

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES



INFORME FINAL

**“DISEÑO DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA
CAPTURA DE MATERIAL PARTICULADO DEL POLVO DE
MADERA”**

AUTOR: Dr. Miguel Angel De La Cruz Cruz – Código 1476

COLABORADOR: Mtro: Cesar Gualberto Victoria Barros – Código 5513

Resolución Rectoral N° 417-2022-R, del 31 de mayo del 2022, que Refrenda la Resolución N° 001-UI-FIARN del 11 de mayo del 2022, mediante el cual aprueba Proyecto de Investigación titulado: **“DISEÑO DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA CAPTURA DE MATERIAL PARTICULADO DEL POLVO DE MADERA”**.

Callao, 2023

PERÚ

Handwritten signature

Futter

Handwritten signature

Futter

DEDICATORIA

*La presente investigación se dedica a Elizabeth y
Mikaela.*



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| TABLAS DE CONTENIDO | 8 |
| TABLAS DE GRÁFICOS..... | 9 |
| TABLAS DE IMAGENES | 10 |
| RESUMEN | 11 |
| ABSTRACT | 12 |
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 15 |
| 1.1. Descripción de la realidad problemática | 15 |
| 1.2. Formulación del problema | 17 |
| 1.2.1. Problema General | 17 |
| 1.2.2. Problemas específicos..... | 18 |
| 1.3. Objetivos..... | 18 |
| 1.3.1. Objetivo general | 18 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 18 |
| 1.4. Limitantes de la investigación | 19 |
| 1.4.1. Teórica..... | 19 |
| 1.4.2. Temporal | 19 |
| 1.4.3. Espacial | 19 |
| II. MARCO TEÓRICO | 20 |
| 2.1. Antecedentes..... | 20 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales..... | 20 |
| 2.1.2. Antecedente nacional | 23 |
| 2.2. Bases teóricas | 23 |
| 2.2.1. Tecnología de separación | 23 |
| 2.2.2. Separación de partículas | 27 |
| 2.2.3. Industria de los precipitadores electrostáticos | 28 |
| 2.2.4. Factores aerodinámicos que afectan el rendimiento | 29 |
| 2.3. Conceptual..... | 30 |
| 2.3.1. Precipitador electrostático | 30 |
| 2.3.2. Características de los gases que afectan el diseño del precipitador..... | 31 |



| | |
|--|----|
| 2.3.3 Relación entre el campo eléctrico y la tensión en un colector cilíndrico con electrodo de barra..... | 35 |
| 2.3.4 Carga eléctrica de la partícula en un colector cilíndrico con electrodo de barr | 37 |
| 2.3.5 Velocidad de migración de una partícula en un colector cilíndrico con electrodo de barra | 38 |
| 2.3.6 Tiempo de la partícula en recorrer en un colector cilíndrico con electrodo de barra | 38 |
| 2.3.7 Eficiencia del precipitador..... | 39 |
| 2.3.8 Rango de velocidad de captura..... | 40 |
| 2.4. Definición de términos básicos | 41 |
| III. HIPÓTESIS Y VARIABLES | 45 |
| 3.1. Hipótesis | 45 |
| 3.1.1. Hipótesis general..... | 45 |
| 3.1.2. Hipótesis específica..... | 45 |
| 3.2.1. Operacionalización de variable..... | 46 |
| IV. Diseño Metodológico | 47 |
| 4.1 Tipo y diseño de investigación..... | 47 |
| 4.2 Método de investigación | 47 |
| 4.3. Población y muestra | 61 |
| 4.3.1. Población..... | 61 |
| 4.3.2. Muestra..... | 61 |
| 4.4. Lugar de estudio | 61 |
| 4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de información..... | 61 |
| 4.5.1. Técnicas | 61 |
| 4.5.2. Instrumentos..... | 63 |
| 4.6. Análisis y procesamiento de datos..... | 66 |
| V. RESULTADOS | 68 |
| 5.1. Resultado General..... | 68 |
| 5.2. Resultados específicos..... | 69 |
| VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 80 |
| 6.1. Discusión General | 80 |
| 6.2. Discusiones específicas | 80 |

| | |
|---------------------------------|----|
| CONCLUSIONES | 82 |
| RECOMENDACIONES | 84 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 85 |
| ANEXOS | 89 |



TABLAS DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Constantes electricas de materiales | 35 |
| Tabla 2. Rango de la velocidad de captura de la particula cargada..... | 41 |
| Tabla 3. Operacionalización de variable de estudio..... | 46 |
| Tabla 4. Caracteristicas de diseño | 54 |
| Tabla 5. Comparativo sin carga de caudal de efluente y tensión de fuente para ducto de salida de diametro de 2 pulgadas o $5,08 \times 10^{-2}$ m..... | 59 |
| Tabla 6. Técnicas para la recolección de información | 63 |
| Tabla 7. Intrumentos para la recolección de información..... | 65 |
| Tabla 8. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información | 66 |
| Tabla 9. Compartativo de eficiencia de captura con la tensión eléctrica..... | 68 |
| Tabla 10. Dimensiones precipitador en m y mm | 70 |
| Tabla 11. Comparativo de caudal, velocidad de efluente y tensión | 70 |
| Tabla 12. Comparativo de temperatura de salida y tensión | 72 |
| Tabla 13. Comparativo de temperatura y tension | 74 |
| Tabla 14. Comparativo de masas de ingreso y capturada con la tension eléctrica | 75 |
| Tabla 15. Comparativo de concentraciones PM2.5 y PM 10 | 77 |



TABLAS DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfica Eficiencia vs Tensión | 69 |
| Gráfica Velocidad de salida vs Tensión | 71 |
| Gráfica Caudal de salida vs Tensión..... | 71 |
| Gráfica Temperatura salida vs Tensión | 73 |
| Gráfica Temperatura entrada vs Tensión..... | 74 |
| Gráfica Masa ingreso vs Tensión..... | 76 |
| Gráfica Masa ingreso vs Tensión..... | 76 |
| Gráfica de Concentración PM2.5 vs. Tensión | 78 |
| Gráfica de Concentración PM10 vs. Tensión | 78 |



TABLAS DE IMÁGENES

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama Ishikawa..... | 17 |
| Figura 2. Diagrama del sistema respiratorio..... | 25 |
| Figura 3. Tabla de Frank sobre la tecnología a usar..... | 26 |
| Figura 4. Esquemática de un precipitador electrostático de platos con espiral de descarga | 30 |
| Figura 5. Proceso de captura del polvo en el precipitado | 31 |
| Figura 6. Esquemática de un precipitador electrostático cilíndrico con electrodo de barra..... | 36 |
| Figura 7. Esquemática del campo eléctrico dentro de un colector cilíndrico | 37 |
| Figura 8. Soplador modificado | 48 |
| Figura 9. Esquema del Precipitador electrostático | 49 |
| Figura 10. Elementos geométricos del precipitador electrostáticos | 49 |
| Figura 11. Área de colección del cilindro de captura | 53 |
| Figura 12. Sistema colector y electrodo del precipitador..... | 55 |
| Figura 13. Vista frontal del precipitador indicando soporte del colector y electrodo | 55 |
| Figura 14. Vista lateral del precipitador | 56 |
| Figura 15. Vista alzado del precipitador | 56 |
| Figura 16. Vista del precipitador | 57 |
| Figura 17. Vista del accesorio de corte | 57 |
| Figura 18. Acople ventilador y conexión al precipitador | 58 |
| Figura 19. Medidor de partículas PM 2.5 y PM 10 | 60 |
| Figura 20. Lugar de ubicación de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática..... | 61 |



RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo establecer el Diseño del Precipitador Electrostático para la captura de material particulado del polvo de madera. Se seleccionó 20 tacos de madera de 0,200 kg que fue cortado con una amoladora de sierra dentada. Se diseño el precipitador electrostático por medio de las ecuaciones electrostática para tensiones de corriente directa Se uso una fuente de tensión de 20kV de intervalos 1kv para precipitar el polvo de madera en el precipitador electrostático. Se obtuvo como resultado para una tensión de 17kV una eficiencia máxima de 81.3% y en la salida del equipo una concentración PM 2.5 baja de $3 \mu\text{g m}^{-3}$ existiendo disminución moderada de PM 10 baja de $6 \mu\text{g m}^{-3}$. En el ajuste entre la eficiencia y la tensión se obtuvo una ecuación de grado 4 y con coeficiente de determinación $R^2 = 0,9699$. Se concluye que debido al disco de corte se genera el efluente cargado con partículas de forma irregular de mayor densidad que se atorán en el ducto y en la base de la amoladora, la eficiencia de capturada está relacionada con la tensión entre 1kv a 17kv y al diseño geométrico del precipitado electrostático.

Palabras clave: Precipitador electrostático, Tensión eléctrica, Eficiencia, PM 2.5, PM 10.



ABSTRACT

The objective of this investigation was to establish the Design of the Electrostatic Precipitator for the capture of particulate material from wood dust. 20 wooden blocks of 0.200 kg were selected that were cut with a toothed saw grinder. The electrostatic precipitator was designed by means of the electrostatic equations for direct current voltages. A 20kV voltage source of 1kv intervals was used to precipitate the wood dust in the electrostatic precipitator. A maximum efficiency of 81.3% was obtained as a result for a voltage of 17kV and at the equipment output a low PM 2.5 concentration of $3 \mu\text{g m}^{-3}$ with a moderate decrease in low PM 10 of $6 \mu\text{g m}^{-3}$. In the adjustment between efficiency and voltage, an equation of degree 4 was obtained with a coefficient of determination $R^2 = 0,9699$. It is concluded that due to the cutting disc, the effluent loaded with irregularly shaped particles of higher density that get stuck in the duct and at the base of the grinder is generated, the capture efficiency is related to the voltage between 1kv to 17kv and to Geometric design of electrostatic precipitate.

Keywords: Electrostatic precipitator, Electrical voltage, Efficiency, PM 2.5, PM 10.



INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se usan tecnologías que se utilizan para la reducción de partículas del aire ya sea en proceso natural o producidos por el hombre, entre ellas esta los precipitadores electrostáticos. Esos equipos son de alto costo por tu tamaño, pero poseen recuperación de inversión en comparación con los filtros de mangas cuyo reemplazo sube costos.

A nivel nacional, no hay mucho estudio sobre diseño de precipitadores electrostático, más aún no existe su aplicación en aserraderos o carpintería cuyo personal está expuesto al polvo de madera que poseen partículas en micrómetros totalmente peligrosas a la salud, pero solo la normatividad nacional da en periodo de tiempo anual o en 24 horas el monitoreo de material particulado PM 2,5 y PM 10.

El diseño de un precipitador electrostático, tiene como misión, la captura en masa del polvo de madera y la medida de las partículas PM 2,5 y PM 10 que escapan del equipo, por ello es necesario su diseño a partir de las condiciones de operatividad el equipo. El funcionamiento de un principiador electrostático usa conceptos, teorías sobre el compartimento de un efluente cargado obteniendo datos numéricos en diseño y toma de datos (captura del polvo de cemento y concentración en el escape del PM 2,5 y PM 10), con los datos cumplen que el sistema debe tener causa-efecto por eso se realizó 8 pasos a seguir desde su diseño hasta el análisis de los datos. Existir limitado conocimiento tecnológico (teórico y práctico) y metodológico, en la construcción de precipitar electrostáticos en dimensiones pequeñas por el desarrollo del presente proyecto. Los resultados que se obtuvieron se encontró la correlación entre las variables a partir del ajuste al diseño realizado en el cual se obtuvo una moderada eficiencia de captura del polvo de madera.



El proyecto investigación contiene los capítulos: El capítulo I, el planteamiento del problema (Descripción de la realidad problemática, formulación del problema, objetivos, justificación y limitantes). El capítulo II, el Marco Teórico (antecedentes, bases teóricas, conceptual, definición de términos). El Capítulo III, las Hipótesis y Variables (hipótesis general y específicas, definición conceptual de variables). El capítulo IV, Diseño Metodológico (tipo y diseño de investigación, método de investigación, población y muestra, lugar de estudio, técnicas de recolección de la información, análisis y procesamiento de datos). El capítulo V, Resultados. El capítulo VI, Discusión de resultados. Los ítems; Conclusiones, Recomendaciones, Referencias Bibliográficas y Anexos.



I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Cada año, las empresas madereras (carpinterías, secadoras y cortadoras), trabajan con la madera que es muy perjudicial para la salud de las personas, la ventilación por aspiración existente en las empresas no es suficientes para reducción de estas partículas del polvo de madera que se encuentran suspendidos en el aire, y más aún, el personal que está expuesto desconoce los peligros inminentes la inhalación del polvo de madera (Álvarez & Bonilla, 2018). Existen dos tipos de madera la blanda (cedro, pino) y la dura (caoba, roble, nogal, aliso), de estas últimas las partículas gruesas de diámetro mayor a $0,01mm$, son generadora de cáncer nasal. (Ministerio de Trabajo e Inmigración, 2011).

Las área de trabajos en las carpinterías son espacios cerrados que producen viruta y partículas de polvo de madera, producidos durante el proceso de corte, lijado, agujerado y amoladora, que al no tener un sistema de captura adecuado, estos polvos de suspensión afecta directamente al sistema respiratorio del personal que manipula a la madera, generando disminución de la vida útil de la maquinaria y reduce la calidad de lacado de los productos. (Márquez & Ulloa, 2018).

En el Perú, el mayor uso de las maderas blandas son el pino y cumala; y las maderas duras son tornillo, ishpingo y roble y. En la actualidad el pino chileno que se importa en el Perú, es el más usado en los aserraderos y carpinterías y fabricas que elaboran muebles, parihuelas, embalajes, debido a su presentación y al bajo costo. (Acuña, Cárdenas, Gutierrez, & Huamanyauri, 2019).



La contaminación por material particulado (PM) es uno de los problemas graves de calidad del aire que se genera las actividades económicas que afecta la salud de las personas. Las particuladas estudiadas PM10 y 2.5 micras PM2.5 (partículas con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 μm y 2,5 μm , respectivamente, son contaminantes atmosféricos de criterio definidos en los Estándares Nacionales de Calidad del aire peruano. (MINAM, 2017).

Las tecnologías que se utilizan para la reducción de partículas del aire interior incluyen sistemas de filtración, filtración y precipitadores electrostáticos. Siendo Los precipitadores electrostáticos (PES) los más eficientes para captura de partículas de polvo, usan alto voltaje para la ionización del aire y la carga eléctrica de las partículas para atraparlas. La eficiencia de recolección de los precipitadores electrostáticos depende del tamaño de las cargas en el aire y puede alcanzar hasta el 95–98 %, para las partículas más pequeñas (0,3–2,5 μm) y el 99 % para las partículas más grandes (>2,5 μm). Poseen alta eficiencia en la remoción de partículas finas, junto con la capacidad de purificar grandes cantidades de gas entrante y tienen bajo costo de mantenimiento, siendo la principal ventaja de los PES sobre otros equipos de filtrado. (Behjat, Rezaei-Zare, & Naderian, 2021).

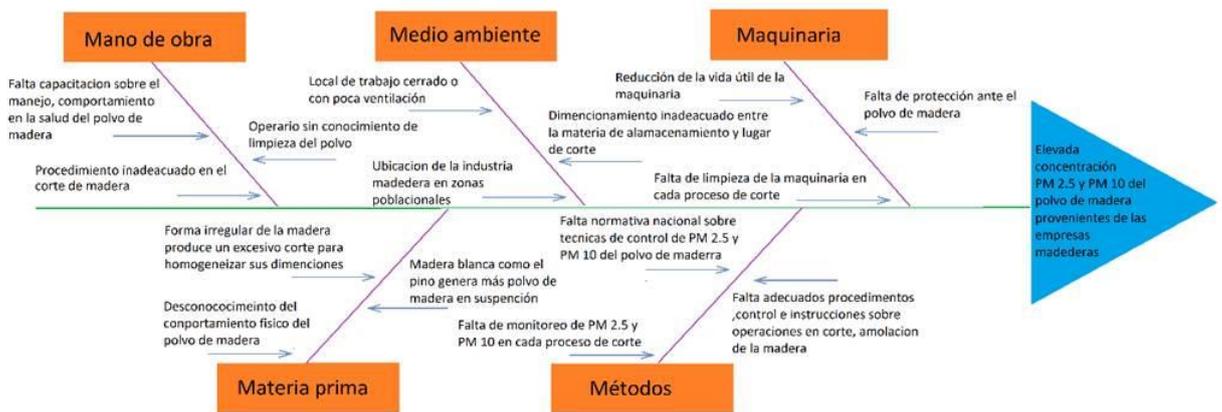
Se observa que la normatividad nacional, los Estándares de Calidad Ambiental para el Aire ECA, para material particulado es genérico no especificando si las partículas PM10 y PM2.5 son polvos metálicos, polvo de madera, polvo de construcción etc., debido a que el comportamiento de esas partículas en el aire depende su densidad y características eléctricas conductivas o no conductivas (aislante). Así mismo, no existe en la normatividad nacional, propuestas a tratamiento a seguir, como el uso de precipitadores electrostático, indicando solo el método monitoreo a seguir en periodos de tiempo.



Actualmente, no hay diseños en elaboración de sistemas de captura electrostática para captura de polvo de madera, siendo los más comunes las cámaras de placas rectangulares que poseen los precipitadores electrostáticos convencionales para tratar gases o partículas generadas por las industrias.

En la Figura 1, se muestra el esquema del diagrama Ishikawa que muestra las causas identificadas y el efecto para llegar a la problemática.

Figura 1. Diagrama Ishikawa



Fuente. Elaboración propia

Ante ello, se buscará demostrar que, a partir del diseño de precipitador electrostático, se logrará una mejor captura de partículas del polvo de madera.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿De qué manera el diseño de un Precipitador Electrostático produce la captura del material particulado del polvo de madera?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la relación entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado del polvo de madera?
- ¿Cómo influye el polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático?
- ¿Cómo influye para el polvo de madera, la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Establecer el Diseño del Precipitador Electrostático para la captura de material particulado del polvo de madera.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la relación entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado de polvo de madera.
- Analizar el polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático.
- Determinar para el polvo de madera, la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático.



