionados los materiales reutilizables que se utilizaron para la construcción del equipo.

Los materiales para la elaboración del prototipo se adquieren de manera oportuna en distintos lugares como chatarrerías o sitios similares y representan una ventaja en cuanto a los costos de construcción. Por otro lado, se verificaron las condiciones físicas de los materiales, comprobando su buen estado y su potencial para integrar las estructuras del precipitador electrostático.

Se demostró que el prototipo construido con materiales reciclables y que son de fácil obtención y de bajo costo, es eficiente ya que maneja valores entre 90 y 95% en la captura de material particulado PM10, PM 2.5 Y PM1.0.

Comprobamos que el voltaje aplicado tanto a las placas colectoras como a los electrodos y malla ionizante, influyen en la eficiencia del precipitador, a mayor voltaje mejor eficacia de captura.

La velocidad del flujo de gas también afecta de forma considerable la efectividad de recolección, ya que cuando se hizo la prueba con las extractoras encendidas los valores arrojados por el sensor diferían de manera marcada con el PES encendido, en comparación con el PES apagado. Esto se debe a que hay mayor fuerza de arrastre de partículas y por ende menor tiempo de ionización.



El tiempo de residencia del gas es un factor importante que influye en la eficiencia, por lo que se debe manejar velocidades bajas, con finalidad de lograr que la mayor parte de partículas se ionicen y sean recolectadas.

Finalmente, el tamaño de área total de recolección de partículas influye sobre la efectividad del proceso, si se aumenta el tamaño se logran mejores eficiencias, pero aumentan los costos de construcción.



8. Recomendaciones

Para mejorar la eficiencia del PES se sugiere probar diferentes tipos de voltajes tanto en las placas como en los electrodos, con el objetivo de obtener un valor de voltaje adecuado.

En futuras investigaciones para comprobar la eficiencia de nuestro prototipo, se puede poner a pruebas con material particulado proveniente de fuentes móviles como vehículos, y de igual manera por el humo generado en los asadores de carnes utilizados en los restaurantes.



9. Referencias

- Fernández Sandoval, E. (2008). *MEJORAS EN LA EFICIENCIA DE LOS COLECTORES DE POLVO TIPO JETPULSE Y PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO*. Universidad de Piura, Piura. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1274/IME_123.pdf
- Gaviria G, C., Benavides C, P., & Tangarife, C. (2011). Contaminación por material particulado (pm_{2,5} y pm₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). 241-250. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v29n3/v29n3a04.pdf>
- Khaddam Fuliful, F. (2017). *www.researchgate.net*. https://www.researchgate.net/figure/Figure-14-Two-stage-precipitator-41_fig4_318815357
- Revilla, M., & Abel, J. (2019). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN*. Universidad Católica de Santa María, Arequipa , Perú. <https://core.ac.uk/download/pdf/233006032.pdf>
- Taha Ahmad, S. (2018). *researchgate*. https://www.researchgate.net/figure/Basic-parallel-plate-electrostatic-precipitator-arrangement-3_fig1_326872166
- Altun, A., & Kilic, M. (2019). Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments. 3. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/37/e3sconf_clima2019_02020.pdf
- ARCINIÉGAS SUÁREZ, C. (2012). DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM₁₀. *revista.luna.azúl*, 195-213. <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n34/n34a12.pdf>



Askix. (2021). *www.askix.com*. <https://www.askix.com/como-llegar-a-100kv-fuera-tu-flyback-configuracion-muy-simple-de.html>

banggood. (2020). *es.banggood.com*. https://es.banggood.com/PM1_0-PM2_5-PM10-Detector-Module-Air-Quality-Dust-Sensor-Tester-Detector-Support-Export-Data-Monitoring-Home-Office-Car-Tools-p-1615550.html?cur_warehouse=CN

Buchin, R. (2016). *www.youtube.com*.

<https://www.youtube.com/watch?v=xT26lGMr8kw&list=LL&index=42>

Calua Carrasco, C. (2018). *CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES SÓLIDOS SEDIMENTABLES PARA EL PERIODO MAYO - JUNIO 2017 EN EL ENTORNO DE LA UPN Y SU RELACIÓN CON LAS NORMAS DE LA OMS. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES SÓLIDOS SEDIMENTABLES PARA EL PERIODO MAYO - JUNIO 2017 EN EL ENTORNO DE LA UPN Y SU RELACIÓN CON LAS NORMAS DE LA OMS. UNIVERSIDAD DEL NORTE, Cajamarca - Perú.*

repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/14073/Calua%20Carrasco%20Carlos%20Elder%20Rudecindo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

DE NEVERS, N. (2000). *INGENIERIA DE CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AIRE. MEXICO: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA.*

<http://www.bibvirtual.ucb.edu.bo:8000/opac/Record/117520>

EPA. (2002). *www3.epa.gov*, Sección 6. Obtenido de

<https://www3.epa.gov/ttn/catc/cica/files/cs6ch3-s.pdf>





Flórez , A., Cabrera, D., & Ruano, W. (2018). Diseño de un filtro electrostático a escala piloto. 110-113.

