



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA LA
PURIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES PARA LA
EMPRESA MAOING

CRISTIAN FERNEY MARTINEZ PEÑA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
VILLA DEL ROSARIO
2022



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA LA
PURIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES PARA LA
EMPRESA MAOING**

CRISTIAN FERNEY MARTINEZ PEÑA

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero en Mecatrónica

Director: MsC. Oscar Manuel Duque Suarez
Ingeniero Mecatrónico

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
VILLA DEL ROSARIO

2022



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



DEDICATORIA

Dedico este logro a mi madre y a mi abuela las cuales fueron mi motor fundamental para llegar hasta este momento, a lo largo de mi formación académica fueron quienes me brindaron su amor incondicional, su apoyo desmedido, el aliento que muchas veces me faltaba para seguir adelante y la fortaleza para salir y afrontar los retos, de no ser por ellas este logro no lo hubiera podido alcanzar de la mejor forma.

También dedico este trabajo a el cuerpo de docentes de la carrera, quienes a lo largo de mi formación fueron el pilar fundamental en la enseñanza y quienes también en su gran carisma y rigurosidad me enseñaron y forjaron para ser el profesional que aspiro a ser a lo largo de mi vida.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a mi madre y abuela por el gran sacrificio que realizaron ya que sin ellas no hubiera podido llegar a este punto, siendo ellas mi mayor ejemplo de que los sueños con mucho esfuerzo pueden cumplirse.

Agradezco también a mi tutor MsC. Oscar Manuel Duque por siempre contar con el como guía tanto en mi trabajo de grado como en mi formación académica, convirtiéndose para mí en un ejemplo profesional por su gran capacidad como docente, su alto conocimiento, su actitud para siempre colaborar y aportar su granito de arena.

Agradezco a aquellos compañeros que siempre estuvieron presente brindándome su apoyo, su voz de aliento, los momentos y experiencias que hicieron que mi formación académica fuera la mejor, especialmente a Edison Vergel Soto, Diana Milena Torres y Christian Yesid Moncada.

Agradezco a el Ing. Jhonattan Sandoval y a el Ing. Mauro Ibarra por permitirme realizar mis prácticas en su empresa y darme esta gran oportunidad de adquirir la experiencia en el campo laboral.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



RESUMEN

En este proyecto se desarrollará el diseño de un prototipo de un precipitador electrostático para la purificación de emisiones de gases contaminantes para la empresa MAOING; Este proceso se realiza por medio de alta tensión de voltaje en placas de metales para generar campos eléctricos que atrapan las partículas de contaminantes. De esta manera se purifica el aire del ambiente. Para el proyecto se utiliza un circuito que aumenta la tensión de la red local (120 V), por medio de un transformador conocido como flyback, un sistema de recolección y pesaje que permita saber la cantidad de material particulado purificado.

Se diseñará un dispositivo tipo prototipo de precipitación electrostática con selección de elementos de fácil adquisición, con la finalidad de entender cómo puede ser usado en hornos industriales y el grado de beneficio.

Palabras clave: Precipitador electrostático, material particulado, flyback, purificación, efecto corona.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



ABSTRACT

In this project, a prototype of an electrostatic precipitator for the purification of polluting gas emissions will be developed for the company MAOING; this process is carried out by means of high voltage in metal plates to generate electric fields that trap the pollutant particles. In this way the ambient air is purified. For the project, a circuit is used that increases the voltage of the local network (120 V), through a transformer known as flyback, a collection and weighing system that allows knowing the amount of purified particulate material.

A prototype device for electrostatic precipitation will be designed with a selection of easily acquired elements, with the purpose of meaning it can be used in industrial furnaces and the degree of benefit.

Keywords: Electrostatic precipitator, particulate matter, flyback, air quality, purification.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Contaminantes Asociados a la Producción del Ladrillo	26
Tabla 2 Métodos de ionización	30
Tabla 3 Componentes del Precipitador Electrostático	35
Tabla 4 Marco Legal de Medio Ambiente	47
Tabla 5 Niveles Maximos Permisibles De Contaminantes Criterio En El Aire	49
Tabla 6 Niveles Maximos Permisibles De Contaminantes En El Aire Para El 2030	50
Tabla 7 Medidas Preventivas en el Manejo de Precipitadores Electrostáticos	51
Tabla 8 Propiedades del Acero Inoxidable 304	62
Tabla 9 Propiedades del Acero ASTM A36	63
Tabla 10 Propiedades del Acero Carbono SAE-1045.....	64
Tabla 11 Tabla de Ponderacion de Carcasa, Tolva y Embudo de Entrada y Salida	65
Tabla 12 Propiedades del Acero Inoxidable 304.....	66
Tabla 13 Propiedades Alambre de Aluminio	67
Tabla 14 Propiedades del Alambre de Acero Inoxidable (AISI-316L)	67
Tabla 15 Tabla de Ponderación de Electrodo de Descarga y Sistema Colector	68
Tabla 16 Dimensiones de Aisladores de Barraje	69
Tabla 17 Ponderación de Aisladores	71
Tabla 18 Selección de Software para la Interfaz de Usuario	79
Tabla 19 Costos de Estructura del Precipitador Electrostático	111
Tabla 20 Costos de Elementos de Electrónica y Eléctrica	112
Tabla 21 Costos Adicionales	112
Tabla 22 Costo Total de Inversión	113
Tabla 23 Flujo Futuro a Proyección de 5 Años	114
Tabla 24 Resultado del Análisis Costo - Beneficio.....	116