1.4. Limitantes de la investigación

1.4.1. Teórica

Para el desarrollo de la investigación en laboratorio, las investigaciones publicadas, se diseñan los precipitadores electrostáticos para tratar el polvo metálico, algodón y agentes gaseosos etc., y, al no tener información sobre captura de polvo de la madera, con los resultados obtenidos se hará la comparación de eficiencia con los estudios ya existentes en porcentaje de eficiencia de captura.

1.4.2. Temporal

La investigación se realizará 20 ensayos en un periodo de 20 s. El material que se usará será el taco de madera pino chileno de 0.5 kg para cada ensayo. Los tacos de madera como muestran para generar polvo, serán adquiridos del aserradero que se ubica en el cercado del Callao.

1.4.3. Espacial

El aserradero de donde los se adquirirían los tacos de madera, al estar ubicado al está alejado al laboratorio de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, es una limitante a la presente investigación. Todas las pruebas desde el diseño generación de polvo a partir de los tacos y captura se realizarán en los laboratorios de la mencionada facultad.



II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Gonzalez, P. (2019). En la investigación titulada; ***Precipitador Electrostático a Escala Piloto para el Laboratorio de Aire de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Bucaramanga.*** Tuvo como objetivo la construcción de un precipitador electrostático en acero inoxidable y de alta eficiencia de captura para fines didácticos, tuvo como metodología la procedimental al realizar pasos desde el diseño geométrico, generación de tensión pulsante (no continua) que llega de 10KV a 13KV, partir de la glicerina $C_3H_3O_3$ se generó una niebla a partir de una fuente de humo y tubo otra muestra que fue la quema de papel. Tuvo como resultado la operatividad del equipo proponiendo los ensayos con duración en minutos capturando la niebla y la quema de papel midiendo los PM2.5 y PM10, todo ello medida observacional cuantitativa y cualitativa, y concluye el autor que la cámara por ser de acero posee alta conductividad eléctrica y está relacionada la eficiencia de captura.

Jaworek, A. & al. (2015). En la investigación titulada; ***Dust particles precipitation in AC/DC electrostatic precipitator.*** Tuvo como objetivo el diseño de un precipitador electrostático para la captura de partículas submicrónicas y nanopartículas de los gases de combustión. Tuvo como metodología la procedimental que consistía en hacer que el gas entre en dos etapas, donde se la cargaba en la primera etapa con tensión alterna AC entre 12 KV y 15 KV y en la segunda etapa de captura tensión DC a 20 KV. Tuvo como resultado que equipo la eficiencia en concentración de partículas PM 1 es superior 95% pero es menor 90% para partículas menores 300 nm. Para concentración de PM 2.5 fue superior al 95% y la eficiencia de recolección de masa fue cercana a 99% y la eficiencia concentración de las partículas entre 300 nm y 1 μm fue mayor 95%. Concluyeron que las dos etapas que posee el sistema y la forma de tensión de

misma está relacionada con la captura de partículas en escala micrométrica o nanométrica.

Sierra, D. & al. (2014). En la investigación titulada; ***Design and Implementation of a Laboratory Scale Prototype of an Electrostatic Precipitator to Control Particulate Matter in Areas of Coal Mining and Coke Production***. Tuvieron como objetivo la construcción de un prototipo de precipitador electrostático a escala de laboratorio con la instrumentación necesaria para realizar el registro de datos en tiempo real de las variables de operación para aplicar en el proceso de coquización de una empresa minera de carbón en la localidad de Samacá. Tuvo como metodología la procedimental con la selección del material no corrosivo, diseño en CAD, la construcción del equipo en forma modular considerando el flujo de entrada y salida de aire y por separado se implementó el sistema eléctrico y control de forma independiente por seguridad para después unirlos al precipitador electrostático la toma de datos de los ensayos fue de pasos cada 15 minutos. Tuvo como resultado pruebas donde se analizó que la humedad dentro de la cámara era en 1 grado mayor a la temperatura en la salida, la humedad dentro de la cámara fue menor a la humedad en el exterior. Concluye que el uso del precipitador electrostático no es conveniente usarlo en las etapas de trituración y troceado del carbón, es más conveniente usarlo en etapas donde haya flujo de emisión de partículas menores a PM 2.5 pero no cerca a la colmena del horno donde la temperatura llega a 700 °C.

Manuzon, R. (2012). En su tesis doctoral titulada; ***Electrostatic Precipitation Technologies for the Mitigation of Particulate Matter Emissions from Poultry Facilities***. Tuvo como objetivo El objetivo general el desarrollo de tecnologías de precipitadores electrostáticos para reducir eficazmente las emisiones al aire de las operaciones de alimentación de aves de corral. La metodología fue procedimental, empezando desde el diseño considerando como indicadores a la tensión



en KV, velocidad m/s y concentración $\frac{mg}{m^3}$ y la operatividad del equipo considerando las propiedades de la partícula y el campo eléctrico generado para el precipitador. Tuvo como resultados que para recolectar al menos el 90% de todas las partículas, las condiciones de operación fue 9 kV y una velocidad de aire cargado 2,5 m/s. El consumo de energía del precipitador electrostático para recoger el 90% de las partículas totales es de 90 vatios/m² del área de la sección transversal precipitador electrostático. Concluye que los precipitadores electrostáticos son equipos efectivos de mitigación de partículas materiales PM, que pueden diseñarse adecuadamente solo si se comprenden bien sus características de las emisiones de PM, entre ellas están; la concentración, tamaño, densidad de partículas, resistividad que están relacionadas con el rendimiento precipitador electrostático.

Rodríguez, J., & al. (2017). En su investigación titulada; ***Diseño y prototipo de un precipitador electrostático***. Tuvo como objetivo la construcción de un precipitador electrostático (PES). La metodología fue procedimental, empezando des el diseño y considerando la fuente eléctrica en el cual utilizó un transformador conocido como *Fly-back* que eleva tensión alterna 120 V a 27 000 V continua, un sistema Arduino conectado a un sensor de calidad de aire MQ-135 que tiene un rango de 10 ppm a 1000 ppm se utilizó como muestra la quema de papel periódico para tiempo de ensayo de 13 s. Tuvo como resultados que a partir de 4 segundos la concentración de partículas dentro de la cámara cercana 400 ppm a la concentración de partículas fuera de la cámara que fue cercana a 300 ppm. Concluye que el equipo posee ventajas en su construcción por la facilidad de adquirir los materiales y el diseño del mismo, indica que se puede aplicar a partículas provenientes del humo, las cenizas producidas en la combustión del carbón, cigarrillos, madera y papel.



2.1.2. Antecedente nacional

Mamani, J. (2019). En su tesis para título profesional titulada; ***Diseño e Implementación de un Prototipo a Escala de un Precipitador Electrónico para el Control de Polución en una Industria Cementera***. Tuvo como objetivo elaborar el diseño e implementación de un prototipo a escala de un precipitador electrostático para el control de contaminación en la industria cementera. La metodología fue procedimental, que empezó desde el diseño de la fuente de tensión pulsante y la cámara con electrodos planchas de forma estrellada y la implementación de un controlador para el funcionamiento, se usó como muestra el polvo de cemento seco y humo de combustión. Los resultados que tanto para el humo de combustión y polvo de cemento, logró retener más del 95% de partículas mayores a $1\mu m$ y. Concluye que su construcción del precipitador electrostático se requiere conocimientos de física electrostática, así como leyes, normas ambientales para el control de polución en la industria ya sea cementera u otras.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Tecnología de separación

El control de la contaminación del aire se puede describir generalmente como una tecnología de separación. Los contaminantes, ya sean gases, aerosoles o partículas sólidas, se separan de un gas portador, que suele ser aire. Separamos estas sustancias porque, si se hace estos contaminantes pueden afectar negativamente nuestra salud y la del medio ambiente. La importancia primordial es el efecto de los contaminantes en nuestro sistema respiratorio, donde el impacto es más notable. (Schiffner, 2021).

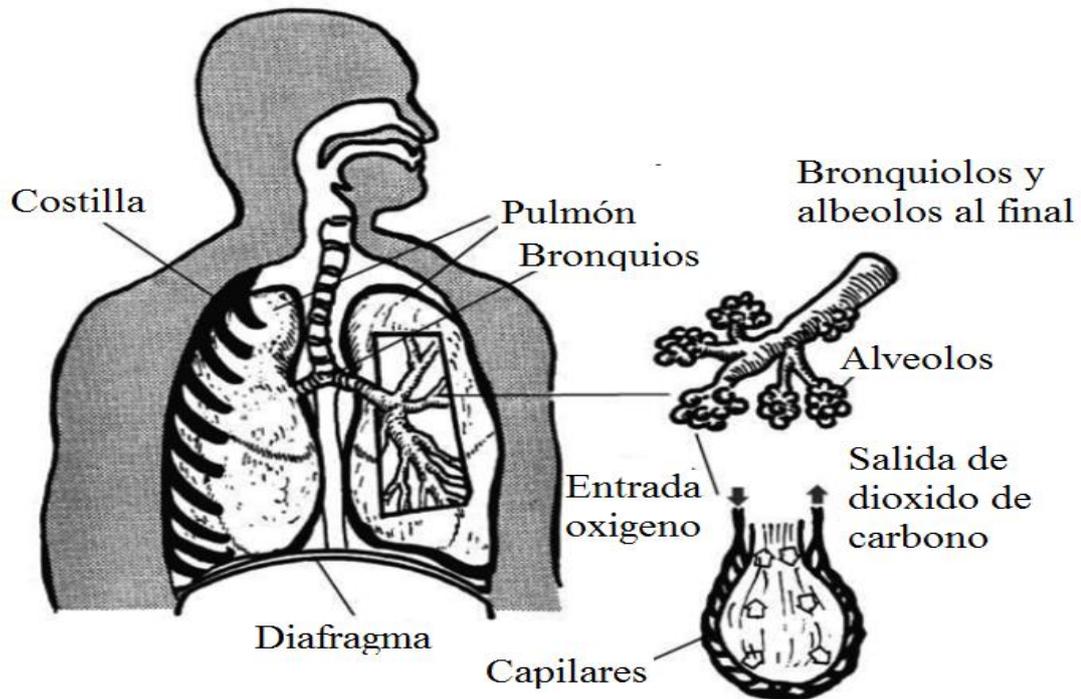
Los contaminantes gaseosos son compuestos que existen como gas en condiciones ambientales normales. Estas condiciones, por lo general, lo normal se define como las condiciones ambientales. Estos gases pueden tener, momentos antes del lanzamiento, en forma



líquida o incluso sólida, sin embargo, el estado en que se encuentran justo antes de entrar en el dispositivo de control es lo que es más importante. Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas finamente divididas que normalmente tienen menos de 0,5 μm diámetro. A menudo resultan del enfriamiento repentino (condensación) de un gas contaminante por combustión parcial o por efecto catalítico en fase gaseosa. Como última condición, un contaminante en fase gaseosa puede combinarse para formar un aerosol en la presencia de, por ejemplo, un contaminante metálico. Operaciones de procesamiento tales como moler, tostar, secar, calcinar, recubrir o metalizando cualquiera que sea el estado del contaminante, la función del control de la contaminación del aire es tener un dispositivo cuya meta es separar ese contaminante del gas portador para que nuestro sistema respiratorio no llegue. Nuestro sistema respiratorio es nuestro sistema de separación natural. En la Figura 2, se muestra las principales partes del sistema respiratorio humano. Las partículas grandes se eliminan en el más grande de las aberturas del área respiratoria superior, las partículas más pequeñas se eliminan en el área bronquial, y las partículas más pequeñas se eliminan (poco probable) en el diminuto saco alveolares de los pulmones. (Schiffner, 2021).



Figura 2. Diagrama del sistema respiratorio



Fuente. (Schifftner, 2021)

El control de la contaminación del aire realmente imita a la Madre Naturaleza en su función de separación. En Limpieza general de gas de tipo húmedo con bajo consumo de energía (aquellos que usan agua como medio de lavado) Los dispositivos eliminan partículas grandes, los dispositivos de mayor energía eliminan partículas más pequeñas. Incluso dispositivos de mayor energía (o tecnología especial) eliminan contaminantes. La eliminación está en función del orden decreciente del tamaño del contaminante, estas características se codificaron en un gráfico útil conocido como el gráfico de Frank, que se muestra en la Figura 3. Lleva el nombre de su creador, un ingeniero de American Air Filtrar. En la Figura 3, se muestra tamaños de partículas comunes y tipos generales de recolección mecanismos y dispositivos utilizados para su control. Los contaminantes se agrupan por sus características de asentamiento. (Schifftner, 2021).

Figura 3. Tabla de Frank sobre la tecnología a usar

| DIAM. OF PARTICLES IN MICRONS | U.S. STD. MESH | SCALE OF ATMOSPHERIC IMPURITIES | RATE OF SETTLING IN F.P.M. FOR SPHERES (WET) AT 70°F. | DUST PARTICLES CONTAINED IN 1 CUB. FT. OF AIR (See Foot Note) | | LAWS OF SETTLING IN RELATION TO PARTICLE SIZE (Lines of Demarcation approx.) | | |
|-------------------------------|----------------|---|---|---|--|---|--|---------|
| | | | | NUMBER | SURFACE AREA IN SQ. IN. | | | |
| 8000 | | | 1750 | | | PARTICLES FALL WITH INCREASING VELOCITY $C = \sqrt{\frac{2gs_s}{3Ks_2}}$ $C = 24.9\sqrt{D_s}$ STOKES LAW $C = \frac{2r^2g(s_s - s_2)}{9\eta}$ CUNNINGHAM'S FACTOR $C = C'(1 + K\frac{\lambda}{r})$ $C' = C$ STOKES LAW $K = .8$ TO $.86$ | | |
| 6000 | | | | | PARTICLES SETTLE WITH CONSTANT VELOCITY. FOR AIR AT 70°F. $C = 300,460s_2d^2$ $C = .00592s_2D^2$ | | | |
| 4000 | | | | | | | PARTICLES MOVE LIKE GAS MOLECULES BROWNIAN MOVEMENT $A = \sqrt{\frac{RT}{N}} \frac{1}{3\pi\eta r}$ | |
| 2000 | 10 | RAIN, INDUSTRIAL DUST | 790 | .075 | | | | .000365 |
| 1000 | 20 | DRIZZLE, HEAVY INDUSTRIAL DUST | 555 | .6 | | | | .00073 |
| 800 | | | | | | | | |
| 600 | | | | | | | | |
| 400 | 60 | POLENS CAUSING RHY FEVER, PARTICLES LARGER THAN IDIOMATIC SEED WITH NAKED EYE | 59.2 | .75 | | | | .00365 |
| 200 | 100 | FOG, DUST, CYCLONE SEPARATORS | 14.8 | 600 | | | | .0073 |
| 150 | 150 | TEMPORARY ATMOSPHERIC IMPURITIES, DYNAMIC PRECIPITATOR | 5.92 | 75000 | | | | .0365 |
| 100 | 250 | DYNAMIC PRECIPITATOR WITH WATER SPRAY | 1.48 | 600,000 | | .073 | | |
| 80 | 325 | ULTRA MICROSCOPE | .007 | 75x10 ⁶ | 365 | | | |
| 60 | 500 | AIR FILTERS, ATMOSPHERIC DUST | .002 | 60x10 ⁷ | .73 | | | |
| 40 | 500 | MEAN FREE SPACE BETWEEN GAS MOLECULES | .00007 | 75x10 ⁹ | 3.65 | | | |
| 20 | 1000 | ELECTRICAL PRECIPITATORS | 0 | 60x10 ¹⁰ | 7.3 | | | |
| 10 | 2000 | PERMANENT ATMOSPHERIC IMPURITIES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 36.5 | | | |
| 8 | 2500 | SMOKES | 0 | 60x10 ¹⁰ | 73.0 | | | |
| 6 | 3000 | AVERAGE SIZE OF TOBACCO SMOKE | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| 4 | 4000 | ULTRA MICROSCOPE | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| 2 | 5000 | MEAN FREE SPACE BETWEEN GAS MOLECULES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| 1 | 6000 | ELECTRICAL PRECIPITATORS | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .8 | 7000 | PERMANENT ATMOSPHERIC IMPURITIES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .6 | 8000 | SMOKES | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .4 | 9000 | AVERAGE SIZE OF TOBACCO SMOKE | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .2 | 10000 | ULTRA MICROSCOPE | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .1 | 11000 | MEAN FREE SPACE BETWEEN GAS MOLECULES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .08 | 12000 | ELECTRICAL PRECIPITATORS | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .06 | 13000 | PERMANENT ATMOSPHERIC IMPURITIES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .04 | 14000 | SMOKES | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .02 | 15000 | AVERAGE SIZE OF TOBACCO SMOKE | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .01 | 16000 | ULTRA MICROSCOPE | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .008 | 17000 | MEAN FREE SPACE BETWEEN GAS MOLECULES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .006 | 18000 | ELECTRICAL PRECIPITATORS | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .004 | 19000 | PERMANENT ATMOSPHERIC IMPURITIES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .002 | 20000 | SMOKES | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .001 | 21000 | AVERAGE SIZE OF TOBACCO SMOKE | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .0008 | 22000 | ULTRA MICROSCOPE | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .0006 | 23000 | MEAN FREE SPACE BETWEEN GAS MOLECULES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .0004 | 24000 | ELECTRICAL PRECIPITATORS | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .0002 | 25000 | PERMANENT ATMOSPHERIC IMPURITIES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .0001 | 26000 | SMOKES | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .00008 | 27000 | AVERAGE SIZE OF TOBACCO SMOKE | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .00006 | 28000 | ULTRA MICROSCOPE | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |
| .00004 | 29000 | MEAN FREE SPACE BETWEEN GAS MOLECULES | 0 | 75x10 ¹⁰ | 365 | | | |
| .00002 | 30000 | ELECTRICAL PRECIPITATORS | 0 | 60x10 ¹⁰ | 730 | | | |

Fuente. (Schiffner, 2021)

Las Partículas más grandes (por encima de unos 2 µm de diámetro aerodinámico) generalmente siguen la ley de Stokes con respecto a las velocidades de sedimentación. Por debajo de unos 2 µm, se necesita un factor de corrección (factor de corrección de Cunningham), para ajustar Stokes para el tiempo de sedimentación más largos para estas partículas. (Schiffner, 2021)

En la Figura 3, el recuadro rojo indica la tecnología de precipitador electrostático para partículas inclusive 0.001 μm .