Fonseca, M. (2018). *ESTUDIO Y EVALUACION DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO EN CEMENTOS BÍO BÍO*. (U. T. MARÍA, Ed.)

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/41024/3560901550353UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gelis, J., Guerrero, G., & Narvaez , R. (2014). PRINCIPIOS PARA EL MODELAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS DE SOLIDOS. (U. d. 1Facultad de ingeniería Química, Ed.) *Facultad de ingeniería Química, Universidad de Sam Buenaventura, Tecnólogo en electrónica y*, 1-18.

http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2241/1/Principios%20para%20el%20modelamiento%20de%20Precipitadores_Juli%c3%a1n%20Gelís%20Orta_USBCTG_2014.pdf

HRDiemen. (2021). <https://www.hrdiemen.com/reparation/flyback/scheme/6247>. Obtenido de <https://www.hrdiemen.com/reparation/flyback/scheme/6247>

Jaworek, A., Marchewicz, A., Sobczyk, A., Krupa, A., & Czech, T. (2018). www.sciencedirect.com:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128517301703#!>

Karunakaran, M., Sivakumar, P., & Chira, N. (2019). Electrostatic Precipitator in Ash Removal System: A Comprehensive Review. *International Journal of Innovative Technology and*



- Exploring Engineering (IJITEE)*, 8, 322. <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i4s/DS2883028419.pdf>
- Kim, H.-J., Han, B., Jim, Y.-J., Oda, T., & Won, H. (02 de 02 de 2013). Submicrometer particle removal indoors by a novel electrostatic precipitator with high clean air delivery rate, low ozone emissions, and carbon fiber ionizer. *John Wiley & Sons*, 369–378. doi:10.1111
- Lamparayluz. (2021). *¿Qué es un balasto?* <https://www.lamparayluz.es/todo-sobre-iluminacion/que-es-un-balasto>
- Li, S., Zhang, S., Pan, W., Long, Z., & Yu, T. (2019). Experimental and theoretical study of the collection efficiency of the two-stage electrostatic precipitator. *Elsevier*, 365, 1-10. doi:10.1016/j.powtec.2019.07.107
- Mamani Revilla, J. (2019). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA EL CONTROL DE POLUCIÓN EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA*. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. <https://core.ac.uk/download/pdf/233006032.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017). *Resolución 2254*. <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>
- OMS. (22 de 9 de 2021). <https://www.who.int/es>. Recuperado en 2021, [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)



Palella, & Martins. (2010). *docsity*. <https://www.docsity.com/es/disenio-tipo-nivel-y-modalidad-de-palella-y-martins/2733947/>

Parker, K., & Plaks, N. (2004). *Electrostatic Precipitator (ESP)*.

Rodríguez, J. F., Alarcón, U. F., García, O., & Benavides, G. (2017). Diseño y prototipo de un precipitador electrostático. *Mutis*, 7(2), 86-95. doi:10.21789/22561498.1237

SARAVIA MORALES, H. (2008). *ESTUDIO AMBIENTAL, TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS, EN PLANTA DE GENERACIÓN ARIZONA. GUATEMALA.*
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0682_EA.pdf

Theodore, L. (2008). *Air Pollution Control Equipment Calculations*. ESTADOS UNIDOS.

Top, E. (22 de 02 de 2020). *electrónico, Balastro*. <https://www.askix.com/como-llegar-a-100kv-fuera-tu-flyback-configuracion-muy-simple-de.html>