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Convertidor flyback	21
Figura 2 Diametro de Particulas en Micras	26
Figura 3 Ionización de Particulas	29
Figura 4 Purificación del gas por ionización	34
Figura 5 Diseño y prototipo de precipitador electrostático	34
Figura 6 Sistema Colector y Electrodo de Descarga	37
Figura 7 Aisladores de apoyo	38
Figura 8 Carcasa del precipitador	39
Figura 9 Pantalla Distribuidora de Gas	39
Figura 10 Sistema de Golpeteo	41
Figura 11 Representacion de un Sistema Alambre – Placa.....	42
Figura 12 Representacion de la Configuración Alambre – Tubo.....	43
Figura 13 Representacion de la Configuración Placas Planas Paralelas	44
Figura 14 Representación de la Configuración de Dos Etapas	45
Figura 15 Lamina de Acero Inoxidable (AISI 304)	61
Figura 16 Lamina ASTM A-36.....	63
Figura 17 Acero Carbono SAE-1045	64
Figura 18 Lamina de Acero Inoxidable (AISI 304)	66
Figura 19 Aisladore de Soporte de Barraje	69
Figura 20 Aislador de Porcelana.....	70
Figura 21 Aislador Cónico de Soporte Electrostático	70
Figura 22 Celda de Carga 50Kg	72
Figura 23 Balanza de Carga de 50Kg.....	73
Figura 24 Celda de Carga Tipo Viga 100Kg	74
Figura 25 Caja de Derivación Desxon	76
Figura 26 Rodamiento ENC330°.....	76
Figura 27 Flyback TYF-10K	77
Figura 28 Regulador de Voltaje LM317T	77
Figura 29 Regulador de voltaje LM7805	77
Figura 30 Circuito Integrado NE555.....	78
Figura 31 Transformador 15v.....	78
Figura 32 Mosfet IRFP540	78
Figura 33 Modo de Operación, Distribución de Material Particulado	81
Figura 34 Vista Isométrica Carcasa	84
Figura 35 Vista Superior Carcasa	84
Figura 36 Plano Isométrico y Superior de la Carcasa.....	85
Figura 37 Vista Frontal de Carcasa	85
Figura 38 Plano Vista Frontal y Lateral de la Carcasa.....	86



Figura 39 Vista Frontal Estructura de Soporte	86
Figura 40 Plano Vista Frontal y Lateral de la Base Soporte	87
Figura 41 Vista Isométrica de Estructura de Soporte.....	87
Figura 42 Vista Isométrica de la Base Soporte	88
Figura 43 Vista Isométrica de las 3 Secciones de Electrodo de Descarga	89
Figura 44 Vista Frontal de las 3 Secciones de Electrodo de Descarga.....	89
Figura 45 Vista Isométrica de Electrodo de Descarga y Soporte de Electrodo de Descarga	90
Figura 46 Plano Isométrico, Frontal y Lateral del Sistema de Electrodo de Descarga	90
Figura 47 Vista Isométrica de las 3 Secciones de Placas Colectoras.....	91
Figura 48 Placa colectora y Soporte de Placa Colectora.....	92
Figura 49 Plano del Sistema Colector.....	92
Figura 50 Vista Isométrica de las 3 Secciones de las Tolvas de Recolección	93
Figura 51 Vista Isométrica y Frontal de la Tola de Recolección.....	93
Figura 52 Plano Isométrico, Frontal y Superior de la Tola de Recolección	94
Figura 53 Vista Isométrica y Frontal del Embudo Entrada.....	94
Figura 54 Vista Lateral Izquierda del Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Pequeña	95
Figura 55 Plano Isométrico, Lateral Izq. y Posterior Embudo de Entrada y Pantalla Distribución	95
Figura 56 Vista Isométrica y Frontal del Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Grande	96
Figura 57 Vista Lateral Izq. del Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Grande.....	97
Figura 58 Plano Isométrico, Frontal y Lateral Izq. de Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Grande	97
Figura 59 Vista Isométrica y Frontal del Embudo de Entrada Completo.....	98
Figura 60 Vista Isométrica y Posterior del Embudo de Salida	98
Figura 61 Plano Embudo de Salida	99
Figura 62 Vista Isométrica del Aislador Cónico de Soporte	99
Figura 63 Vista Frontal y Superior del Aislador Cónico de Soporte	100
Figura 64 Plano Isométrico y Frontal del Aislador Cónico	100
Figura 65 Vista Isométrica y Frontal de la Base y Caja de Recolección	101
Figura 66 Plano Isométrico, Frontal y Superior de la Base y Caja de Recolección	101
Figura 67 Vista Isométrica y Lateral Der. de la Caja de Recolección de Material Particulado.....	102
Figura 68 Plano Isométrico, Lateral Der. y Superior de la Caja de Recolección..	102