Para dispositivos de separación de tipo seco, como colectores de filtros de tela (cámaras de bolsas) y **precipitadores electrostáticos**, el aporte de energía es constante independientemente del tamaño de las partículas. Incluso entre estos diseños, sin embargo, los aumentos en la entrada de energía producen aumentos en la recogida de contaminantes. Las cámaras de filtros suelen estar recubiertas con un material fino para reducir la permeabilidad de recogida y mejorar la captura del material particulado. Esto se suma a la caída de presión, lo que exige, a su vez, un aumento en entrada de energía. Los precipitadores a menudo aumentan el tamaño del campo eléctrico. Para eliminar las partículas más finas se requiere una mayor entrada de energía. Estos dispositivos secos, en general, utilizan menos total potencia de entrada que los dispositivos húmedos equivalentes al eliminar partículas. (Schiffner, 2021).

2.2.2. Separación de partículas

La separación de partículas es un paso crítico en muchas ingenierías energéticas y ambientales. Existen aplicaciones en la reducción de la emisión de partículas antes de que un gas de combustión sea descargado a la atmósfera, la separación de partículas es un paso importante para alternativas desarrollo contra los contaminantes producidos por los combustibles. Por ejemplo, para limpiar el combustible gaseoso de la gasificación, las moléculas de gas pesado deben eliminarse de la corriente mediante membranas, sin embargo, esto no se puede lograr sin la eliminación de partículas de la corriente de gas, de lo contrario la membrana perderá su función al obstruirse. En general, una partícula se puede separar de su gas portador por acción gravitacional. Sedimentación, separación ciclónica, filtración, lavado húmedo, separación por fuerza térmica y separadores eléctricos llamados **precipitadores electrostáticos** (PES). El



rendimiento de un dispositivo de separación de partículas se puede cuantificar mediante lo siguiente tres parámetros principales: caída de presión, capacidad y, lo que es más importante, eficiencia η . (Tan, 2014).

2.2.3. Industria de los precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos (PES) se utilizan comúnmente en aplicaciones industriales y en plantas de calor y energía, con eficiencias de recolección a menudo superiores al 99,5 %. El precipitador al poseer los electrodos de descarga hechos de alambres y las superficies de recolección son placas de acero el cual gas fluye entre las placas. El voltaje entre electrodos es suministrado por rectificadores de alto voltaje, comúnmente en el rango de tensión continua a corriente directa (DC) entre 20 kV a 80 kV. Las partículas cargadas pierden la mayor parte de su carga en las placas colectoras, pero tienden a aglomerarse entre sí, formando una torta de polvo. La torta de polvo en los platos es removida periódicamente por vibración mecánica que golpean los platos. El impacto debe ser lo suficientemente fuerte como para desprender hojas de polvo, sin causar un nuevo arrastre innecesario de polvo en el gas. La mayor parte de la torta de polvo cae en las tolvas debajo de las placas, pero parte siempre se vuelve a arrastrar. Por lo general, un PES consta de al menos dos sistemas en serie y también algunos en paralelo para grandes flujos de gas. Cada sistema se controla individualmente con transformadores de potencia independientes. La mayor parte del polvo, en masa, se encuentra en las fracciones de partículas de mayor tamaño, que son capturadas más fácilmente por el precipitador. Por lo tanto, el primer sistema recoge la mayor parte del polvo y necesita golpes más frecuentes. La mayor parte del polvo que vuelve a arrastrarse desde el primer sistema es recapturada por el siguiente sistema, que recoge menos polvo y necesita golpes menos frecuentes. En este sentido, la emisión de polvo por golpeteo se reduce al aumentar el número de sistemas en serie. Un mayor número



de sistemas aumenta el rendimiento del PES, afecta el costo de inversión de la instalación. Dado que la concentración de partículas cae a lo largo de la dirección del flujo de gas, la corriente eléctrica entre los electrodos es más alta en el primer sistema. La alta presencia de partículas cargadas eléctricamente en el primer sistema generalmente implica que la frecuencia de chispas es más alta en este sistema. (Bäfver, Yngvesson, & Niklasson, 2012).

Durante la construcción el área de la sección transversal del PES generalmente se elige para proporcionar una velocidad de gas promedio de menos de aproximadamente 2 m/s, para proporcionar suficiente tiempo de residencia y reducir el reingreso. La distribución transversal uniforme del gas que fluye a través del precipitador es muy importante para maximizar su eficiencia de recolección. La necesidad de una distribución uniforme del gas, que podría lograrse mediante una serie de pantallas y deflectores, debe evaluarse dependiendo de la investigación, buscando siempre en mantener la pérdida de potencia por caída de presión lo más baja posible. (Bäfver, Yngvesson, & Niklasson, 2012).

2.2.4. Factores aerodinámicos que afectan el rendimiento

En cualquier precipitador, el flujo de gas que transporta las partículas que deben ser precipitados juega un papel importante. Las tasas de volumen de gas entre paralelo las cámaras conectadas no deben desviarse demasiado del valor medio utilizado para el dimensionamiento, y la distribución del flujo de gas a través de la cara de cada cámara individual debe estar dentro de ciertos límites. Además, es importante incluir la turbulencia y el flujo secundario, generado a partir de estructuras internas y del propio viento corona (si se usa un precipitador electrostático). (Parker, Applied Electrostatic Precipitation, 1996).

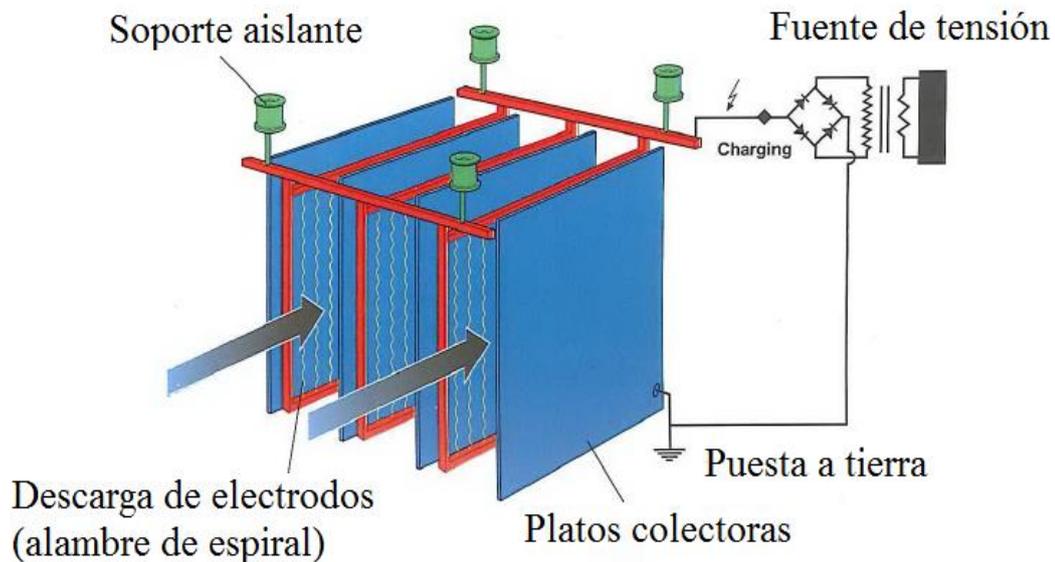


2.3. Conceptual

2.3.1. Precipitador electrostático

El precipitador electrostático (PES), es un aparato universal para limpieza de gases industriales de partículas sólidas y húmedas. En la figura 4, se muestra esquema de un precipitador electrostático. Posee altas eficiencias de recolección (aproximadamente 99%) y los bajos gastos de energía son los principales beneficios de los PES. (Ivanenko, 2015).

Figura 4. Esquemática de un precipitador electrostático de platos con espiral de descarga



Fuente: (Ivanenko, 2015)

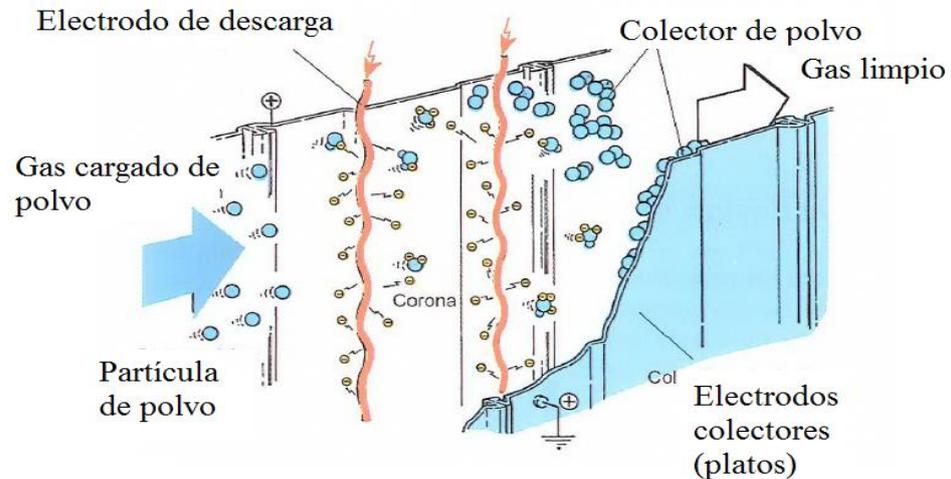
El método de precipitación electrostática se describe a continuación en la Figura 5, indica que las partículas se cargan con iones de gas que se forman en el campo eléctrico de alta intensidad, y después de eso, se mueven acercándose al electrodo colector que va conectado a tierra. En el electrodo puesto a tierra ellos adhieren y descargan. Cuando la capa de polvo se forma en los electrodos colectores, es removido por un sistema de mecanismo de martillo de impacto y recogido en las tolvas debajo de los PES. (Ivanenko, 2015).

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

El proceso descrito de captura de polvo se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Proceso de captura del polvo en el precipitado



Fuente: (Ivanenko, 2015)

2.3.2. Características de los gases que afectan el diseño del precipitador

a) Composición

El requisito principal del gas que transporta las partículas es que debe ser capaz de mantener un campo eléctrico tan alto como sea posible y permitir el flujo de corriente corona. Esta es generalmente la situación con la mayoría de procesos industriales en planta. Sin embargo, la composición de algunos gases puede afectar las condiciones de funcionamiento eléctrico del precipitador, pero generalmente las características de la corona se modifican por la presencia de electropositivo o gases electronegativos, es decir, gases que absorben o rechazan fácilmente los iones negativos. Aunque normalmente uno piensa que los precipitadores electrostáticos solo son aplicados para la eliminación de partículas de las corrientes de gas, el proceso ha sido aplicado satisfactoriamente para la eliminación de partículas de las corrientes de aceite, el criterio principal es que el aceite

debe ser lo suficientemente aislante para mantener un campo. Las instalaciones utilizan alta tensión alterna CA. Para el tratamiento inicial, seguido de una alta tensión continua CC. Otros usan solo corriente directa DC para el tratamiento (Parker, Electrical Operation of Electrostatic Precipitators, 2007).

b) Temperatura

Una ventaja del tipo seco de precipitador es que el gas en la mayoría de las industrias se puede entregar directamente al precipitador desde el proceso sin la necesidad de enfriamiento o tratamiento adicional. Esto significa que lo recolectado el material se captura útilmente en un estado seco para su posterior eliminación/reutilización y que cuando los gases limpios se emiten desde la chimenea son muy flotantes y generalmente a una temperatura lo suficientemente alta como para resultar en un vapor libre de descarga. La temperatura del gas impacta principalmente en los materiales de construcción de la cámara del precipitador, el acero al carbono se adopta como el material rentable para la mayoría de las aplicaciones, que trabaja a la temperatura de funcionamiento hasta unos 400 °C. En el caso de las plantas, otro caso de la escala de temperatura, digamos por encima de unos 500 °C, aparte de se usa de acero inoxidable o aleaciones con alto contenido de níquel, ya que la energía cinética de las moléculas de gas aumenta con temperatura, esto da como resultado un aumento significativo en las características de descarga eléctrica del gas, que debe abordarse en la etapa de diseño en términos de formato del electrodo de descarga y dimensionamiento del conjunto transformador rectificador o fuente de tensión alta. Para gases que contienen una proporción de gases electropositivos, como los halógenos o hexafluoruro de azufre, estas moléculas reducen el impacto del aumento energía



cinética molecular de los gases y, si se conoce su presencia en la etapa de diseño, este conocimiento puede ayudar en el diseño del electrodo de descarga y con ello se tenga la información para el diseño del sistema y de la fuente de alimentación. Se han instalado precipitadores en varios procesos donde el las temperaturas van desde ambiente hasta 850 °C. (Parker, Electrical Operationof Electrostatic Precipitators, 2007).

c) Presión

La mayoría de las plantas de proceso operan cerca de condiciones de presión ambiental, la presión del gas no es un efecto importante que deba abordarse excepto para asegurarse de que la carcasa es "hermética al gas" y resistirá el funcionamiento condiciones, es decir, para evitar la salida de gas de proceso o la entrada de aire ambiente. En el caso de procesos de combustión a alta presión y alta temperatura, la presión, unos 7 bar, por lo general implica que la carcasa del precipitador está construida en forma de sección transversal circular u ovoide. A estas presiones, el efecto del aumento de la energía cinética de las moléculas de gas debido a la alta temperatura tiende a mitigarse ya que la alta presión reduce la corriente de corona más alta. La extracción de cenizas volantes de estas carcasas a presión presenta una gran dificultad de diseño. y, normalmente, se utilizan varias etapas de reducción de presión para satisfacer satisfactoriamente como ejemplo la eliminación del polvo de ceniza, manteniendo la presión de funcionamiento dentro del recipiente. (Parker, Electrical Operationof Electrostatic Precipitators, 2007).

d) Caudal de gas

Es de importancia en el dimensionamiento inicial de un precipitador, por ello, es importante tener un conocimiento



preciso del flujo total de gas de modo que el se puede evaluar el tiempo de contacto correcto para cumplir con la eficiencia requerida, también hay una velocidad de gas óptima a considerar. Esta velocidad óptima del gas, se determina para en cierta medida por las características como ejemplo el polvo de cenizas; una velocidad de diseño demasiado alta para un sistema seco la aplicación del precipitador puede dar como resultado la limpieza de partículas y el posible rearrastre de golpes, mientras que una velocidad demasiado baja restará valor a la colección general eficiencia, ya que la deposición a lo largo de la placa colectora, siendo la mayor parte recolectada cerca de la entrada, distorsiona negativamente el campo de precipitación eléctrica. Es importante que, para optimizar la eficiencia de recolección, el gas distribución a través del área frontal del precipitador debe ser tan uniforme en lo posible. (Parker, Electrical Operation of Electrostatic Precipitators, 2007).

e) Constante dieléctrica

Todo capacitor simple consta de dos placas conductoras paralelas separadas por un medio llamado dieléctrico con permitividad o constante dieléctrica k , siendo un dieléctrico es un material no conductor como caucho, vidrio o papel encerado, etc. (Jawad, Al-Rahamnah, Said, Muwafi , & Al-Issawi , 2011).



En la Tabla 1, se muestra las constantes dieléctricas de ciertos materiales, que incluye el valor numérico y intervalos para la madera seca y húmeda.

Tabla 1
Constantes eléctricas de materiales

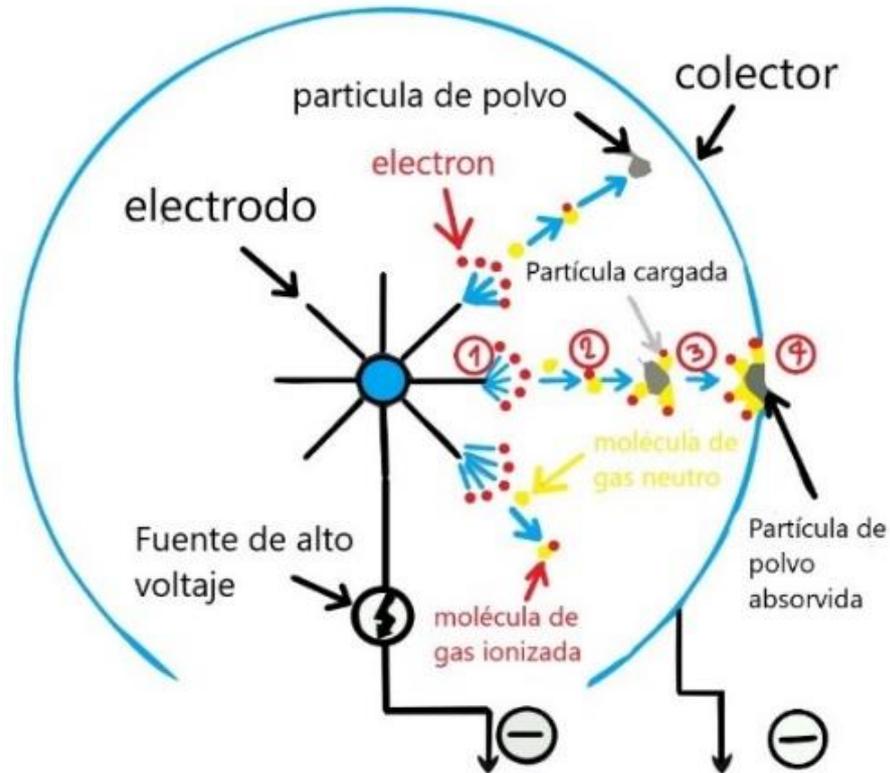
| Material | Constante dieléctrica k |
|--------------------|---|
| Madera seca | 2 - 6 |
| Madera mojada | 10 - 30 |
| Agua (21,1°C) | 80,4 |
| Plástico | 3,7 - 10 |
| Combustible diésel | 4,0 |
| Aire seco (20°C) | 1,000536 |
| Aire | 1 |

Fuente: (Jawad, Al-Rahamnah, Said, Muwafi , & Al-Issawi , 2011)

2.3.3 Relación entre el campo eléctrico y la tensión en un colector cilíndrico con electrodo de barra

La tensión eléctrica entre la superficie cilíndrica y el electrodo de barra, al ser esta alta, hace que se ionice las partículas del efluente se cargan para que luego se precipiten en las superficies colectoras para ser absorbidas, el proceso descrito se muestra en Figura 6. (Mamani , 2019).