ANEXOS

Manual de operación

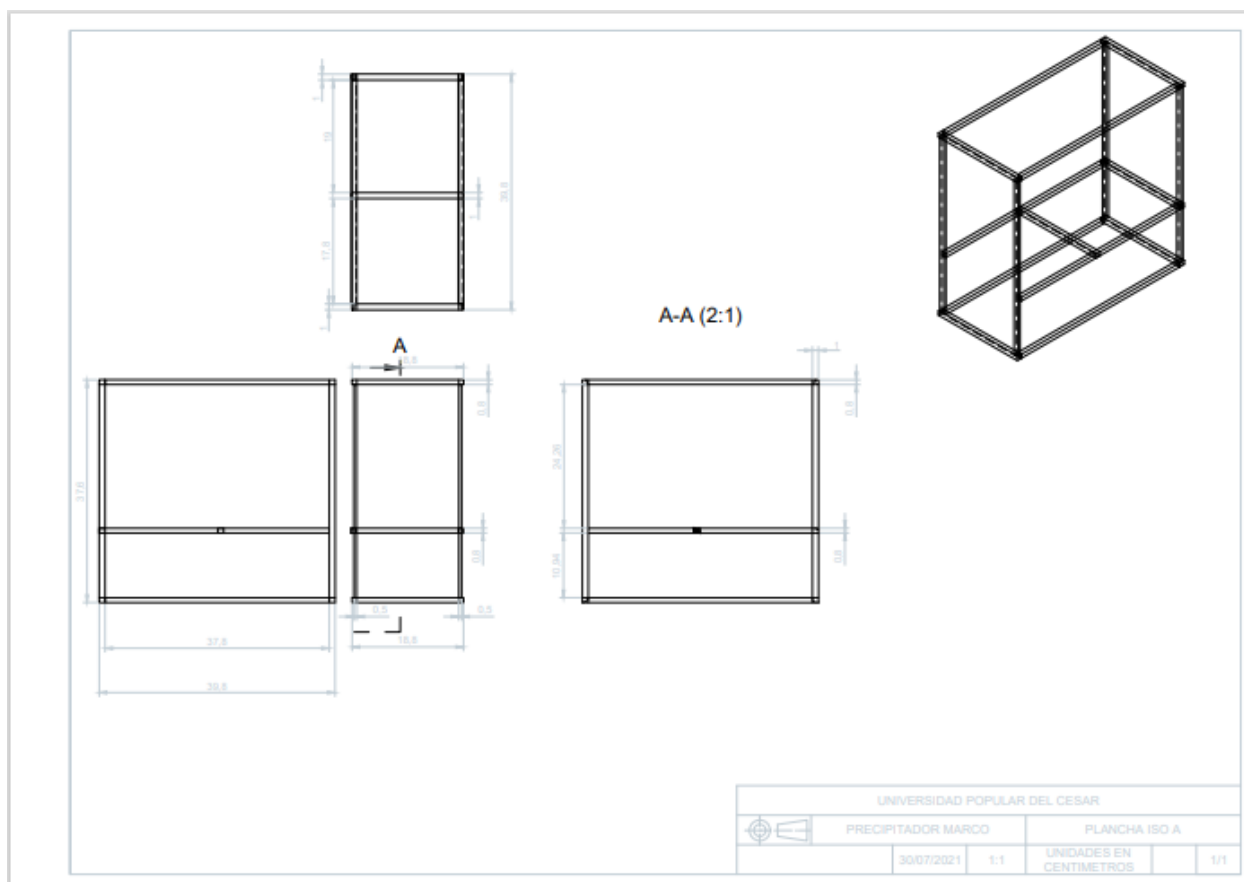
Para el modo de operación del precipitador electrostático se tienen que seguir los siguientes pasos.

1. Comprobar que el lugar en donde este ubicado el precipitador electrostático este limpio, sin cuerpos extraños que puedan obstaculizar el rendimiento y funcionamiento del dispositivo.
2. Conectar el cable de la salida de alto voltaje (positivo) del flyback con el cable unido a las placas.
3. Conectar el cable a tierra o negativo del flyback con los electrodos y malla ionizante.
4. Conectar el balastro a la toma de energía eléctrica de 120V.
5. Oprimir el interruptor para poner en funcionamiento el equipo.
6. Apagar el interruptor para que el dispositivo deje de operar.