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Figura 69 Vista Isométrica y Frontal del Precipitador Electrostático	103
Figura 70 Plano Frontal y Lateral Izq. del Precipitador Electrostático	103
Figura 71 Vista Isométrica y Dimétrica Sistema de Precipitación sin carcasa	104
Figura 72 Plano Frontal y Lateral Izq. del Sistema Placa Colectora y Electrodo de Descarga	104
Figura 73 Diagrama de Flujo del Código de Arduino y Processing	105
Figura 74 Interfaz Gráfica de la Tara del Sistema de Pesaje	106
Figura 75 Interfaz Gráfica del Sistema de Pesaje	107
Figura 76 Vista Dimétrica del Sistema de Pesaje	108
Figura 77 Vista Frontal del Sistema de Pesaje	108
Figura 78 Circuito General Pre-Flyback	109
Figura 79 Circuito de Transformación y Rectificación AC a DC	109
Figura 80 Circuito de Regulación de Voltaje	110
Figura 81 Circuito de Elevación de Frecuencia	110
Figura 82 Simulación Deformación Total de la Base de Soporte	127
Figura 83 Resultado del Análisis de Deformación	128
Figura 84 Resultado del Análisis Equivalente Estático (Von-Mises)	128
Figura 85 Análisis Equivalente Estático (Von-Mises)	129
Figura 86 Análisis de Deformación de la Carcasa	129
Figura 87 Análisis Equivalente Estático (Von-Mises)	130
Figura 88 Análisis de Intensidad del Campo Eléctrico	131
Figura 89 Análisis de Generación de Líneas de Campo	131
Figura 90 Análisis de Formación del Campo Eléctrico Perpendicular a él Electrodo de Descarga	132



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



ECUACIONES

Ecuación 1 Fuerza del Campo Eléctrico	54
Ecuación 2 Densidad Relativa del Aire	54
Ecuación 3 Potencial Eléctrico	55
Ecuación 4 Voltaje de Formación de la Corona de Descarga.....	55
Ecuación 5 Viscosidad del Gas.....	56
Ecuación 6 Camino Libre Medio	56
Ecuación 7 Número de Knudsen	57
Ecuación 8 Factor de Corrección de Deslizamiento de Cunningham	57
Ecuación 9 Cochet.....	58
Ecuación 10 Velocidad de Migración de las Partículas.....	58
Ecuación 11 Volumen	106
Ecuación 12 Valor Actual Neto (VAN).....	114
Ecuación 13 Tasa Interna de Retorno (TIR)	115
Ecuación 14 Periodo de Recuperación (PR)	115



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



LISTA DE ANEXO

Anexo A. Código Processing	123
Anexo B. Código Arduino	125
Anexo C. Simulación en ANSYS WORKBENCH	127
Anexo D. Carta de Aprobación del Proyecto	133



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE TABLAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
ECUACIONES	XI
LISTA DE ANEXO	XII
CONTENIDO	13
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL	17
1.1 Introducción	17
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Justificación	18
1.3.1 Justificación Económica	18
1.3.2 Justificación Social	18
1.3.3 Justificación Ingenieril	19
1.3.4 Justificación Ecológica	19
1.4 Objetivo general	19
1.5 Objetivos específicos	19
1.6 Acotaciones	19
1.7 Marco Teórico	20
1.7.1 Flyback (Convertidor de Retroceso)	20
1.7.2 El Dióxido de Carbono (CO ₂)	21
1.7.3 Monóxido de Carbono (CO)	22
1.7.4 Óxidos de Azufre (SO _x)	23
1.7.5 Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	24
1.7.6 Material Particulado (MP)	25
1.7.7 Ionización de Partículas	29
1.7.8 Efecto Corona	30
1.7.9 Corona Inversa o Retro-corona	31
2. CAPÍTULO II: PRECIPITADOR ELECTROSTATICO Y MARCO NORMATIVO	33