Figura 6. Esquemática de un precipitador electrostático cilíndrico con electrodo de barra



Fuente: (Mamani , 2019)

La intensidad del campo eléctrico por el electrodo de barra es:

$$E = \frac{\Delta V}{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \frac{1}{r} \quad (1)$$

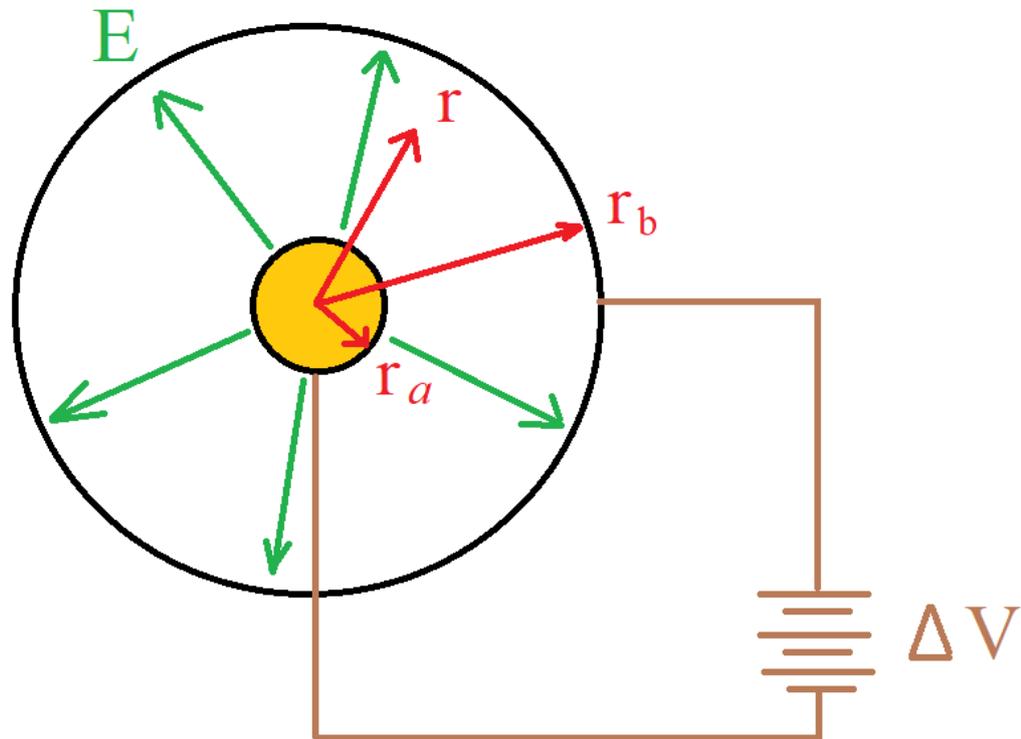
donde, ΔV ,es la tensión entre colector cilíndrico y el electrodo de barra (V), r_b es el radio desde el centro del electrodo al colector cilíndrico (m), r_a es el radio electrodo de barra (m) y r ,es radio arbitrario entre el colector y electrodo (m).

En la Figura 7, se muestra la intensidad del campo eléctrico, así como la fuente de tensión y radios.

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

Figura 7. Esquemática del campo eléctrico dentro de un colector cilíndrico



Fuente: (Mamani , 2019)

2.3.4 Carga eléctrica de la partícula en un colector cilíndrico con electrodo de barra

La carga eléctrica de la partícula para partículas mayores a partículas mayores a $1\mu\text{m}$ está en función del campo eléctrico con la constante dieléctrica. (Mamani , 2019).

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

donde, E es la intensidad del campo eléctrico (V/m), d es el diámetro de las partículas a capturar, ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el aire (C^2/Nm^2) y k ,constante dieléctrica del efluente cargado (adimensional).

2.3.5 Velocidad de migración de una partícula en un colector cilíndrico con electrodo de barra

La velocidad de migración de la partícula con la que recorre la partícula hacia las paredes del colector cilíndricos está relacionado directamente al campo eléctrico. (Mamani , 2019).

$$\omega = \frac{qE}{3\pi\mu d} \quad (3)$$

donde, ω es la velocidad de migración de la partícula (m/s), q es la carga eléctrica la partícula a capturar (C), μ es la viscosidad del efluente (Ns/m²) y d es el diámetro de la partícula a capturar (m).

2.3.6 Tiempo de la partícula en recorrer en un colector cilíndrico con electrodo de barra

Considerando la aceleración constante, el tiempo el cual la partícula tarda en ir hacia el colector está relacionada inversamente a la velocidad de migración. (Mamani , 2019).

$$t = \frac{r_b}{\left(\frac{\omega + v_f}{2}\right)} \quad (4)$$

Como la partícula cocha al colector entonces $v_f = 0m/s$, de la ecuación (4)

$$t = \frac{2 r_b}{\omega} \quad (5)$$

donde, t es el tiempo de recorrido (s), ω es la velocidad de migración de la partícula (m/s), r_b es la radio del colector cilíndrico (m).

El tiempo de recorrer de una partícula se pueden variar o disminuir según la aplicación de una diferencia de tensión alta. (Mamani , 2019).

2.3.7 Eficiencia del precipitador

El dimensionamiento fundamental de un precipitador electrostático en la actualidad. La mayoría de los equipos diseñados utilizan un "factor de rendimiento" o "rendimiento". Deutsch, uno de los primeros investigadores teóricos, trabajando a mediados de la década de 1920, que el desempeño o la eficiencia de recolección de un precipitador la forma de una ecuación exponencial. (Parker, Electrical Operationof Electrostatic Precipitators, 2007).

$$\eta = 1 - e^{-\alpha} \quad (6)$$

donde, α , depende de factores relacionados con el diseño del precipitador y las propiedades físicas del gas y del polvo.

Al derivar la relación anterior, Deutsch asumió que la turbulencia infinita produce una distribución homogénea de las partículas dentro de la corriente de gas, las partículas estaban completamente cargadas y la velocidad del gas era uniforme, al igual que la corona distribución de corriente en las placas colectoras, ninguna de las cuales es estrictamente cierta en la práctica. Durante sus investigaciones, cambio la velocidad del gas a través del precipitador, manteniendo todos los demás factores constantes. (Parker, Electrical Operationof Electrostatic Precipitators, 2007).

Deutsch derivó la siguiente relación de eficiencia:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2l}{v}} , \quad (7)$$

donde, l , es la longitud del campo y v es la velocidad del gas.



Se observa, que $\frac{l}{v}$ es el recíproco de tiempo de contacto de la precipitación. La ecuación anterior fue propuesta más tarde por la industria de la precipitación y utilizada durante muchos años para relacionar el tamaño del precipitador, la eficiencia de recolección y tasa de flujo de gas para plantas que operan en tareas y condiciones de entrada similares. Aunque a menudo se supone que la fórmula tiene una base teórica, no es más que un método útil para comparar los niveles de rendimiento del precipitador. (Parker, Electrical Operation of Electrostatic Precipitators, 2007).

La relación la más reconocible es de la siguiente forma:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{A\omega}{\phi}}, \quad (8)$$

donde, ω , es la velocidad de migración efectiva (m s^{-1}), A es el área de la placa del colector (m^2) y ϕ , es el caudal de gas ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Despejando ω de la ecuación anterior.

$$\omega = \frac{\phi}{A} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right), \quad (9)$$

Es importante señalar que el valor ω , es la velocidad de migración efectiva en un precipitador real.

2.3.8 Rango de velocidad de captura

Para la toma de rango de velocidad y con ella la velocidad de captura se debe seleccionar las condiciones de dispersión y su aplicación en el proceso mostrada la Tabla 2. (Mamani, 2019).

Tabla 2

Rango de la velocidad de captura de la partícula cargada

| RANGO DE VELOCIDADES | | |
|---|---|----------------------------|
| CONDICIONES DE LA DISPERSIÓN DEL CONTAMINANTE | APLICACIÓN | VELOCIDAD DE CAPTURA (m/s) |
| Sueltas sin velocidad en el aire | Evaporación de tanques | 0,25 a 0,5 |
| Sueltas con velocidad baja del aire | Transportadores de baja velocidad | 0.5 a 10 |
| Generación activa dentro de la zona de generación | Chutes de carga / descarga de transportadores, trituradoras | 1,0 a 2.5 |
| Alta velocidad dentro de la zona | Molienda, sandblasting | 2.5 a 10 |

Fuente: (Mamani , 2019)

2.4. Definición de términos básicos

a) Chispa

Una chispa dentro de un precipitador ocurre entre el alto voltaje sistema y las superficies puestas a tierra. Hay un mínimo de corriente fluye durante una chispa y, como resultado, los componentes internos no estropeado. La chispa es el método por el cual el voltaje controla determinar el voltaje secundario utilizable máximo que se puede aplicado a un campo eléctrico. (Schiffner, 2021).

b) Área de recolección específica

El área de recolección específica es cantidad total de área de placa colectora contenida en un precipitador dividida por el volumen de gas tratado está relacionada con la capacidad de recolección del precipitador. (Schiffner, 2021).

c) Fuente tensión Constante

Dispositivo que posee un transformador que rectifican la entrada de tensión alterna AC a tensión continua DC, sirve también para subir el paso el voltaje al nivel requerido. (Schiffner, 2021).

d) Tiempo de tratamiento

El tiempo de tratamiento o tiempo de retención se calcula por dividiendo el tratamiento por la velocidad del gas. (Schiffner, 2021).

e) Arco

Los arcos ocurren dentro del sistema de alto voltaje debido a chispas. Si se detecta un flujo de corriente medible, producirán daños en los componentes internos. (Schiffner, 2021).

f) Corona posterior

Ocurre en aplicaciones de polvo de alta resistividad. Como resultado de la resistividad del polvo, se produce una caída de voltaje a través de la capa de polvo en las placas colectoras. La aplicación de la corriente hace que la carga en la superficie de la capa de polvo llega la ruptura del mismo. En este punto, una oleada de corriente se produce desde la superficie del polvo hasta la placa colectora, provocando calentamiento localizado del polvo. El polvo explota de nuevo en el gas. La corriente que lleva una carga opuesta a la de los electrones y los iones gaseosos, esto hace que la eficiencia de recolección se disminuya y el polvo se vuelva a arrastrar. (Schiffner, 2021).

g) Cámara

Campo geométrico tridimensional, de composición mecánica donde pasa el flujo de gas cargado para su captura. (Schiffner, 2021).

h) Superficie de recogida



Componente sobre el que se recogen las partículas. También conocida como placa colectora o panel. (Schiffner, 2021).

i) Descarga de corona

El flujo de electrones e iones gaseosos del electrodo de descarga hacia las placas colectoras. La descarga de corona ocurre después de que el electrodo de descarga ha alcanzado suficientes voltajes secundarios. (Schiffner, 2021)

j) Electrodo de descarga

El componente que desarrolla corona de alto voltaje con el fin de cargar partículas de polvo. (Schiffner, 2021).

k) Interruptor de desconexión

Un interruptor montado en la protección de la fuente de alto voltaje o media tensión que permite que el campo eléctrico sea desconectado de las placas o electrodos del precipitador electrostático. (Schiffner, 2021).

l) Campo eléctrico

Un campo eléctrico comprende uno o más secciones energizadas del precipitador, que proviene de la fuente de tensión. El control voltaje Sirve para variar el campo eléctrico. (Schiffner, 2021).

m) Sistema de aspiración centrífugo

Es un dispositivo de distribución de gas es cualquier componente instalado al precipitador electrostático con el propósito de modificar características del flujo a partir de aspiración, generado el sistema bajas presiones (menor a la presión atmosférica para que el flujo de gas se aspire). (Schiffner, 2021).



n) Velocidad del gas

La velocidad del gas dentro de un precipitador está determinada por dividiendo el flujo total de gas por el área de la sección transversal del precipitador. (Schifftner, 2021).

o) Interruptor de tierra

Dispositivo montado en la protección a la fuente de voltaje fin de poner a tierra el alto voltaje para protección. (Schifftner, 2021).

p) Tolva

Componente de la carcasa donde el material se limpia de la descarga. Los electrodos y las placas colectoras se recogen para retirarlos del sistema. Puede ser piramidal, de canal o de fondo plano. (Schifftner, 2021).

q) Corriente primaria

La corriente proporcionada en la entrada de la fuente de tensión. Se medirá en amperios A de corriente alterna (CA). (Schifftner, 2021).

r) Tensión primaria

La tensión proporcionada a la entrada de la fuente de tensión. Se medirá en voltios V de corriente alterna (CA). (Schifftner, 2021).

s) Corriente secundaria

Corriente medida en el lado de salida de la fuente de tensión. Se medirá en miliamperios mA de corriente continua (CC) (Schifftner, 2021).

t) Tensión secundaria

Tensión medida a la salida de la fuente de tensión. Se mide en kilovoltios kV de corriente continua (CC). (Schifftner, 2021).



III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

H: El Diseño de un Precipitador Electrostático produce la captura de material particulado del polvo de madera.

3.1.2. Hipótesis específica

H1: Las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks está relacionado con la captura de material particulado de polvo de madera.

H2: La generación de polvo de madera controlado aumenta su captura en el Precipitador Electrostático.

H3: Para el polvo de madera existe relación entre la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático.

3.2. Definición conceptual de variable

Las variables a estudiar con sus definiciones conceptuales son:

- **Variable Independiente (X): Diseño de un precipitador electrostático**

Los precipitadores electrostáticos (ESP) se utilizan ampliamente para el control de emisiones de partículas (polvo, gases, etc.), cuyo funcionamiento es electrostático, usando tensiones medias o altas genera atracciones altas para las atracciones de las partículas cercanas a un micrómetro. Posee eficiencia alta, capturando partículas de con concentración menores a $10 \frac{\mu g}{m^3}$. No se aplica a partículas de escala de nanómetros. La forma del precipitador está relacionada con captura de las partículas de polvo que ingresan con corrientes de flujo de efluente constante. (Tan, 2014).

- **Variable dependiente (Y): Captura de material particulado**

La captura de material particulado son aquellas partículas que se depositan en la cámara del precipitador electrostático, cuya captura

se relaciona con el tamaño de la partícula, condiciones de operación y diseño del equipo. El grado de eficiencia captura de las partículas está relacionado con su rendimiento del equipo. (Parker, Electrical Operation of Electrostatic Precipitators, 2007).

3.2.1. Operacionalización de variable

A partir de las variables su operacionalización se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Operacionalización de variable de estudio

| Variable Independiente | Dimensiones | Indicadores | Índice | Método | Técnica |
|--|---|---|---|---------------------------|-------------------------------|
| Diseño de un precipitador electrostático | Geometría del precipitador | Largo de la cámara | Metros (m) | Cuantitativa experimental | Experimentación |
| | | Ancho de la cámara | Metros (m) | | |
| | | Espesor de la cámara | Metros (m) | | |
| | | Área de entrada de la cámara | Metros cuadrados (m ²) | | |
| | | Área de salida de la cámara | Metros cuadrados (m ²) | | |
| | Media tensión continua | Medición digital de tensión | Kilo Voltios (KV) | Cuantitativa experimental | Observación y Experimentación |
| Variable Dependiente | Dimensiones | Indicadores | Índice | Método | Técnica |
| Captura de material particulado | Captura de material particulado en el precipitador | Eficiencia de captura | Porcentaje (%) | Cuantitativa experimental | Observación y Experimentación |
| | Perdida del material particulado en la salida el precipitador | Concentración de partículas PM10 | Microgramo/metros cúbicos ($\frac{\mu g}{m^3}$) | Cuantitativa experimental | Observación y Experimentación |
| Concentración de partículas PM 2.5 | | Microgramo/metros cúbicos ($\frac{\mu g}{m^3}$) | | | |

Fuente. Elaboración propia.

IV. Diseño Metodológico

4.1 Tipo y diseño de investigación

La investigación fue de tipo **cuantitativa experimental**, que explicó la correlación de las variables dependientes e independientes donde la relación de la hipótesis entre la causa y efecto de las variables.

De acuerdo al diseño o estrategia fue **procedimental** para el manejo e identidad de las variables en estudio manteniendo la uniformidad de las unidades de la variable de estudio, manteniendo las precauciones para la toma y análisis de datos.

4.2 Método de investigación

El método de investigación a seguir fue el científico ya que se usó datos cuantificables desde el diseño, funcionamiento (control) y toma de datos con ello se encontró la correlación en grafica entre las variables, existiendo relación matemática (correlación moderada). Los pasos que se siguió fueron los siguientes:

- Construcción del generador del polvo de madera.