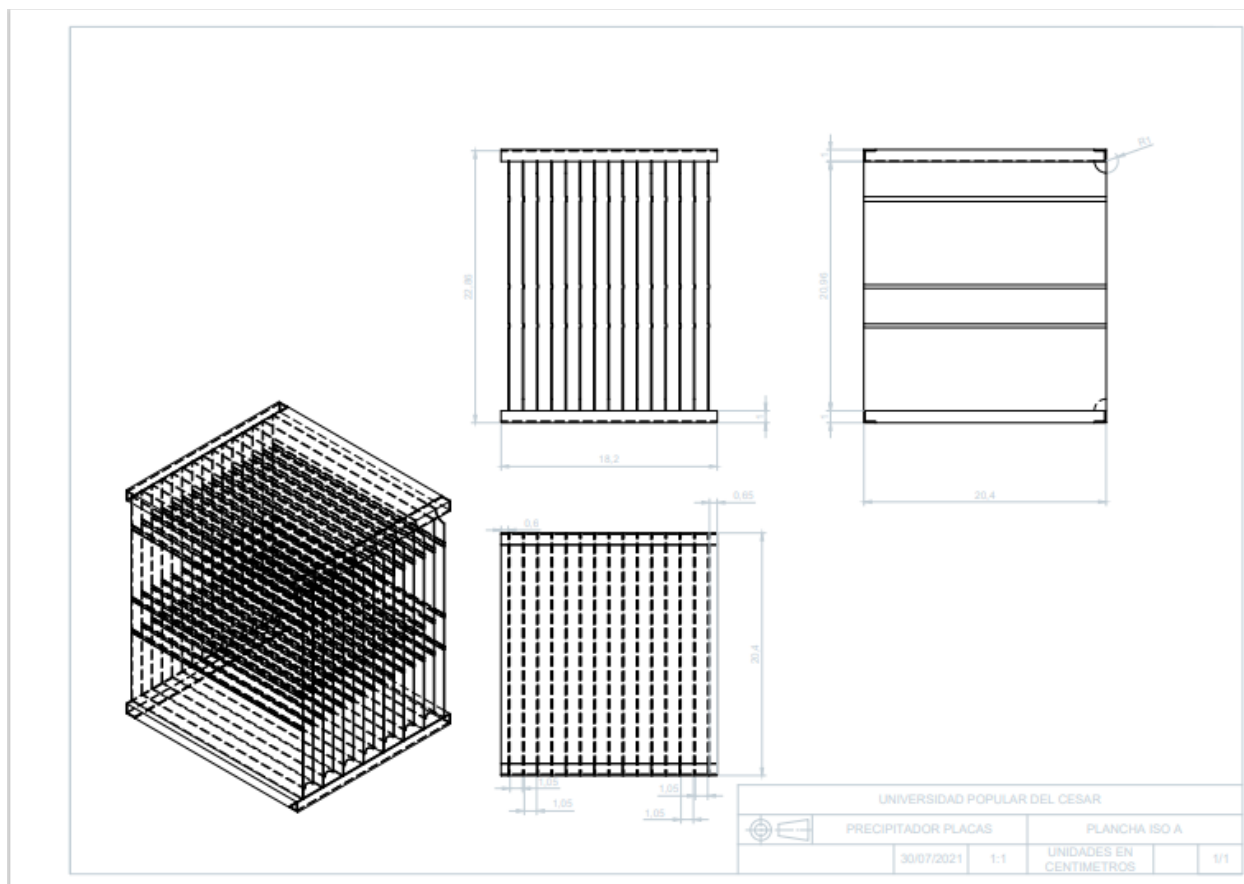
Planos de ingeniería



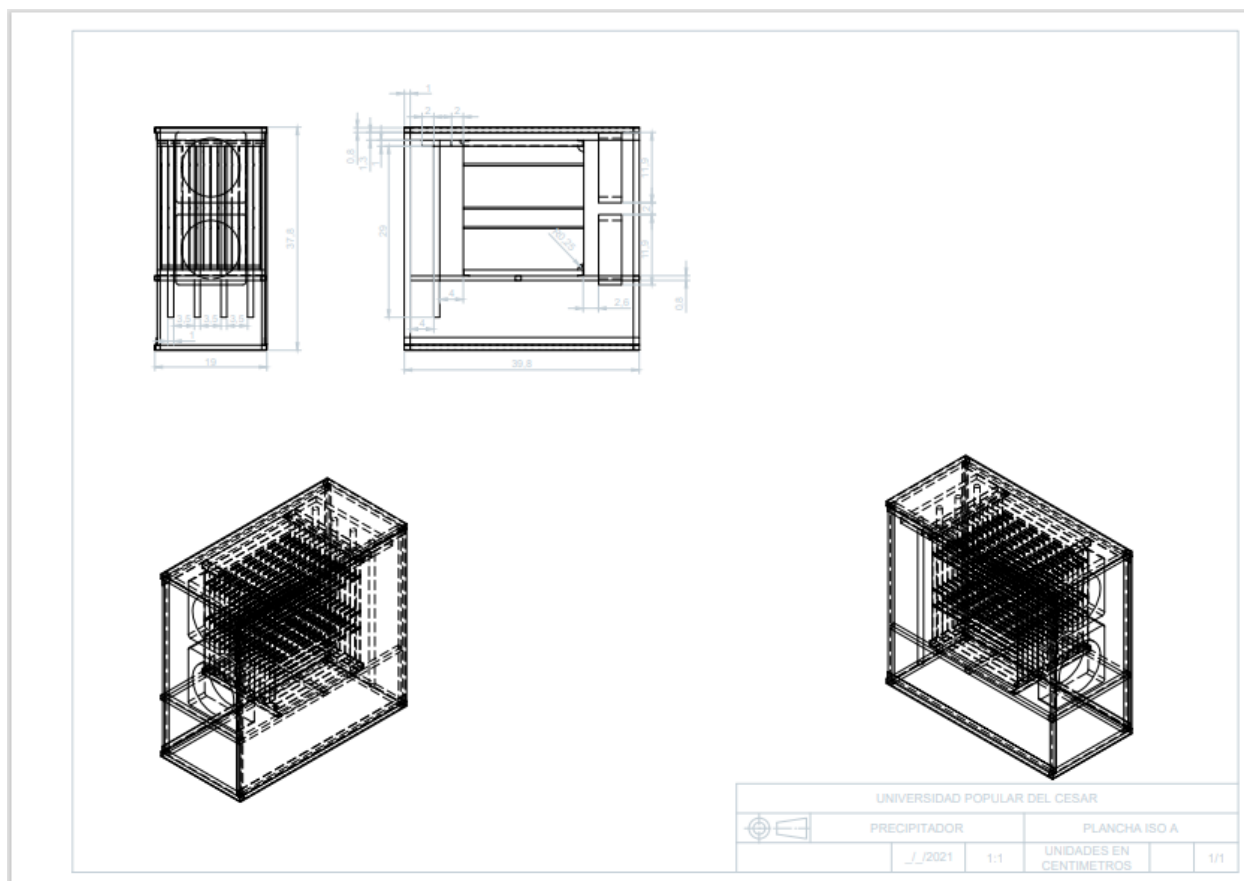