2.1	Precipitador Electrostático	33
2.2	Componentes del Equipo.....	34
2.2.1	Sistema Colector	36
2.2.2	Electrodos de Descarga	36
2.2.3	Soporte de Aislación	37
2.2.4	Carcasa.....	38
2.2.5	Pantalla Distribuidora de Gas de Entrada	39
2.2.6	Tolvas de Descarga	40
2.2.7	Sistema de Golpeteo.....	40
2.3	Tipos De Precipitadores.....	41
2.3.1	Precipitador Electrostático Tipo Alambre – Placa.....	41
2.3.2	Precipitador Electrostático Tipo Tubular o Tubo – Alambre	43
2.3.3	Precipitador Electrostático Tipo Placa Plana.....	44
2.3.4	Precipitador Electrostático Tipo Húmedo (PEH):.....	44
2.3.5	Precipitador Electrostático De Dos Etapas.....	45
2.4	Impactos Medio Ambientales.....	46
2.4.1	Impactos Medio Ambientales a Causa de la Fabricación de Ladrillo .	46
2.5	Marco Legal y Normativo	47
2.5.1	Leyes, Decretos y Resoluciones Aplicables.....	47
2.5.2	Límites Permisibles de Contaminantes Para Empresas de Fabricación de Ladrillos	49
2.6	Riegos y Precauciones de Manipulación de Precipitadores Electrostáticos	50
2.6.1	Riesgo de choque eléctrico	51
2.6.2	Riesgo por Manejo de Gases Tóxicos.....	51
2.6.3	Precauciones de Manipulación de Precipitadores electrostáticos	51
3.	CAPÍTULO III: CRISTERIOS DE DISEÑO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	53
3.1	Metodología de Diseño del Precipitador Electrostático	53
3.1.1	Teoría de la Precipitación Electrostática	53
3.1.2	Punto de Operación Eléctrico.....	53
3.2	Criterios de Diseño del Precipitador Electrostático	58
3.2.1	Criterios de Diseño de la Carcasa.....	59
3.2.2	Criterios de Diseño de Electrodos de Descarga y Placas Colectoras	60



3.2.3	Criterios de Diseño de Tolvas de Descarga	60
3.3	Selección de Materiales	61
3.3.1	Descripción de Materiales para la Construcción de Carcasa, Tolvas, Embudos de entrada y Salida y Pantalla de distribución	61
3.3.2	Descripción de Materiales para la Construcción de Electrodo de Descarga y Placas Colectoras	65
3.3.3	Descripción de Materiales de Sistema de Golpeteo	69
3.3.4	Descripción de Materiales de Aisladores Electrostáticos	69
3.4	Selección de Materiales Adicionales	71
3.4.1	Selección de Elementos de Pesaje	71
3.4.2	Caja de Circuitería	75
3.4.3	Rodamientos	76
3.4.4	Flyback	76
3.4.5	Selección de Software para la Interfaz Gráfica	79
4.	CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA	80
4.1	Condiciones Generales	80
4.1.1	Descripción del Precipitador Electrostático	80
4.1.2	Modo de Operación	80
4.2	Cálculos del Precipitador Electrostático	81
4.3	Diseño CAD del Prototipo de Precipitación Electrostática	83
4.3.1	Carcasa	83
4.3.2	Estructura de Soporte	86
4.3.3	Electrodo de Descarga	88
4.3.4	Placas Colectoras	91
4.3.5	Tolvas de Recolección	93
4.3.6	Pantalla de Distribución y Embudo de Entrada	94
4.3.7	Embudo de Salida	98
4.3.8	Aisladores Cónicos de Soporte	99
4.3.9	Base de Recolección de Material Particulado	101
4.3.10	Precipitador Electrostático	103
4.4	Sistema de Medición del Material Particulado	105
4.4.1	Diagrama de Flujo	105
4.4.2	Diseño de Interfaz	106
4.4.3	Diseño CAD del Sistema de Pesaje	107



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



4.5	Circuito Flyback	108
5.	CAPÍTULO V: ANÁLISIS COSTE – BENEFICIO	111
5.1	Análisis de Costos	111
5.1.1	Costo de Estructura y Cuerpo	111
5.1.2	Costo de Materiales Eléctricos y Electrónicos	112
5.1.3	Costos Adicionales	112
5.1.4	Costo Total de Inversión	113
5.2	Análisis de Beneficio	113
5.2.1	Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)	113
	CONCLUSIONES	117
	RECOMENDACIONES	119
	BIBLIOGRAFÍA	120
	ANEXOS	123



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Un precipitador electrostático es un dispositivo utilizado para recolectar material particulado de una corriente de gas basado en el principio de atracción de fuerzas eléctricas. Consta de placas paralelas y alambres entre las placas, lo que permite a este tipo de precipitador tratar grandes volúmenes de flujo. Las paredes externas del precipitador se conectan a tierra a potencial cero. Al alambre en el centro del precipitador se lo denomina electrodo de descarga y a la pared externa electrodo colector. El electrodo de descarga mantiene un potencial negativo respecto del electrodo colector y así el campo eléctrico está dirigido hacia el alambre.

La purificación por precipitación electrostática ha sido un fenómeno conocido desde los comienzos del siglo XIX que se ha aplicado a la purificación de los gases. El precipitador electrostático, es un equipo eléctrico desarrollado industrialmente y utilizado para eliminar impurezas de material particulado que se encuentran suspendidas en el aire o en otros gases producto de un proceso industrial.

Los precipitadores electrostáticos tienden a ser más eficientes sobre todo cuando su recolección está basada en material particulado muy pequeño, siendo que este también, permite trabajar con procesos de mayores temperaturas en las corrientes de los gases.