Se uso un soplador modificado 1320 CFM, de potencia de arranque de 1Hp de alta 3400 RPM. En la Figura 8, se muestra el equipo usado.



Figura 8. Soplador modificado



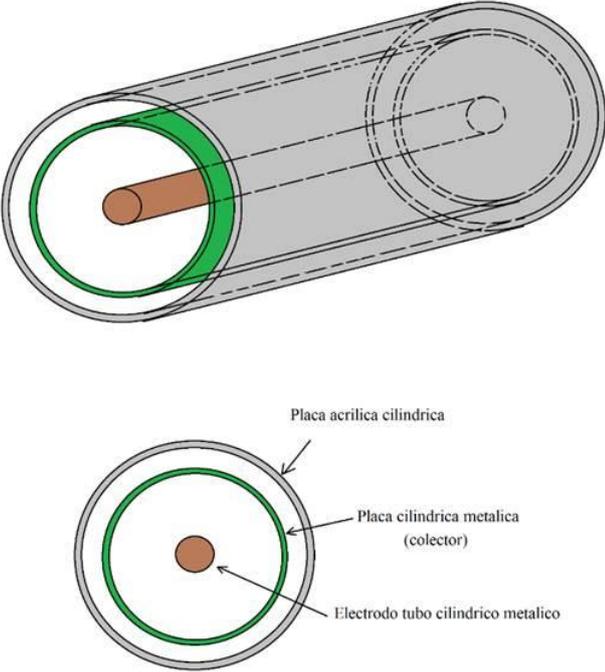
Fuente: Elaboración propia

- Diseño y construcción del precipitador electrostático.
Para el diseño se divide en dos etapas:

Primera etapa: Cálculo de medidas de dimensiones del precipitador electrostático

El esquema del precipitador electrostático que se usará será de tipo cilíndrico, con colector cilíndrico en acero inoxidable, electrodo de tubo cilíndrico en acero inoxidable y contorno cilíndrico de acrílico, tal como se muestra en la Figura 9.

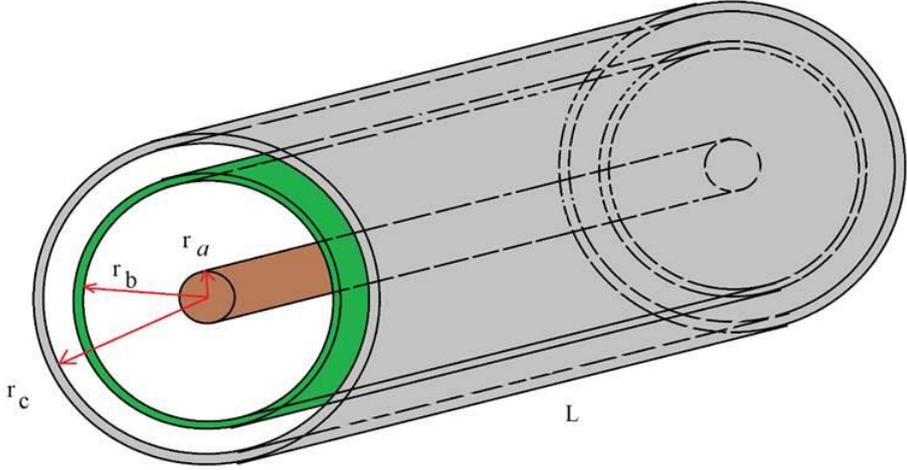
Figura 9. Esquema del Precipitador electrostático



Fuente: Elaboración propia

Los elementos geométricos de los radios de los cilindros que conforman el precipitador se muestran en la Figura 10.

Figura 10. Elementos geométricos del precipitador electrostáticos



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 10; r_a es el radio del tubo electrodo (m), r_b es el radio del cilindro colector (m), r_c es el radio del cilindro de acrílico (m) y L es la longitud del colector (m). Así mismo, los espesores para los elementos metálicos y del elemento acrílico es de 1,0 mm.

Cálculo de la intensidad del campo eléctrico E

Entre el cilindro colector y el electrodo, considerando los siguientes valores:

- Tensión de fuente máxima de $\Delta V = 20 \text{ KV}$
- Radio del electrodo de $r_a = 0,02 \text{ m}$
- Radio del colector cilíndrico de $r_b = 0,06 \text{ m}$
- Radio arbitrario de $r = 0,04 \text{ m}$

Remplazando a la ecuación (1) se tiene:

$$E = \frac{20\,000}{\ln\left(\frac{0,06}{0,02}\right)} \frac{1}{0,04}$$
$$E = 4,55 \times 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (10)$$

Cálculo de la carga eléctrica de la partícula

Como se analizará dos tipos de partículas PM2,5 y PM 10 se tomará la de menor diámetro que es PM2,5 al ser más pequeña y compleja en capturar. Al ser la madera el pino seca y blanda se usará el valor mínimo de la Tabla 1. Entre el cilindro colector y el electrodo, se considere los siguientes valores:

- Campo eléctrico $E = 4,55 \times 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- Constante dieléctrica de la madera $k = 2$
- Permitividad eléctrica en el vacío $\epsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$
- Dímetro de la partícula PM2,5 de diámetro $d = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$

Remplazando a la ecuación (2) se tiene la carga eléctrica de la partícula:

$$q = \left(\frac{3 \times 2}{2 + 2}\right) \pi \times (8,86 \times 10^{-12}) \times (2,5 \times 10^{-6})^2 \times 4,55 \times 10^5$$

$$q = 1,19 \times 10^{-16} C \quad (11)$$

Velocidad de migración de las partículas

La velocidad con que la partícula cargada se mueve hacia el colector cilíndrico para su cálculo, se considera los siguientes valores:

-Carga eléctrica $q = 1,19 \times 10^{-16} C$

-Viscosidad $\mu = 1,84 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2}$

-Dímetro de la partícula PM2,5 de diámetro $d = 2,5 \times 10^{-6} m$

-Intensidad de campo eléctrico $E = 4,55 \times 10^5 \frac{V}{m}$

Remplazando a la ecuación (3) se tiene la carga eléctrica de la partícula:

$$\omega = \frac{(1,19 \times 10^{-16})(4,55 \times 10^5)}{3\pi(1,84 \times 10^{-5})(2,5 \times 10^{-6})}$$

$$\omega = 0,125 \frac{m}{s} \quad (12)$$

Tiempo de movimiento hacia el colector

El tiempo de movimiento de la partícula carga con aceleración constante, para su cálculo, se considera los siguientes valores:

-Radio del colector metálico $r_b = 0,06 m$

-Velocidad de migración $\omega = 0,125 \frac{m}{s}$

-Velocidad de choque al colector $v_f = 0 \frac{m}{s}$

-Intensidad de campo eléctrico $E = 4,55 \times 10^5 \frac{V}{m}$

Remplazando a la ecuación (4) se tiene el tiempo de movimiento de la partícula:

$$t = \frac{0,06}{\left(\frac{0,123+0}{2}\right)}$$

$$t = 0,976 \text{ s} \quad (13)$$

Cálculo del área del colector

Para calcular el área se despeja la ecuación (8) obteniendo:

$$A = -\frac{\text{Ln}(1-\eta)}{\frac{\omega}{\phi}} \quad (14)$$

EL caudal del efluente ϕ se tomará de un soplador centrifugo de potencia de 0,5 HP en succión de entrada del precipitador cilíndrico.

Remplazando en (14) los siguientes valores:

-Eficiencia de precipitador $\eta = 0,98$

-Velocidad de migración $\omega = 0,125 \frac{m}{s}$

-Caudal del efluente cargado $\phi = 0,024 \frac{m^3}{s}$

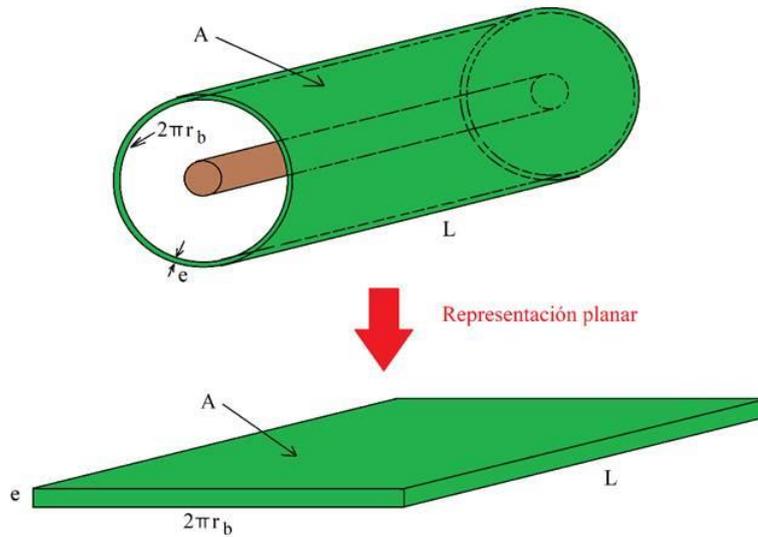
$$A = -\frac{\text{Ln}(1-0,98)}{\frac{0,125}{0,024}}$$

$$A = 0,751m^2 \quad (15)$$

Cálculo de longitud del precipitador

En la Figura 11, se muestra el contorno y la longitud del colector cilíndrico de captura para visualizar el área de colección, así mismo, se muestra su representación planar.

Figura 11. Área de colección del cilindro de captura



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 11, el área de colección del cilindro es:

$$A = 2\pi r_b L \quad (16)$$

Despejando L en la ecuación (16) se tiene:

$$L = \frac{2\pi r_b}{A} \quad (17)$$

Reemplazando en (17) los siguientes valores:

-Radio del colector metálico $r_b = 0,06 \text{ m}$

-Área de colección $A = 0,751 \text{ m}^2$

$$L = \frac{2\pi(0,06)}{0,751} \quad (17)$$

$$L = 0,502 \text{ m} \quad (18)$$

Características de diseño del precipitador

En la Tabla 4, se muestra en resumen las características de diseño para el precipitador electrostático del colector cilíndrico y tubo electrodo.

Tabla 4

Características de diseño

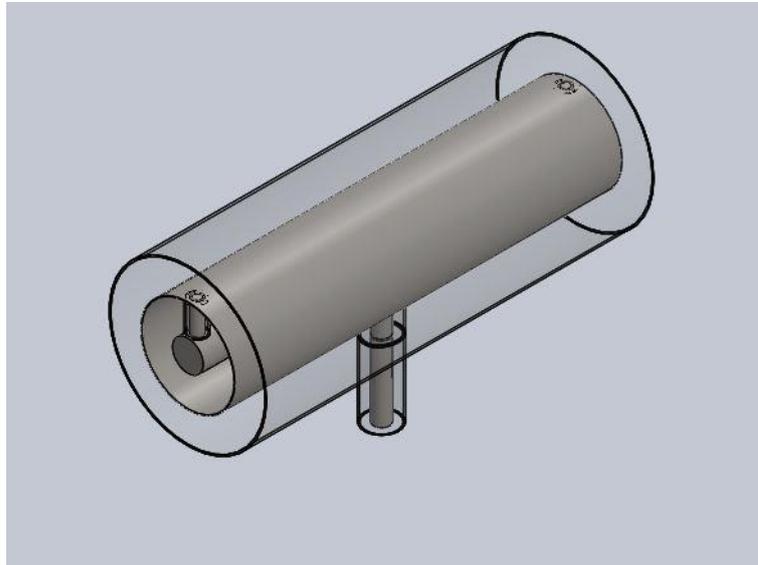
| Parámetros de diseño | |
|---|--------------------------------|
| Material (polvo de madera) | Polvo seco |
| Constante dieléctrica | 2 |
| Diámetro de Partícula menor | $2,5\mu m$ |
| Radio entre electrodo y colector | $0,06 m$ |
| Radio del electrodo | $0,02 m$ |
| Espesor del colector metálico | $1 mm$ |
| Espesor del tubo electrodo | $1 mm$ |
| Con puntas desde el electrodo | No aplica |
| Área del precipitador | $0,751 m^2$ |
| Longitud del equipo | $0,502 m$ |
| Velocidad de migración hacia el colector | $0,125 m/s$ |
| Diferencia de tensión máxima suministrada | $20 KV$ |
| Carga de la partícula | $1,19 \times 10^{-16} C$ |
| Tiempo en recorrido de la partícula al colector | $0,976 s$ |
| Intensidad de campo eléctrico | $4,55 \times 10^5 \frac{V}{m}$ |
| Caudal de aire-polvo de madera máximo al ingreso colector | $0,024 \frac{m^3}{s}$ |
| Eficiencia del equipo | 0,98 |

Fuente: Elaboración propia

Segunda etapa: Diseño en SolidWorks del precipitador electrostático

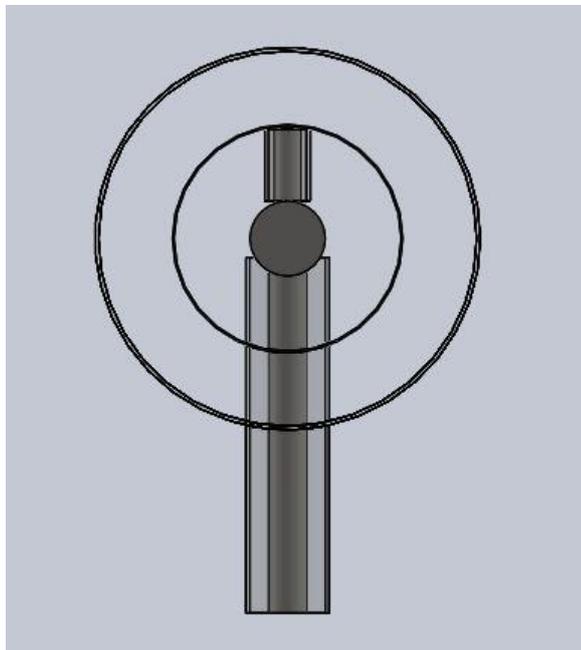
Para el diseño del precipitador electrostático se usó el Software SolidWorks en base a la Tabla 4, declarando en la construcción que el electrodo y el colector son de acero con soportes metálico forrado con acrílico evitando contacto entre el colector y electrodo. La Figura 12, Figura 13. Figura 14 y Figura 15 muestra en solido el diseño del precipitador.

Figura 12. Sistema colector y electrodo del precipitador



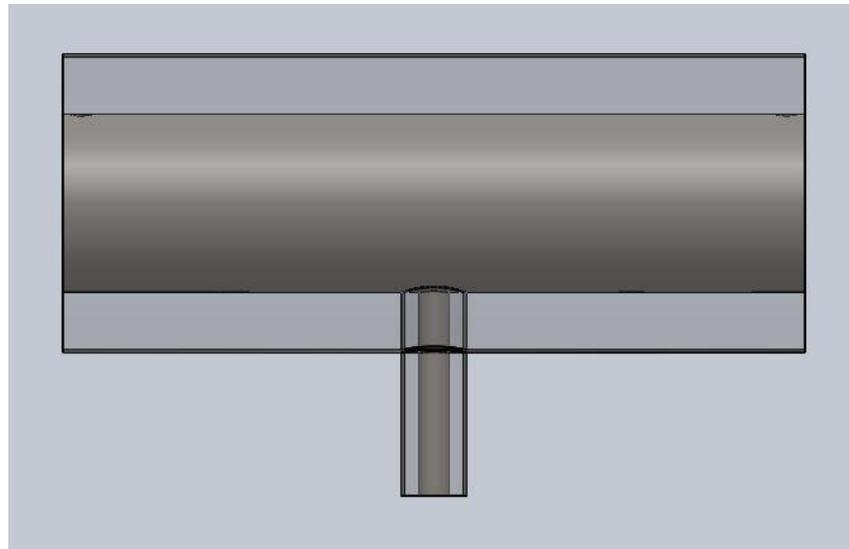
Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Vista frontal del precipitador indicando soporte del colector y electrodo



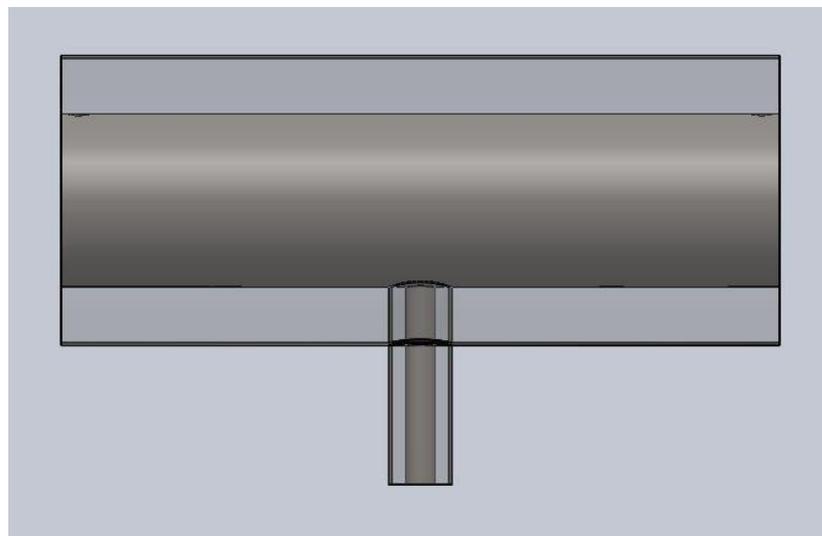
Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Vista lateral del precipitador



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Vista alzado del precipitador



Fuente: Elaboración propia

Para la construcción del precipitador electrostático se usó acero inox 340 para los electrodos con protector cilíndrico de acrílico en base a la Tabla 4 se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Vista del precipitador



Fuente: Elaboración propia

- Diseño de accesorios para la aspiración de captura del polvo de madera.

Se uso una palanca de corte con una amoladora con soporte para control de corte del taco de madera mostrada en la Figura 17.

Figura 17. Vista del accesorio de corte



Fuente: Elaboración propia

De la...