Planos de ingeniería

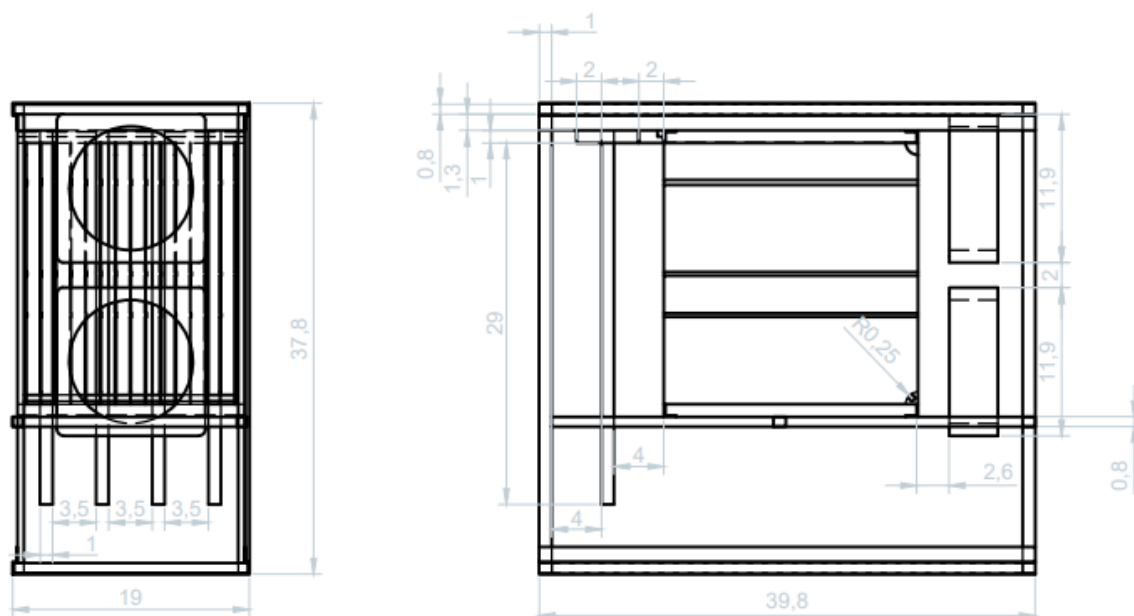




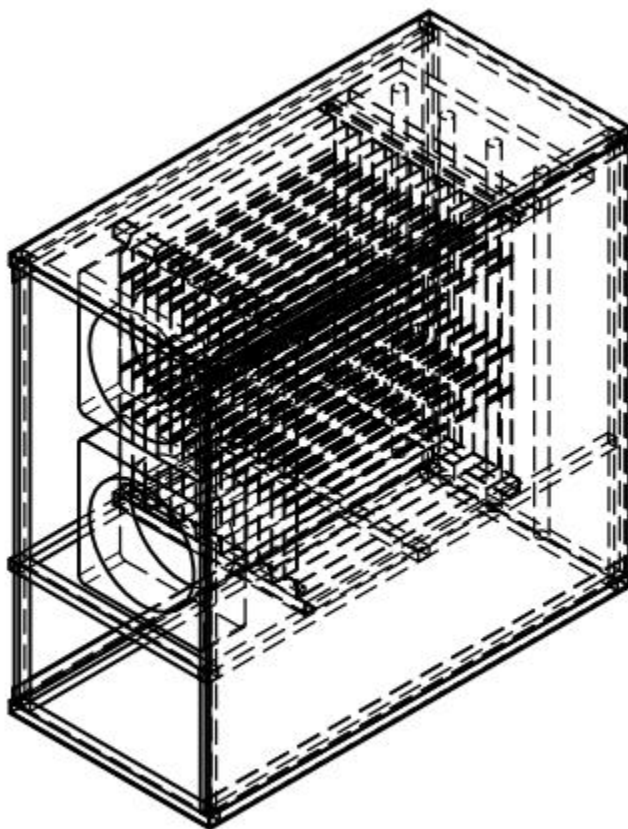
Planos de ingeniería