1.2 Planteamiento del problema

Como principal problema se encuentra, que al realizar un análisis deportivo se carece de precisión en donde un entrenador fácilmente instruye sus deportistas, pero no puede darles un análisis exacto de sus deficiencias, ya que no cuenta con las herramientas necesarias. Por otro lado, al no ser el voleibol un deporte insignia en Colombia, no se encuentran centros deportivos con este tipo de dispositivos en donde se pueda generar un análisis y si se llegase a encontrar, conllevaría costos muy elevados para los deportistas. Con lo cual se hace algo importante y de impacto



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



social el ver reflejado una evolución del deportista para mejorar de forma más rápida.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Económica

Al implementar una maquina colectora de polución otorga que una industria aumente su capacidad de producción debido a las emisiones del material particulado el cual forma parte del material procesado y es así que incrementa los costos en producción al poder recolectar el material desprendido y retornarlo a la línea principal de producción.

Una empresa que emite grandes cantidades de polución hace que se degrade la infraestructura de la planta en general por lo cual aumentan los costos de mantenimiento en infraestructura, por otra parte, también tiende a aumentar los costos de mantenimiento en las máquinas y/o equipos debido a que la polución degrada las partes móviles mecánicas y eléctricas, por lo tanto, disminuyen los periodos de mantenimiento programados, por otra parte, al observar que el material particulado desprendido hacia el ambiente y alrededores de la planta hace que la población, cultivos, áreas verdes y los habitantes se vean afectados por la polución por el cual esto causa conflicto en los habitantes y esto conlleven reclamos a autoridades ambientales que imponen multas ambientales a la industria y que esto ocasionan grandes gastos en la empresa.

1.3.2 Justificación Social

En primera instancia beneficiará a la salud, al medio ambiente y al bienestar del personal de trabajo tanto como las zonas aledañas y los alrededores de la industria, así como también beneficiará indirectamente a la ciudad y a la región ya que, al reducir y controlar las emisiones de material particulado a rangos estandarizados por entidades ambientales, las industrias en general podrían optar reconocimientos y certificaciones por organismos mundiales ambientales que avalen que son industrias que cuentan con una gestión ambiental controlada y esto hará que se coloque en las mejores industrias a nivel mundial.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



1.3.3 Justificación Ingenieril

Hoy en día se ve avances en nuevas tecnologías de ingeniería para disminuir y controlar la polución a nivel ambiental, por lo tanto, se opta por un precipitador electrostático que es uno de los métodos más eficientes para controlar la contaminación en industrias, el cual esto tiende a incentivar y mejorar nuevos métodos de control de material particulado a futuro.

1.3.4 Justificación Ecológica

Al ser una máquina que controla la polución a nivel industrial, esto hará que haya un impacto ambiental menor tanto como a las personas y a los alrededores de las industrias ya que estas máquinas intentarán controlar material particulado a los rangos más mínimos.

1.4 Objetivo general

- Diseñar un prototipo de precipitador electrostático para la purificación de emisiones de gases contaminantes para la empresa MAOING.

1.5 Objetivos específicos

- Estudiar los procesos de precipitación electrostática y generación de prototipos similares.
- Seleccionar los criterios de diseño, elementos de instrumentación, control, visualización, materiales para la generación del prototipo.
- Diseñar el sistema de percepción de variables, control, visualización y estructura mecánica del precipitador electrostático.
- Realizar un análisis costo beneficio para perfilar la viabilidad para la purificación de agentes contaminantes para la empresa MAOING.

1.6 Acotaciones

- Toda selección de materiales tanto electrónico, mecánico y/o de control está sujeto a cambios proporcionados por las especificaciones que asigne la empresa al momento de realizar el diseño.
- Las dimensiones del prototipo precipitador electrostático van a corresponder al espacio asignado por la empresa.





ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



- En la consideración del proyecto solo se llevará a cabo el diseño del prototipo de precipitación electrostática, sin tener en cuenta la construcción física de este mismo.

1.7 Marco Teórico

1.7.1 Flyback (Convertidor de Retroceso)

El convertidor flyback convierte un voltaje de entrada DC en un voltaje de salida DC mayor o menor en función de la relación de espiras del transformador y del ciclo de trabajo del circuito oscilador, generalmente es utilizado para aplicaciones de generación de altos voltajes comprendidos en el rango de los kilovoltios.¹

El convertidor (flyback) cambia la bobina utilizada normalmente en los convertidores convencionales por un transformador con núcleo de ferrita de alta frecuencia lo cual le brinda un aislamiento galvánico.

El convertidor flyback utiliza un transformador en lugar del inductor, donde sus partes principales se encuentran enumeradas como se muestra en la figura 2

- Circuito Oscilador (1).
- Circuito Conmutador (2).
- Transformador flyback (3).