FuturoB

- Acople del sistema electromecánico (fuente, generador del polvo, accesorios), con precipitador electrostático.

Desde la succión del ventilador al precipitador se muestra la Figura 18.

Figura 18. Acople ventilador y conexión al precipitador



Fuente: Elaboración propia

- Toma datos en pruebas, sin funcionamiento de precipitador electrostático.

Se analizó sin carga el comparativo de carga de caudal de efluente y tensión de fuente mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5

Comparativo sin carga de caudal de efluente y tensión de fuente para ducto de salida de diámetro de 2 pulgadas o $5,08 \times 10^{-2} m$

| Tensión (kV) | RPM (min^{-1}) | Velocidad de salida (ms^{-1}) | Caudal salida (10^{-3} CMM) |
|--------------|---------------------------|--|--------------------------------|
| 1 | 100 | 0,90 | 1,1 |
| 2 | 200 | 0,97 | 1,1 |
| 3 | 300 | 1,13 | 1,4 |
| 4 | 400 | 1,26 | 1,5 |
| 5 | 500 | 1,51 | 1,8 |
| 6 | 600 | 1,59 | 1,9 |
| 7 | 700 | 1,93 | 2,3 |
| 8 | 800 | 2,24 | 2,7 |
| 9 | 900 | 2,46 | 3,0 |
| 10 | 1000 | 2,98 | 3,6 |
| 11 | 1100 | 3,11 | 3,6 |
| 12 | 1200 | 3,24 | 4,0 |
| 13 | 1300 | 3,71 | 4,5 |
| 14 | 1400 | 3,98 | 4,7 |
| 15 | 1500 | 4,31 | 5,2 |
| 16 | 1600 | 4,54 | 5,6 |
| 17 | 1700 | 4,72 | 5,6 |
| 18 | 1800 | 5,1 | 6,2 |
| 19 | 1900 | 5,65 | 6,9 |
| 20 | 2000 | 6,22 | 7,4 |

Fuente. Elaboración propia.

- Toma datos en pruebas, con funcionamiento de precipitador electrostático.

Debido a que el medidor de partículas hace la toma de datos en 120 segundos, se procedió hacer la toma de datos en ese tiempo (ver Figura 19).

Figura 19. Medidor de partículas PM 2.5 y PM 10



Fuente: Elaboración propia

- Análisis físico del polvo capturado y el polvo que escapa.

Para el polvo capturado para cada ensayo se procedió a medir la masa captura en el precipitador, usando para ello una balanza de miligramos, también se usó un anemómetro para medir el caudal del efluente.

- Análisis estadístico

Se uso el Excel para hacer las curvas de comportamiento de magnitudes y determinar el coeficiente de determinación R .

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población es finita y será los 10 tacos de madera pino chileno de 0.5kg, que se cortaran el aserradero ubicado en el cercado callao.

4.3.2. Muestra

Como la población es finita, la población al no ser de gran tamaño, no se aplica criterio muestral (Hernández & Carpio, 2019). Para la presente investigación, la muestra será los 20 tacos de madera de 0.200 kg.

4.4. Lugar de estudio

Se realizará de manera presencial en los laboratorios de Física y Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Figura 20, de mapa de ubicación donde se realizará la investigación.

Figura 20. Lugar de ubicación de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática



Fuente: Google Maps

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de información

4.5.1. Técnicas

Se usarán 4 técnicas que son las siguientes:

a) Documental

Se uso los esquemas de diseños de precipitadores electrostáticos de placas rectangulares mostradas en los antecedentes como base para el cálculo.

b) Entrevista

Se hizo consulta de un especialista en electromecánica el sr Jack Marvel Ventura Sáenz, con conocimiento de manejo fuente de voltaje de media y alta tensión; de seguridad en riesgo eléctrico. Toda esa información Sirvió para que el funcionamiento de precipitador electrostática su diseño funcione correctamente, así mismo, el investigador y colaborador no sufran accidentes.

c) Observaciones

Se registro datos obtenidas en la captura de las partículas de polvo provenientes de los tacos de madera, la medida cuantitativa se hizo a través de la balanza y el contador de partículas PM 2.5 y PM 10.

d) Experimentación

Se hizo variar la fuente de voltaje y el sistema de succión producido por un sistema centrífugo para aspirar el polvo de madera, con ello se llega a manipular el funcionamiento del precipitador electrostático y con ello se pudo variar la captura de las partículas de polvo de madera.

Las técnicas que se usarán y su descripción se muestran en la Tabla 6.



Tabla 6

Técnicas para la recolección de información

| TÉCNICA | TIPO | DESCRIPCIÓN |
|-----------------|--------------|--|
| Documental | Cualitativa | Identificación, recopilación y análisis de información sobre diseño de precipitadores electrostáticos. |
| Entrevista | Cualitativa | Recopilación de datos sobre funcionamiento de fuentes de voltaje de media y baja tensión para el funcionamiento del precipitador electrostático. |
| Observación | Cuantitativa | Toma de datos con uso de una balanza digital de masa y medidor de partículas |
| Experimentación | Cuantitativa | Manipulación de las variables en laboratorio para medir su causa y efecto, y verificar las hipótesis |

Fuente: Elaboración propia

Los instrumentos para la recolección de información se muestran en la Tabla 7.

4.5.2. Instrumentos

a) Fuentes Bibliográficas

Se usó los libros especializados que se muestran en las referencias bibliográficas, para conocer el posible comportamiento de las partículas de polvo de madera.

b) Registro de masa calculada

Se usó una balanza digital con escala en miligramos calibrada y proporciona por el laboratorio de la Facultad de ciencias Naturales y Matemática los datos medidos se hará un registro del polvo capturado.

c) Registro de concentración de partículas

Se usó un contador de partículas HT9600 que mide PM 2.5 y PM10 proporcionado por el investigador titular y con datos medidos se hará un registro de concentración de partículas.

d) Software de dibujo

Se usó el software de dibujo SolidWorks versión 2021. Se realizará el plano en tres dimensiones del precipitador, para luego transformarlo en imagen y adjuntarla en los anexos al finalizar la investigación y se hará el ploteo respectivo.

e) Registro audiovisual

Se usó la cámara del celular que el suscrito proporcionó, con los video e imágenes capturadas servirá para hacer los ajustes en las pruebas de funcionamiento, ver posibles fugas en la aspiración con ello se hizo las correcciones respectivas. Así mismo, las fotos sirvieron de evidencias que se realizó la investigación.

f) Software estadístico

Para el procesamiento y análisis de datos se usó el software estadístico Exel para ello se realizó estadística descriptiva. Así mismo las gráficas y tablas obtenidas se mostrarán en el capítulo de Resultados.

En la Tabla 7, se tiene los instrumentos usados, así como su descripción.



Tabla 7

Instrumentos para la recolección de información

| INSTRUMENTO | DESCRIPCION |
|---|--|
| Fuentes Bibliográficas | Instrumento que permite revisar el comportamiento del efluente gaseoso cargado en un precipitador electrostático, así como la construcción del equipo. |
| Registro de Asesorías | Formato donde se registra las asesorías que recibió el investigador por parte de especialistas en uso de fuentes de baja y media tensión continua. |
| Registro de masa calculada | Instrumento utilizado para medir la masa que se capturará en la cámara del precipitador electrostático. |
| Registro de concentración de partículas | Instrumento utilizado para medir la concentración de partículas que salen del precipitador electrostático. |
| Software de dibujo | Instrumento que permite visualizar en escala piloto a través de un plano digital (SolidWorks) el precipitado electrostático. |
| Registro audiovisual | Instrumento utilizado (filmadora y cámara celular) para captura de audio y video del investigador y el equipo de precipitador electrostático durante la toma de datos. |
| Software Estadístico | Instrumento utilizado (Software Excel) para el análisis de datos al manipular la variable independiente |

Fuente: Elaboración propia

Las técnicas e instrumentos para la recolección de información se muestran en la Tabla 8.




Tabla 8

Técnicas e instrumentos para la recolección de información

| TÉCNICA | INSTRUMENTO |
|-----------------|---|
| Documental | Fuentes Bibliográficas |
| Entrevista | Registro de Asesorías |
| | Registro de Reunión |
| Observación | Registro de masa calculada |
| | Registro de concentración de partículas |
| Experimentación | Software de dibujo |
| | Registro audiovisual |
| | Software Estadístico |

Fuente: Elaboración propia

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para el análisis de datos a partir del Excel se realizarán los siguientes procedimientos:

- Elaboración de la tabla donde se ubiquen las variables a medir con sus respectivas unidades.
- Graficar cada indicador de las variables dependientes con respecto al indicador de la variable independiente.
- A partir de las gráficas se realizó el ajuste adecuado dependiendo la tendencia de la función que corresponda y determinar el coeficiente de correlación r y determinación r^2 y ver el grado de correlación que existe.

Para el procesamiento de datos se realizarán los siguientes procedimientos:

- Se acondicionó el laboratorio con el precipitador electrostático para realizar 20 ensayos.
- La fuente de media tensión se conectó al precipitador y se puso inicialmente con una tensión continua de 1KV y luego se aumentó en rangos de cada 120 segundos una tensión de 1KV hasta llegar a 20KV.
- El generador de polvo usó 20 tacos de madera de igual dimensión e igual tipo de aproximadamente 0,200 kg.
- Por cada tensión medida, se registró los datos de masa calculada usando la balanza digital.
- Para cada 120 segundos en simultáneo con la balanza digital la concentración de partículas PM2.5 y PM 10 por medio del sensor de partículas



V. RESULTADOS

5.1. Resultado General

Respecto Diseño del Precipitador Electrostático para la captura de material particulado del polvo de madera.

En la Tabla 9, se muestra el comparativo de la eficiencia de captura (máxima al 81%) al variar la tensión.

Tabla 9

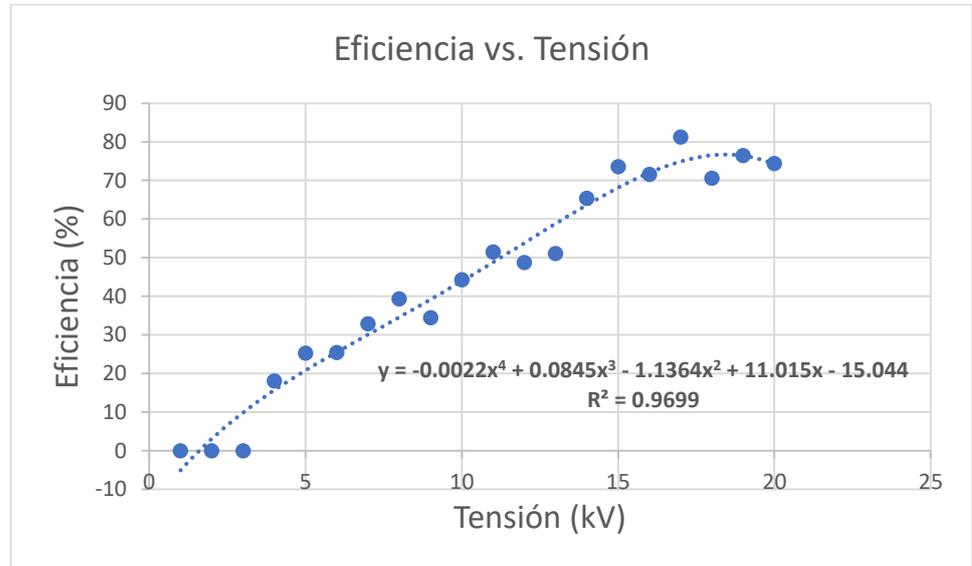
Comparativo de eficiencia de capturada con la tensión eléctrica

| Tensión (kV) | Eficiencia (%) |
|--------------|----------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 0 |
| 3 | 0 |
| 4 | 18.1 |
| 5 | 25.3 |
| 6 | 25.5 |
| 7 | 32.9 |
| 8 | 39.4 |
| 9 | 34.5 |
| 10 | 44.3 |
| 11 | 51.5 |
| 12 | 48.8 |
| 13 | 51.1 |
| 14 | 65.4 |
| 15 | 73.6 |
| 16 | 71.6 |
| 17 | 81.3 |
| 18 | 70.6 |
| 19 | 76.5 |
| 20 | 74.4 |

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 9, se obtienen las Figuras 21.

Figura 21. Gráfica Eficiencia vs Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21, se observa que posee un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.9699$, lo cual indica que hay dependencia entre la eficiencia y la tensión, su ecuación es de tipo polinómica de grado 4.

5.2. Resultados específicos

- Respecto entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado de polvo de madera.

Las dimensiones del equipo que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Dimensiones precipitador en m y mm

| Dimensiones del Precipitador | |
|---|----------------------|
| Diámetro de Partícula menor | 2,5 μ m |
| Radio entre electrodo y colector | 0,06 m |
| Radio del electrodo | 0,02 m |
| Espesor del colector metálico | 1 mm |
| Espesor del tubo electrodo | 1 mm |
| Área del precipitador | 0,751 m ² |
| Longitud del equipo | 0,502 m |

Fuente: Elaboración propia

Durante el desarrollo de toma de datos, se obtuvo las Tabla 11, que es el Comparativo de caudal de efluente y tensión de fuente para ducto de salida de diámetro de 2 pulgadas o $5,08 \times 10^{-2} m$.

Tabla 11

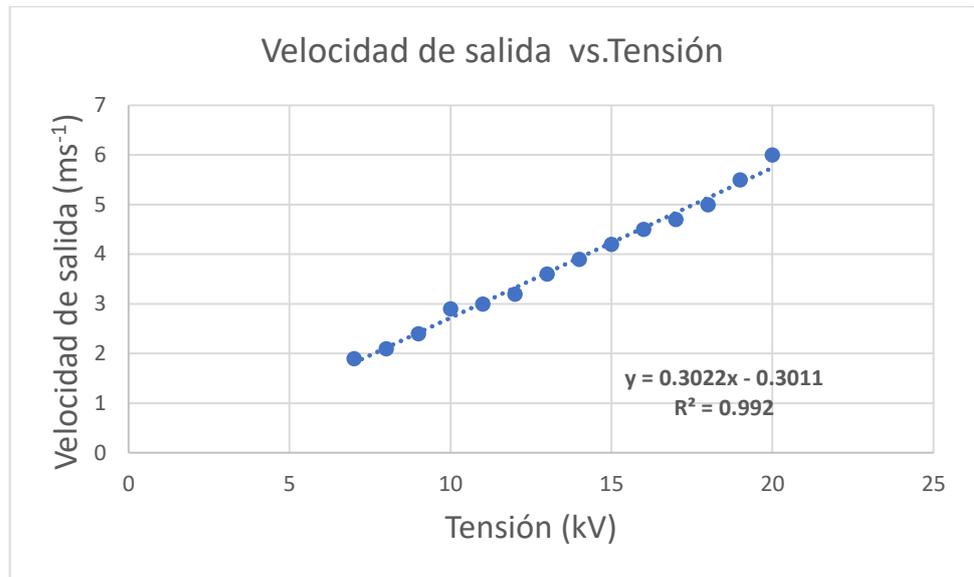
Comparativo de caudal, velocidad de efluente y tensión

| Tensión (kV) | Velocidad de salida (ms ⁻¹) | Caudal salida (10 ⁻³ CMM) |
|--------------|---|--------------------------------------|
| 1 | 0,8 | 1,0 |
| 2 | 0,9 | 1,1 |
| 3 | 1,1 | 1,3 |
| 4 | 1,2 | 1,4 |
| 5 | 1,4 | 1,7 |
| 6 | 1,6 | 1,9 |
| 7 | 1,9 | 2,3 |
| 8 | 2,1 | 2,6 |
| 9 | 2,4 | 2,9 |
| 10 | 2,9 | 3,5 |
| 11 | 3,0 | 3,6 |
| 12 | 3,2 | 3,9 |
| 13 | 3,6 | 4,4 |
| 14 | 3,9 | 4,7 |
| 15 | 4,2 | 5,1 |
| 16 | 4,5 | 5,5 |
| 17 | 4,7 | 5,5 |
| 18 | 5,0 | 6,1 |
| 19 | 5,5 | 6,7 |
| 20 | 6,0 | 7,2 |

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 11, se obtienen las Figuras 22 y Figura 23.

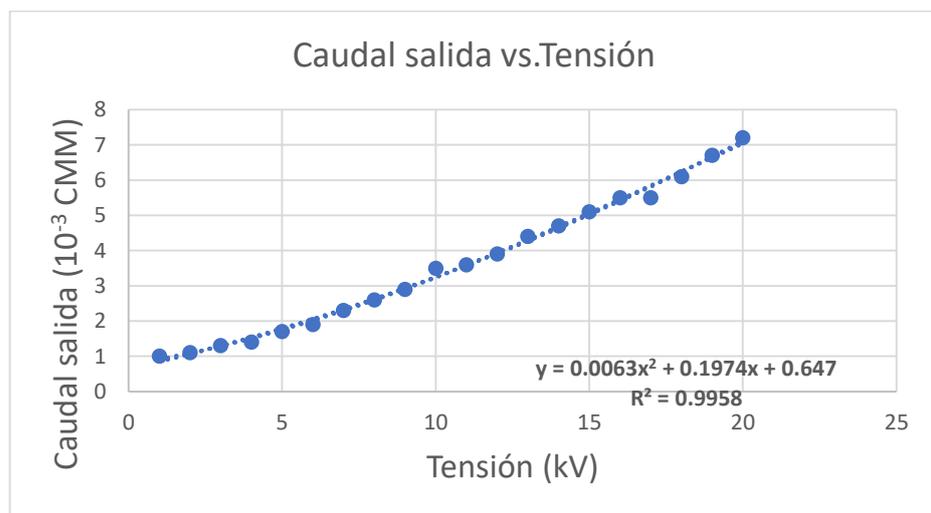
Figura 22. Gráfica Velocidad de salida vs Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22, se observa que posee un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.992$, lo cual indica que hay dependencia entre la velocidad de salida y la tensión, su ecuación es de tipo lineal positiva.