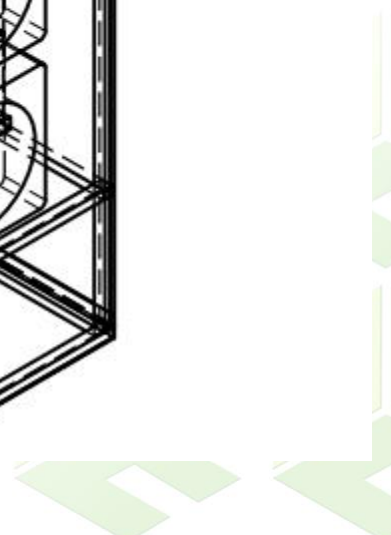
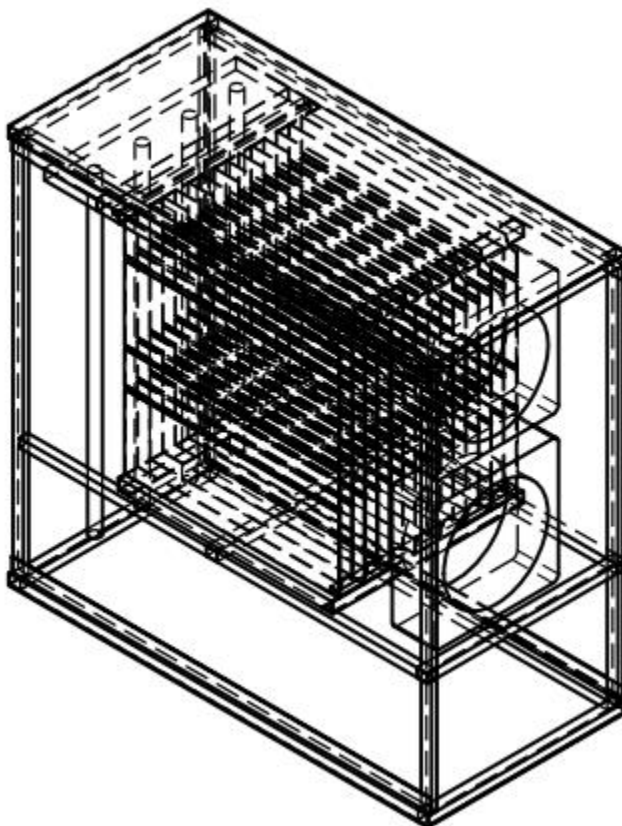
Planos de ingeniería