¹ CA Martínez Morales and ER Ramos Bastidas, 'Desarrollo de Un Prototipo de Filtro Electrostático Para Partículas de Co₂ Emitidas Por Automotores a Diésel', Tesis, 2017 <<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14043>>.



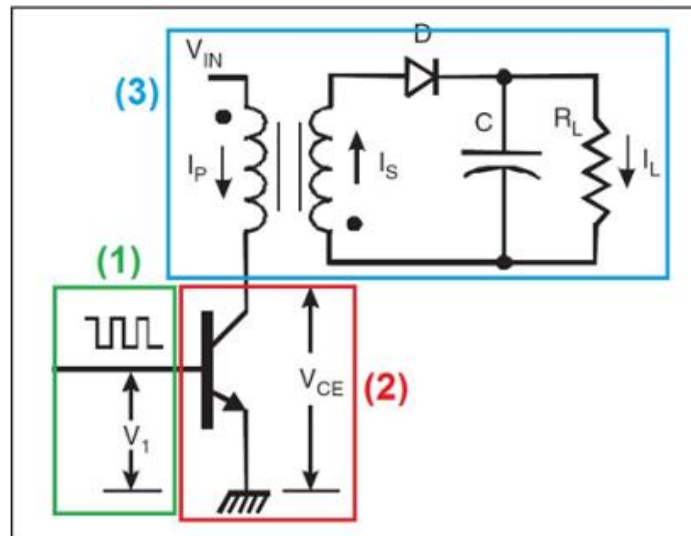
SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

Figura 1 Convertidor flyback



Fuente: ²

1.7.2 El Dióxido de Carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas incoloro, no inflamable a temperaturas y presiones normales, este está compuesto por un átomo de carbono con dos átomos de oxígeno anidados a él, considerado como el cuarto componente más importante del aire seco. Su importancia radica en la capacidad que tiene de absorber la radiación de ondas de 4,26 a 14,99 micrómetros. Esta característica es la que mantiene la superficie de la Tierra caliente, lo que es positivo pues es lo que permite que este planeta sea habitable, pero cuando este empieza a calentarse de manera excesiva a la Tierra, se convierte en impacto negativo y es lo que hoy se conoce como el fenómeno del calentamiento global.³

² Morales and Bastidas.

³ ALEJANDRA LOPERA GOMEZ, 'Cuantificación De Las Emisiones De Dióxido De Carbono En El Valle De Aburrá', 2016.



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



1.7.2.1 Efectos de las Altas Concentraciones de CO₂ en la Atmósfera

El incremento de los gases efecto invernadero, en especial del CO₂, genera un aumento en la temperatura a nivel mundial, denotando cambios en la ocurrencia de los eventos climáticos extremos y cambios en los patrones de precipitación. Este fenómeno tiene efectos directos sobre las especies animales y vegetales llegando desde alterar los ciclos de vida, cambio en la distribución geográfica de las especies, cambios evolutivos en las especies, el aumento del riesgo de extinción y cambios fisiológicos como los procesos de fotosíntesis, respiración y crecimiento.

Las altas concentraciones de CO₂ podrían considerarse entonces como una causa indirecta de la alteración del funcionamiento de los ecosistemas naturales e incluso de la extinción de algunas especies. En relación con el aumento de la temperatura, Future Energy, describe cómo el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han alterado la temperatura global en los últimos 30 años, si la tasa con la cual se está emitiendo CO₂ continúa con la misma tendencia, dentro de 60 años aproximadamente la temperatura de la tierra habrá llegado al límite para que pueda funcionar correctamente, que es 2°C por encima de la temperatura antes de la revolución industrial. Desde el año 1950 los niveles de CO₂ en la atmósfera han aumentado en un 40% lo que ha ocasionado un aumento de 0,8°C en la temperatura global. ⁴

1.7.3 Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas peligroso que no presenta color, sabor u olor lo cual lo hace un gas técnicamente no detectable o imperceptible. Químicamente es un gas inerte que se produce por la combustión incompleta de combustibles u otros elementos como petróleo, madera, gas natural, propano, carbón. Las bajas concentraciones de este gas no representan consecuencias graves para los seres vivos, no obstante, al ser expuestos por un tiempo prolongado o por mayores

⁴ GOMEZ.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



concentraciones estos gases ocasionan daños serios sobre el metabolismo respiratorio debido a la afinidad de la hemoglobina con este compuesto.