Figura 23. Gráfica Caudal de salida vs Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 23, se observa que posee un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.9958$, lo cual indica que hay dependencia

entre el caudal de salida y la tensión, su ecuación es de tipo polinómica de grado 2.

En la Tabla 12, se tiene el comparativo de la temperatura de salida con la tensión ducto de salida de diámetro de 2 pulgadas o $5,08 \times 10^{-2} m$.

Tabla 12

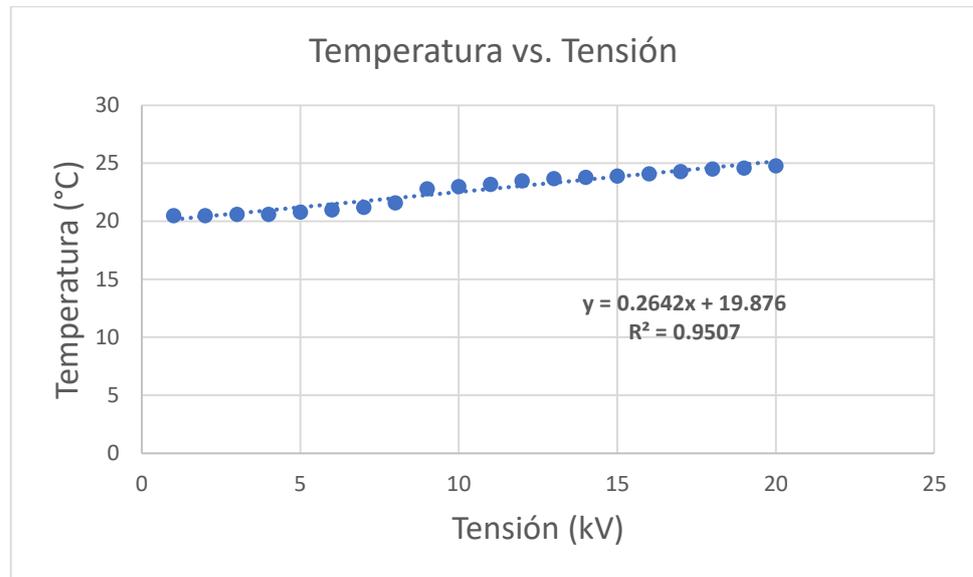
Comparativo de temperatura salida y tensión

| Tensión (kV) | Temperatura salida (°C) |
|--------------|-------------------------|
| 1 | 20.5 |
| 2 | 20.5 |
| 3 | 20.6 |
| 4 | 20.6 |
| 5 | 20.8 |
| 6 | 21.0 |
| 7 | 21.2 |
| 8 | 21.6 |
| 9 | 22.8 |
| 10 | 23.0 |
| 11 | 23.2 |
| 12 | 23.5 |
| 13 | 23.7 |
| 14 | 23.8 |
| 15 | 23.9 |
| 16 | 24.1 |
| 17 | 24.3 |
| 18 | 24.5 |
| 19 | 24.6 |
| 20 | 24.8 |

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 12, se obtienen la Figura 24.

Figura 24. Gráfica Temperatura salida vs Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 24, se observa que posee un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.9507$, lo cual indica que hay dependencia entre la temperatura de salida y la tensión, su ecuación es de tipo lineal positiva.

En la Tabla 13, se tiene el comparativo de la temperatura de entrada con la tensión ducto de salida de diámetro de 2 pulgadas o $5,08 \times 10^{-2} m$.

Tabla 13

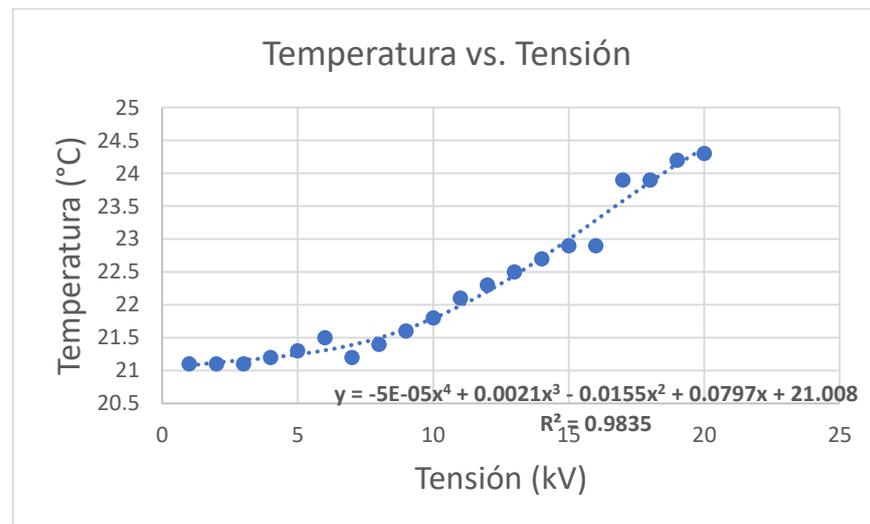
Comparativo de temperatura entrada y tensión

| Tensión (kV) | Temperatura (°C) |
|--------------|------------------|
| 1 | 21.1 |
| 2 | 21.1 |
| 3 | 21.1 |
| 4 | 21.2 |
| 5 | 21.3 |
| 6 | 21.5 |
| 7 | 21.2 |
| 8 | 21.4 |
| 9 | 21.6 |
| 10 | 21.8 |
| 11 | 22.1 |
| 12 | 22.3 |
| 13 | 22.5 |
| 14 | 22.7 |
| 15 | 22.9 |
| 16 | 22.9 |
| 17 | 23.9 |
| 18 | 23.9 |
| 19 | 24.2 |
| 20 | 24.3 |

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 13, se obtienen la Figura 25.

Figura 25. Gráfica Temperatura entrada vs Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25, se observa que posee un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.9835$, lo cual indica que hay dependencia entre la temperatura de entrada y la tensión, su ecuación es de tipo polinómica de grado 4.

- Respecto al polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático.

En la Tabla 14, se muestra las medidas obtenidas para masa de ingreso al precipitador y masa capturada en el precipitador.

Tabla 14

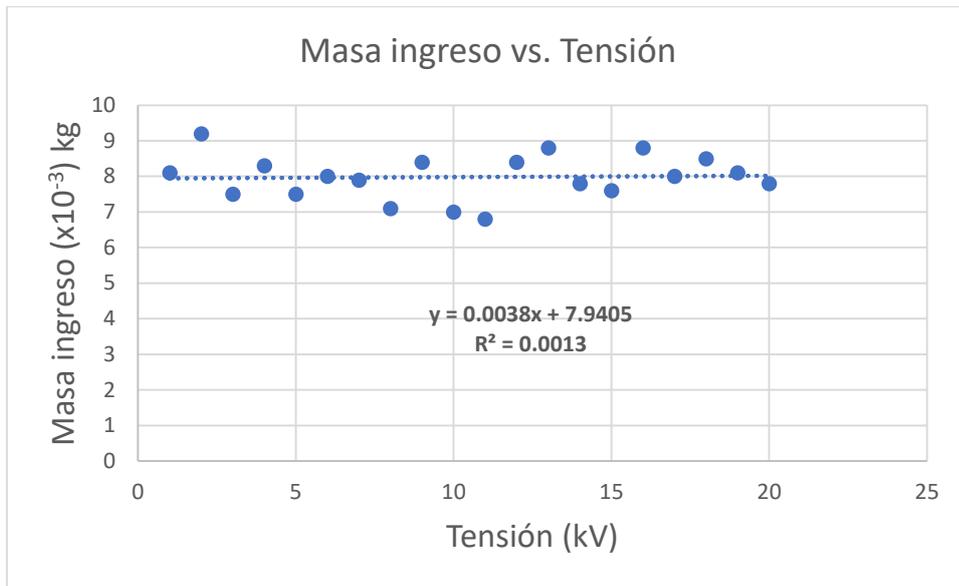
Comparativo de masas de ingreso y capturada con la tensión eléctrica

| Tensión (kV) | Masa ingreso ($\times 10^{-3}$) kg | Masa capturada ($\times 10^{-3}$) kg |
|--------------|--------------------------------------|--|
| 1 | 8,1 | 0 |
| 2 | 9,2 | 0 |
| 3 | 7,5 | 0 |
| 4 | 8,3 | 1,5 |
| 5 | 7,5 | 1,9 |
| 6 | 8,0 | 2,2 |
| 7 | 7,9 | 2,6 |
| 8 | 7,1 | 2,8 |
| 9 | 8,4 | 2,9 |
| 10 | 7,0 | 3,1 |
| 11 | 6,8 | 3,5 |
| 12 | 8,4 | 4,1 |
| 13 | 8,8 | 4,5 |
| 14 | 7,8 | 5,1 |
| 15 | 7,6 | 5,8 |
| 16 | 8,8 | 6,3 |
| 17 | 8,0 | 6,5 |
| 18 | 8,5 | 6,0 |
| 19 | 8,1 | 6,2 |
| 20 | 7,8 | 5,8 |

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 14, se obtienen las Figuras 26 y Figura 27.

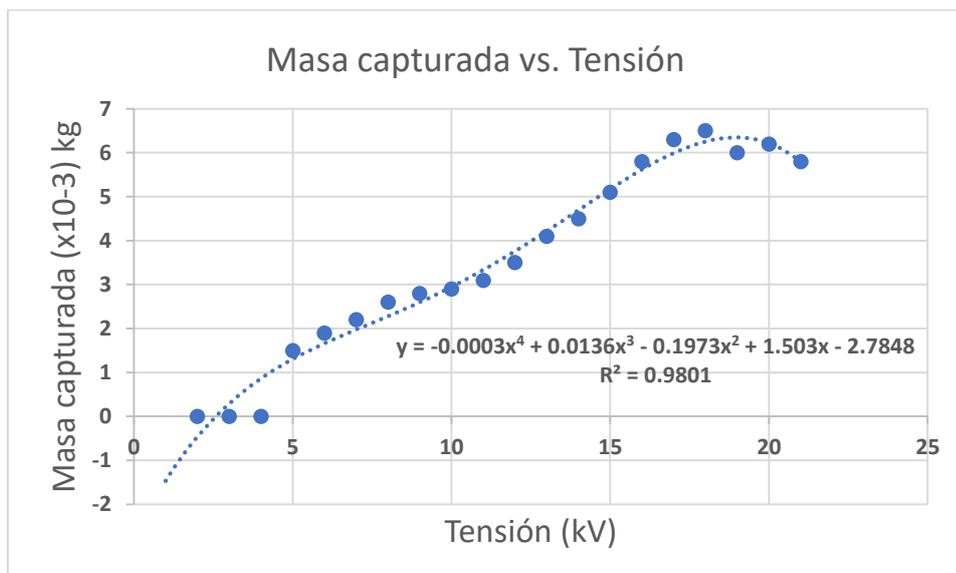
Figura 26. Gráfica Masa ingreso vs Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26, se observa que posee un coeficiente de determinación casi nulo $R^2 = 0.0013$, lo cual indica que no dependencia entre la masa de ingreso y la tensión.

Figura 27. Gráfica Masa ingreso vs Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27, se observa que posee un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.9801$, lo cual indica que hay dependencia entre la masa de captura y la tensión de tipo polinómica de grado 4.

- Respecto a la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático.

En la Tabla 15, se muestra la tabla de comparación entre las concentraciones en la salida del precipitador de las concentraciones PM 2.5 y PM 10.

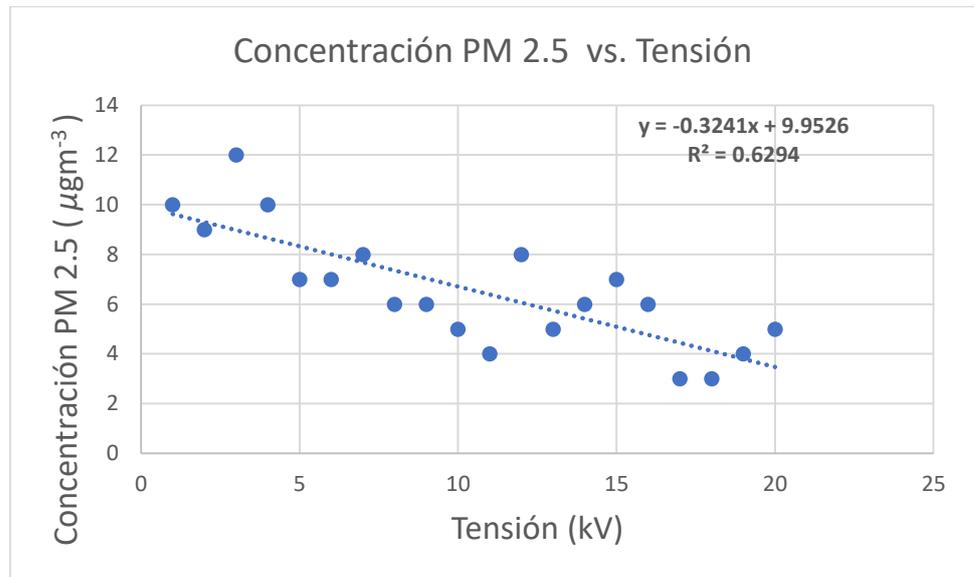
Tabla 15

Comparativo de concentraciones PM 2.5 y PM 10

| Tensión (kV) | Concentración PM 2.5 ($\mu\text{g m}^{-3}$) | Concentración PM 10 ($\mu\text{g m}^{-3}$) |
|--------------|---|--|
| 1 | 10 | 8 |
| 2 | 9 | 11 |
| 3 | 12 | 7 |
| 4 | 10 | 6 |
| 5 | 7 | 6 |
| 6 | 7 | 8 |
| 7 | 8 | 6 |
| 8 | 6 | 7 |
| 9 | 6 | 5 |
| 10 | 5 | 8 |
| 11 | 4 | 8 |
| 12 | 8 | 6 |
| 13 | 5 | 8 |
| 14 | 6 | 7 |
| 15 | 7 | 10 |
| 16 | 6 | 6 |
| 17 | 3 | 6 |
| 18 | 3 | 6 |
| 19 | 4 | 6 |
| 20 | 5 | 7 |

A partir de la Tabla 12, se obtiene las Figura 28 y Figura 29

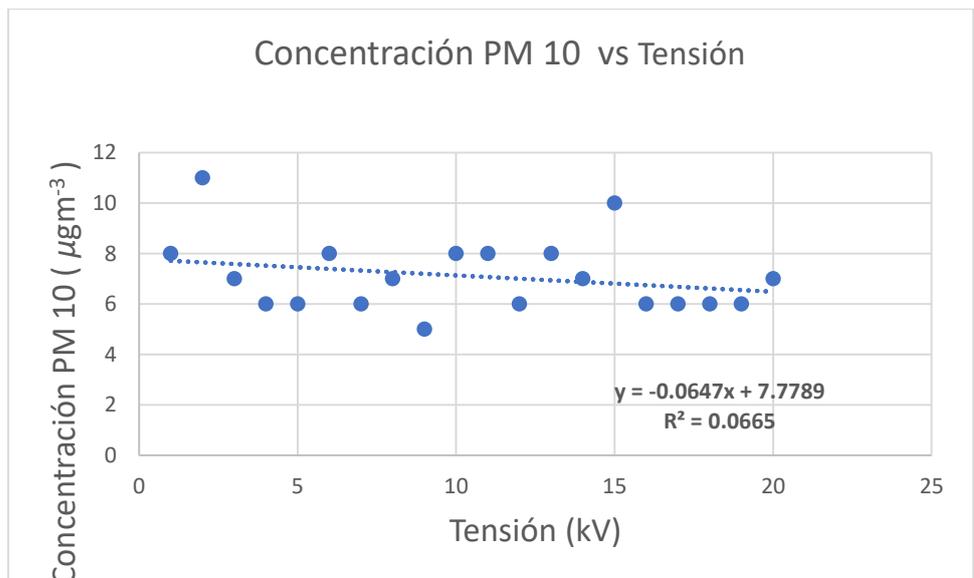
Figura 28. Gráfica de Concentración PM2.5 vs. Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 28, se observa que posee un coeficiente de determinación moderado $R^2 = 0.6294$, lo cual indica que hay una dependencia moderada entre la concentración PM2.5 y la tensión de tipo lineal negativa.

Figura 29. Gráfica de Concentración PM10 vs. Tensión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 29, se observa que posee un coeficiente de determinación bajo $R^2 = 0.0665$, lo cual indica que no hay dependencia moderada ni correlación entre la concentración PM 10 y la tensión. La ecuación lineal que sale no es representativa.



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Discusión General

Respecto Diseño del Precipitador Electrostático para la captura de material particulado del polvo de madera. De la Tabla 9, se muestra que para una tensión de 17kV de la eficiencia de captura llega a 81% y en la Tabla 15 se obtiene una baja concentración de $3 \mu\text{g m}^{-3}$ para la PM2.5. indicando que, si la partícula es más pequeña PM1,0 (1 micra) alto será su rendimiento que podría llegar 98% para polvo más fino (cemento) (Mamani , 2019).