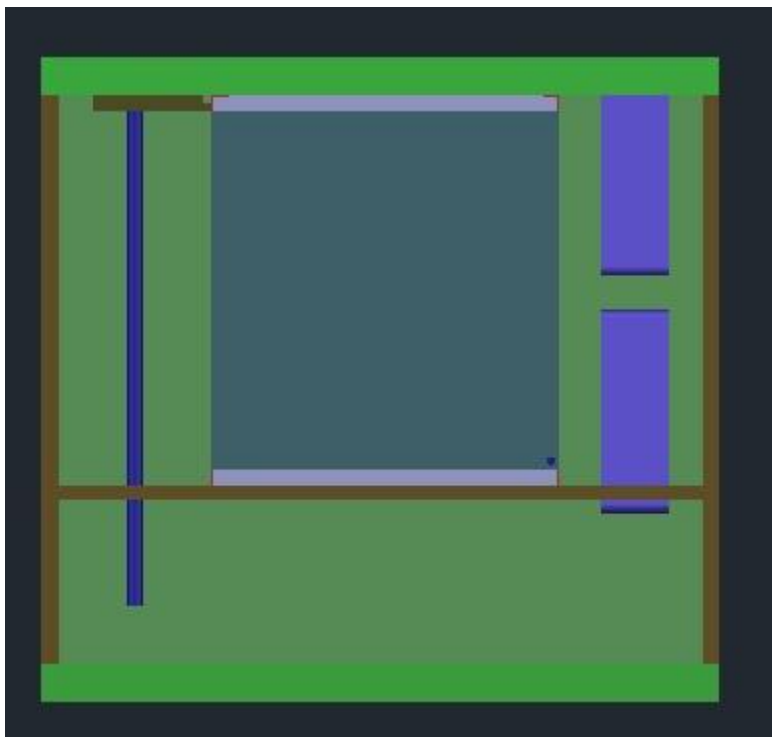
Planos de ingeniería



Planos de ingeniería



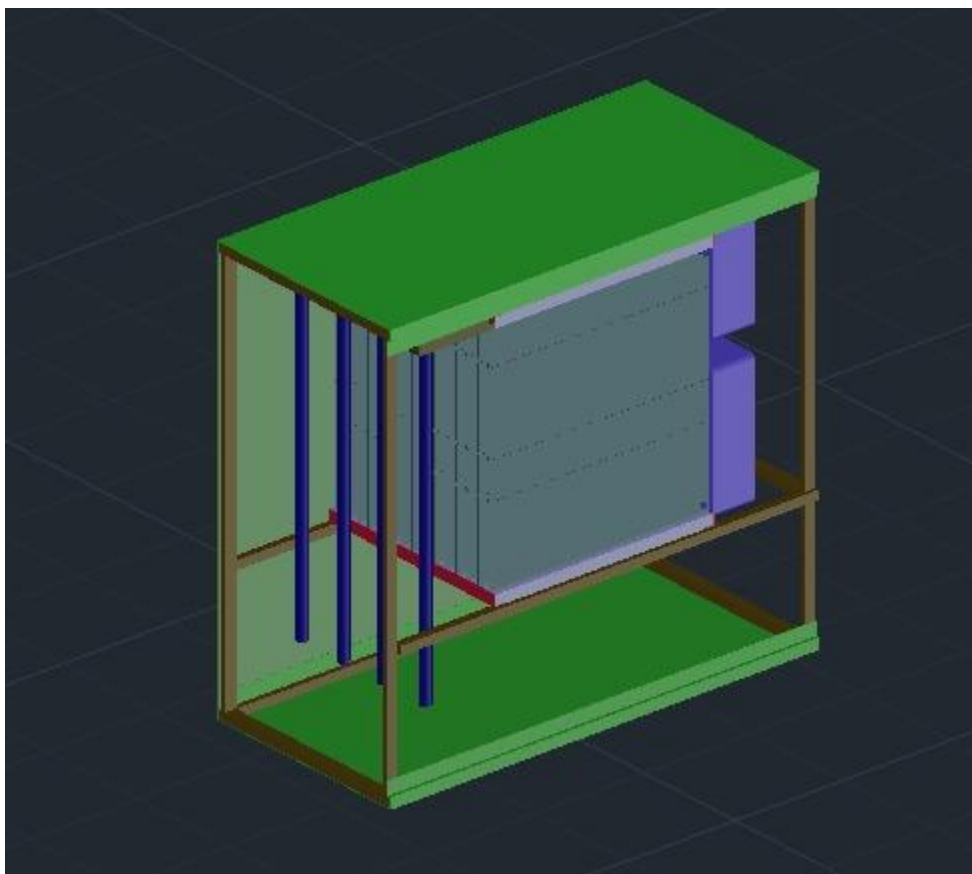
Diseño en AutoCad