Cuando respiramos, nuestros glóbulos rojos recogen oxígeno en los pulmones. Luego, el oxígeno se transporta por todo el cuerpo a los tejidos y órganos. Los glóbulos rojos recogen CO más fácilmente que el oxígeno. Entonces, si inhalamos cantidades suficientemente grandes de CO, los glóbulos rojos recogerán CO en lugar de oxígeno. Esto evitará que llegue suficiente oxígeno a nuestras diferentes partes del cuerpo, lo que puede causar daños en los tejidos. Los daños sobre la salud que produce el CO se deben a que al combinarse con la hemoglobina de la sangre disminuye en ésta su capacidad para ejercer su función normal de transporte de oxígeno, por consiguiente, en casos extremos, la falta de absorción de oxígeno debido a la intoxicación por CO puede conducir a la muerte.⁵

Lo anterior sugiere que el monóxido de carbono es altamente peligroso debido a su imperceptibilidad. Ni las personas ni los animales pueden saber cuándo lo están respirando, pero puede ser fatal. El monóxido de carbono (CO) es un subproducto de la combustión. Los artículos domésticos comunes, como incendios, fugas de gas, generadores portátiles, parrillas de carbón, entre otros, exponen a las personas a este gas venenoso. El monóxido de carbono (CO) también existe en el medio ambiente como un contaminante del aire que se emite desde el escape de los automóviles, botes y otros equipos de combustión interna que se utilizan diariamente en actividades humanas. Aunque los motores de combustión no suelen ser las principales causas de intoxicación por CO, son contribuyentes importantes a la contaminación del aire.⁶

1.7.4 Óxidos de Azufre (SO_x)

El término SO_x se utiliza para denotar las emisiones de óxidos de azufre, en especial el SO₂ y el SO₃, ya que estas son los principales y más abundantes gases de

⁵ Jairciño Páez Claro, 'Tipos de Contaminantes Atmosféricos Asociados a La Fabricación de Ladrillos Artesanales En Colombia', 3.2017 (2020), 54–67 <<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>>.

⁶ Jairciño Páez Claro.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



emisión, en la emisión de gases producto de la fabricación de ladrillo se ha tenido una mayor atención en la actualidad por el SO_2 el cual, es el principal contaminantes en los países que están en desarrollo , ya que sus procesos conllevan a la generación artificial de este gas contribuyendo a la contaminación urbana como a la formación de precipitaciones de lluvia acida.

El dióxido de azufre (SO_2), uno de los óxidos de azufre más comunes, es un gas venenoso y contaminante que impacta directamente sobre la salud respiratoria de las personas, puesto que puede ser el desencadenante de diferentes enfermedades como el asma y la bronquitis crónica. El SO_2 es altamente nocivo para otras especies que habitan con nosotros, ya que este gas, en compañía de otros como el ácido sulfúrico H_2SO_4 , ocasionan daños y destrucción de la flora y fauna, deterioro del suelo y fuentes de agua, entre otros.⁷

El trióxido de azufre (SO_3), es un contaminante significativo en su forma gaseosa, y es el componente principal de la lluvia ácida. Cuando está perfectamente seco, el vapor de trióxido de azufre es completamente invisible; cuando está en forma líquida, es transparente. El vapor inodoro es extremadamente corrosivo, debido a su formación de neblina de ácido sulfúrico. Es importante saber que el trióxido de azufre debe manejarse con mucho cuidado, ya que reacciona muy violentamente con el agua. La combinación de trióxidos de azufre con agua crea ácido sulfúrico, que es altamente peligroso y corrosivo.⁸

1.7.5 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los NO_x se componen de siete compuestos que derivan del nitrógeno. Entre los compuestos que más prevalentes en la atmosfera de la familia del NO_x se encuentra el dióxido de nitrógeno (NO_2), el cual se genera a partir de actividades humanas por lo tanto se considera uno de los grandes contaminantes del aire.

⁷ Jairciño Páez Claro.

⁸ Jairciño Páez Claro.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



Los óxidos de nitrógenos constituyen un grupo importante de gases contaminantes. Entre los que se destacan: el dióxido de nitrógeno, NO_2 y el óxido nítrico, NO . Debido a las altas temperaturas presentes en procesos de combustión, se generan óxidos de nitrógeno. Estas altas temperaturas, también benefician la producción de ácido nítrico, al permitir la combinación directa del oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera, posteriormente este gas se oxida y se origina dióxido de nitrógeno. La liberación a la atmósfera de este gas, es evidente al disminuir la visibilidad, se presenta corrosión de materiales e interfiere en el crecimiento de algunas plantas de gran importancia para el sector agrícola.⁹

1.7.6 Material Particulado (MP)

El material particulado estructuralmente se compone de una mezcla de sólidos y gotas de líquido que flotan en el aire o por reacciones químicas atmosféricas. Estas partículas tienen variaciones en su tamaño algunas siendo tan pequeñas, del orden de los 10 micrómetros, que pueden llegar a introducirse en los pulmones. Haciendo que las personas con enfermedades cardíacas, adultos en la tercera edad y niño sean más propensos a contraer enfermedades por la exposición a este material particulado. Las enfermedades que tienen mayor cabida en la problemática de contaminación por material particulado van desde: Irritación en los ojos, nariz, garganta, tos, dificultad para respirar, ataques de asma, ataques al corazón, muerte prematura con personas que posean enfermedad cardíaca o pulmonar.