6.2. Discusiones específicas

- Respecto entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado de polvo de madera. El diseño en Solidword que es un CAD de dibujo fue rápido y se pueden ver las etapas que tuvo la investigación, lo cual corrobora que el diseño por etapas es el adecuado como lo planteado por (Sierra, Pérez, Torres, Bellón, & Benítez, 2014).
- Respecto al polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático. El control relacionando a su tensión de trabajo se tuvo como máximo 20kV, pero una mejor colección a 17Kv, corroborando que tensiones altas como la máxima 27 000 V captura partículas más pequeñas (Rodríguez, Alarcón , García , & Benavides, 2017)
- Respecto a la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático. El uso de acero inoxidable y el rango de tensión usado 1kV a 20 kV continua hace que los electrodos cilíndricos se electricen uniformemente de manera que sobre ellas se realizó la captura de PM 2.5 pero débilmente la captura PM 10,



corroborando que a tensiones medias genera partículas PM2.5 y PM10 a partir de los ensayos de 10kV a 13kV pulsante hallado por (Gonzalez, 2019)



CONCLUSIONES

a) Conclusión General

Respecto Diseño del Precipitador Electrostático para la captura de material particulado del polvo de madera. Debido a que las partículas de estudio era polvo de madera y al usar el disco de corte dentado se generó muchas partículas densas y pocas de menor densidad, además en la observación sobre el piso se pueden ver partículas de forma irregular de mayor densidad, haciendo que el efluente este cargado con pocas partículas de menor tamaño con ello la eficiencia sea menor a 90%. En cambio, con disco segmentado se aplica mucho para cortar concreto lo cual genera más partículas cercanas a PM1, con ello la eficiencia de captura aumentaría en un precipitador como lo hallado por (Mamani , 2019).

b) Conclusiones específicas

- Respecto entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado de polvo de madera. El diseño se debe realizar con vista de perfil, de frente, etc. Deben incluirse en el diseño las partes de captura que incluye la entrada y salida del precipitador, colectores y demás accesorios. Estas dimensiones son en base de los datos de entrada que es la tensión que fue media de 1kV a 20kV.
- Respecto al polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático. Se observa que la captura se relaciona con la tensión, pero posee máxima captura a 17kV menor a 20kV que se generó como máximo, indicando que a mayor tensión no va acompañada de un mayor rendimiento para este estudio.
- Respecto a la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático. Se observa que la cantidad de material particulado los colectores deben ser de acero al tener conductividad para la electrización y por medio de una fuente continua de media tensión se tiene datos estables debido a que los electrodos cilíndricos de la cámara del

precipitador se electrizaran de forma constate en su superficie, en comparación si fuese una fuente pulsante.



RECOMENDACIONES

a) Recomendación General

Respecto Diseño del Precipitador Electrostático para la captura de material particulado del polvo de madera. Se recomienda un diseño con más colectores para mayor captura y la ubicación del precipitador de forma vertical y hacer comparación de eficiencia entre un precipitador tipo horizontal y tipo vertical. Así mismo se recomienda usar en el corte de la madera el disco de segmentado y ver el comportamiento del polvo de madera,

b) Recomendaciones específicas

- Respecto entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado de polvo de madera. Se recomienda usar el simulador del SolidWorks para vere el comportamiento del efluente y hacer el comparativo de la eficiencia del equipo físico con el equipo simulado.
- Respecto al polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático. Se recomienda una fuente de mayor tensión para ver el comportamiento de captura para tensiones mayores a 20kV. Así mimo se recomienda incorporar en la base del precipitador una balanza y trabajar con tacos de madera de mayor dimensión para que la carga acumulada dentro del equipo aumente.
- Respecto a la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático, se recomienda el uso de soplador de mayor potencia y caudal para que pueda ingresar la mayor cantidad las partículas PM10 en el equipo. Se recomienda usar una fuente de tensión continua para que las superficies de los electrodos cilíndricos se carguen eléctricamente constante.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ari, Y., Antonius, E., & Kuncoro, L. (2018). The Application of Electrostatic Precipitator (ESP) as Pollutant Reduction in Ship. *Research, Society and Development*, 8, 13. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5606/560662203017/560662203017.pdf>
- Ivanenko, Y. (2015). *Modelling and Simulation of Electrostatic Precipitators with a Dust Layer*. Sweden: Department of Physics and Electrical.
- Manuzon, R. (2012). Electrostatic Precipitation Technologies for the Mitigation of Particulate Matter Emissions from Poultry Facilities. 268. Obtenido de https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_etd/send_file/send?accession=osu1345562603&disposition=inline
- Qi, L., Liu, M., Wang, X., Li, J., & Zeng, F. (2021). Inertial Separation of Particles Escaped from Electrostatic. *ACS Omega*, 9. Obtenido de <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsomega.1c00624>
- Rodríguez, J., Alarcón, U., García, O., & Benavides, G. (2017). Diseño y prototipo de un precipitador electrostático. *MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering*, 10. Obtenido de <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1237>
- Schiffner, K. (2021). *Air Pollution Control Equipment Selection Guide* (Third edition ed.). New York: CRC Press.
- Acuña, R., Cárdenas, H., Gutierrez, G., & Huamanyauri, S. (2019). *Trnsformación y comercialización de madera sostenible provenientes de plantaciones forestales de cooperativas agrarias en la Región San Martín: Plan de Negocios para la empresa social Amazonía Justa SAC*. Lima: esan. Obtenido de https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/1631/2019_MAAA_17-3_01_T.pdf?sequence=1
- Adabara, I., Hassan, A., & Hassan, A. (2017). Design and Implementation of an Electrostatic Precipitator and Its Cleaning System for Small Scale Combustion. *Indo-Iranian Journal of Scientific Research (IIJSR)*, 12. Obtenido de https://kiu.ac.ug/assets/publications/207_design-and-

implementation-of-an-electrostatic-precipitator-and-its-cleaning-system-for-small-scale-combustion.pdf

- Álvarez, J., & Bonilla, L. (2018). Propuesta para un programa de prevención del riesgo por exposición e inhalación del polvo de madera en la empresa RC Secamatic Limitada. Bogotá: Universidad ECCI. Obtenido de <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/2372/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1>
- Bäfver, L., Yngvesson, J., & Niklasson, F. (2012). Residential Electrostatic Precipitator Performance at efficient and poor combustion conditions. *SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut*, 25. Obtenido de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962703/FULLTEXT01.pdf>
- Behjat, V., Rezaei-Zare, A., & Naderian, A. (2021). Concept Design of a High-Voltage Electrostatic Sanitizer to Prevent Spread of COVID-19 Coronavirus. *MDPI-energies*, 20. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/22/7808>
- Bhatia, S. C. (2017). *Pollution Control in Textile Industry* (First published ed.). New Delhi: Woodhead Publishing India Pvt.
- DIGESA. (2005). *Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos*. Lima. Obtenido de http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf
- Fundación laboral de la Construcción. (2020). *Guía de medición de polvo y medidas preventivas en la construcción*. Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social. Obtenido de <https://www.coatcaceres.es/FTP/Publicaciones/2020GuiaMedicionPolvoyMedidasPreventivasConstruccion.pdf>
- Gonzalez, P. (2019). Precipitador Electrostático a Escala Piloto para el Laboratorio de Aire de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana Seccional de Bucaramanga. Obtenido de https://repositorio.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/6875/digital_38819.pdf?sequence=1

- Hernández, C., & Carpio, N. (2019). *Introducción a los tipos de muestreo*. San Salvador : Alerta-Revista Científica del Instituto Nacional de Salud. Obtenido de <https://alerta.salud.gob.sv/wp-content/uploads/2019/04/Revista-ALERTA-An%CC%83o-2019-Vol.-2-N-1-vf-75-79.pdf>
- Jaworek, A., Marchewicz, A., Krupa, A., Sobczyk, A., Czech, T., Antes, T., . . . Roznowski, W. (2015). Dust particles precipitation in AC/DC electrostatic precipitator. *Journal of Physics: Conference Series*, 5. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/646/1/012031/pdf>
- Kaiser, K. (2006). *Electrostatic Discharge*. New York: CRC Press.
- Mamani , J. (2019). Diseño e Implementacion de un Prototipo a Escala de un Precipitador Electrático para el Control de Polución en una Industria Cementera. Arequipa: Universidad Católica de Santa María. Obtenido de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9517>
- Mardiguian, M. (2009). *Electrostatic Discharge* (Third Edition ed.). New Jersey: Wiley & Sons.
- Márquez, A., & Ulloa, J. (2018). *Diseño de un sistema de extracción de polvo y viruta de madera para la carpintería de la fundación salesiana "PACES"*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16106/1/UPS-CT007799.pdf>
- MINAM. (7 de Junio de 2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el Aire y establecen Disposiciones Complementarias. pág. 4. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones>
- Ministerio de Trabajo e Inmigración. (2011). *Polvo de madera: un peligro para la salud*. Madrid: Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Obtenido de [https://www.insst.es/documents/94886/375493/Folleto+Polvo+de+madera,+un+peligro+para+la+salud+-+A%C3%B1o+2011+\(en+cat%C3%A1logo\)#:~:text=Las%20part%C3%ADculas%20peque%C3%B1as%20pueden%20llegar,de%20c%C3%A1ncer%20muy%20poco%20frecuente.](https://www.insst.es/documents/94886/375493/Folleto+Polvo+de+madera,+un+peligro+para+la+salud+-+A%C3%B1o+2011+(en+cat%C3%A1logo)#:~:text=Las%20part%C3%ADculas%20peque%C3%B1as%20pueden%20llegar,de%20c%C3%A1ncer%20muy%20poco%20frecuente.)

- Parker, K. (1996). *Applied Electrostatic Precipitation* (First edition ed.). London: Blackie Academic & Professional.
- Parker, K. (2007). *Electrical Operation of Electrostatic Precipitators*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Pence, M. (2012). *Handbook of Air Pollution Control Systems and Devices* (First Edition, ed.). Delhi: University Publications.
- Sierra, D., Pérez, J., Torres, A., Bellón, O., & Benítez, D. (2014). Design and Implementation of a Laboratory Scale Prototype of an Electrostatic Precipitator to Control Particulate Matter in Areas of Coal Mining and Coke Production. *Universidad de Boyacá*, 4. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6983452>
- Tan, Z. (2014). *Air Pollution and Greenhouse Gases*. Singapore: Springer.
- Theodore, L. (2008). *Air Pollution Control Equipment Calculations*. New Jersey: John Wiley & Sons,.
- Valero, D. (2014). *Fundamentals of Air Pollution* (Fifth Edition ed.). Amsterdam: Elsevier.



ANEXOS

Matriz de Consistencia

| Problema | Objetivos | Hipótesis | Variables | Dimensiones | Indicadores | Metodología |
|---|--|--|--|--|---|---|
| <p>Problema general ¿De qué manera el diseño de un Precipitador Electrostático produce la captura del material particulado del polvo de madera?</p> <p>Problemas específicos ¿Cuál es la relación entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado del polvo de madera?</p> <p>¿Cómo influye el polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático?</p> <p>¿Cómo influye para el polvo de madera, la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático?</p> | <p>Objetivo General Establecer el Diseño del Precipitador Electrostático para la captura de material particulado del polvo de madera.</p> <p>Objetivos específicos Determinar la relación entre las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks con la captura de material particulado de polvo de madera.</p> <p>Analizar el polvo de madera controlado con el aumento de su captura en el Precipitador Electrostático.</p> <p>Determinar para el polvo de madera, la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático.</p> | <p>Hipótesis general H: El Diseño de un Precipitador Electrostático produce la captura de material particulado del polvo de madera</p> <p>Hipótesis específicas H1: Las dimensiones del Precipitado Electrostático usando el Programa SolidWorks está relacionado con la captura de material particulado de polvo de madera</p> <p>H2: La generación de polvo de madera controlado aumenta su captura en el Precipitador Electrostático</p> <p>H3: Para el polvo de madera existe relación entre la cantidad material particulado capturado en la cámara del precipitador electrostático y la concentración de partículas PM 2.5 y PM 10 en la salida del precipitador electrostático.</p> | <p>Variable Independiente (X) Diseño de un precipitador electrostático</p> <p>Variable Dependiente (Y) Captura de material particulado</p> | <p>Geometría del precipitador</p> <p>Media tensión continua</p> <p>Captura de material particulado en el precipitador</p> <p>Perdida del material particulado en la salida el precipitador</p> | <p>-Largo de la cámara -Ancho de la cámara -Espesor de la cámara -Área de entrada de la cámara -Área de salida de la cámara</p> <p>- Medición digital de tensión</p> <p>-Eficiencia de captura</p> <p>-Concentración de partículas PM10 -Concentración de partículas PM 2.5</p> | <p>Tipo de investigación Cuantitativa experimental, con manipulación de variables</p> <p>Diseño de investigación Procedimental</p> <p>Método Científico</p> <p>Población La población es finita y será los 20 tacos de madera pino chileno de 0,2kg, que se cortaran el aserradero ubicado en el cercado callao.</p> <p>Muestra Como la población es finita, la población al no ser de gran tamaño, no se aplica criterio maestral (Hernández & Carpio, 2019). Para la presente investigación, la muestra será los 20 tacos de madera de 0.2kg.</p> <p>Técnicas -Documental -Entrevista -Observación -Experimentación</p> <p>Instrumentos - Fuentes Bibliográficas - Registro de masa calculada - Registro de concentración de partículas PM 2.5 - Registro de concentración de partículas PM 10 - Registro fotográfico - Software Excel</p> |

Instrumentos validados



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
LABORATORIO Y TALLERES DE FÍSICA Y QUÍMICA
E-mail Institucional fcnm.lyt@unac.edu.pe

CONSTANCIA DE OPERATIVIDAD N° 01-2023-LYT-FCNM

Por la presente el Jefe del Laboratorio y Talleres de Física y Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad Nacional del Callao, deja constancia que los equipos de **FUENTES DE MEDIA TENSIÓN, SENSORES DE PRESIÓN, MEDIDORES DE TEMPERATURA MARCA PHYWE Y PASCO** se encuentran operativos y están calibradas por las mismas empresas en mención.

Se expide la presente constancia para los fines que considere convenientes.

Bellavista, 04 de abril de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
Facultad de Ciencias Naturales y Matemática
Laboratorio y Talleres de Física y Química

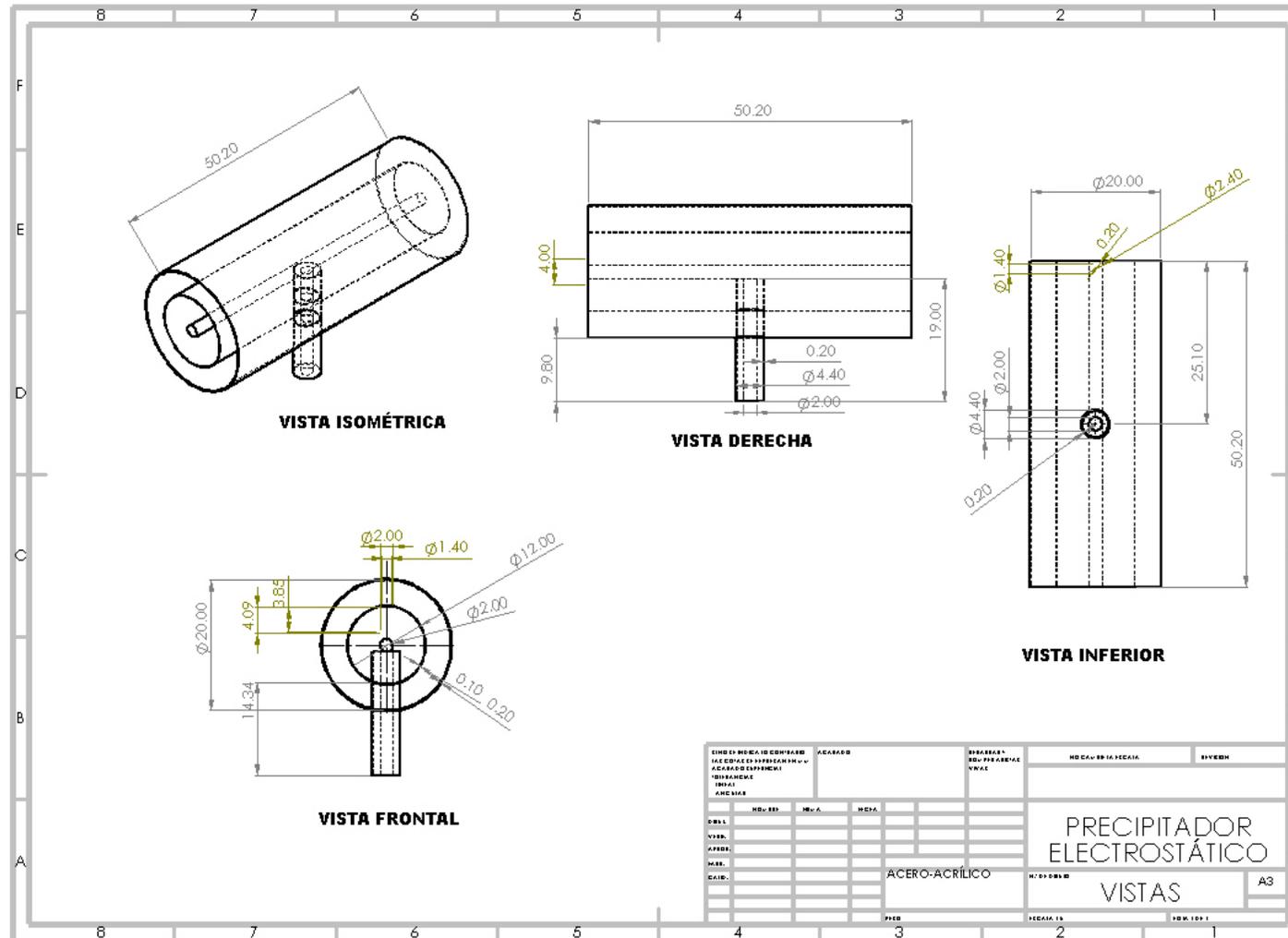
Mg. Gustavo Alberto Altamiza Chávez
Jefe

GAAC/AMU

📁 Archivo.

Av. Juan Pablo II N° 306
Bellavista – Callao
Correo Electrónico: fcnm.lyt@unac.edu.pe

Vistas del plano del precipitador electrostático usando programa SolidWorks



De la...

Felipe B

Evidencias fotográficas



Velocidad aire entrada (sin carga)



Velocidad aire salida (sin



Fuentes de tensión



Medida de Tensión

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]



Precipitador

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]