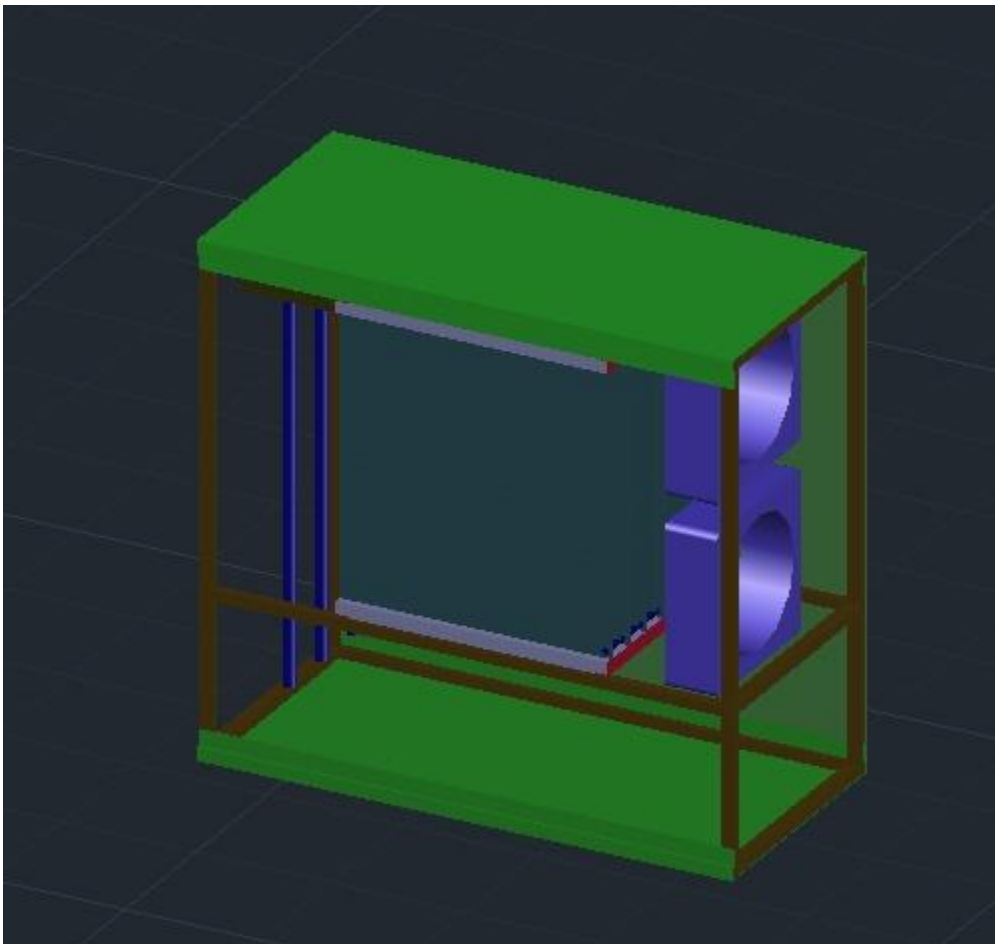


Diseño en AutoCad

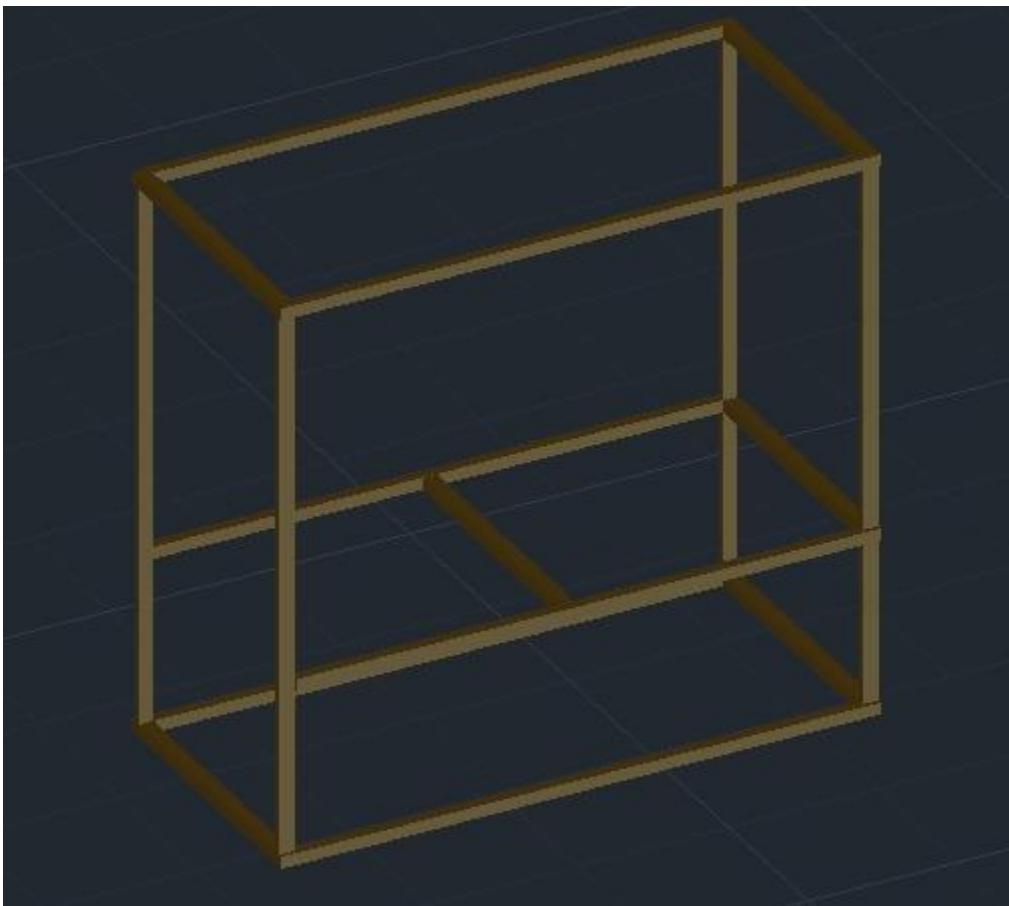




Diseño en AutoCad



Diseño en AutoCad



Diseño en AutoCad