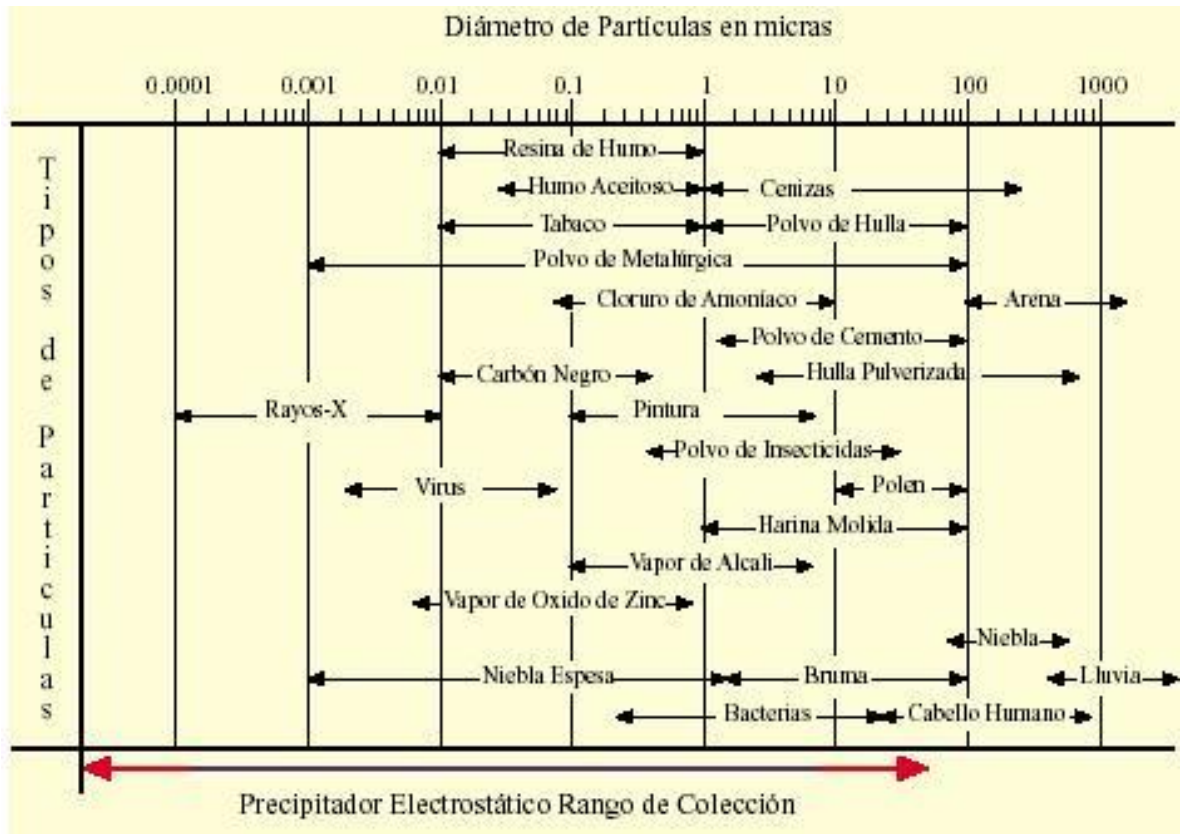
Las partículas se dividen en dos grupos principales, y uno de esos grupos se refiere al tamaño, a las más grandes se le llaman PM_{10} y a las más pequeñas se le llaman $\text{PM}_{2.5}$. Las partículas más grandes, miden entre 2.5 y 10 micrómetros (de 25 a 100 veces más delgado que el cabello humano), estas partículas llamadas PM_{10} , que significa hasta 10 micrómetros en tamaño. Las partículas pequeñas son menores a 2.5 (100 veces más delgadas que un cabello humano).¹⁰

⁹ Jairciño Páez Claro.

¹⁰ Jairciño Páez Claro.



Figura 2 Diámetro de Partículas en Micras



Fuente: ¹¹

Tabla 1 Contaminantes Asociados a la Producción del Ladrillo

Contaminantes	Características Generales	Efectos
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Es un gas sin color, olor ni sabor que se encuentra presente en la atmosfera de forma natural. Desempeña un importante papel en el ciclo del carbono en la naturaleza. Proviene de manera	No es toxico, pero es un gas que produce un importante efecto de atrapamiento del calor (efecto invernadero).

¹¹ Jairciño Páez Claro.



	artificial, por la quema de los combustibles fósiles y de grandes extensiones de bosques.	
Monóxido de Carbono (CO)	Es un gas sin color, olor ni sabor. Es un contaminante primario. Alrededor del 90% existe en la atmósfera y se forma de manera natural, en la oxidación de metano (CH ₄) en reacciones fotoquímicas. Se va eliminando por su oxidación a CO ₂ . La actividad humana lo genera en grandes cantidades siendo, después del CO ₂ , el contaminante emitido en mayor cantidad a la atmósfera por causas no naturales. Procede principalmente, de la combustión completa de combustibles fósiles.	Es tóxico, se combina fuertemente con la hemoglobina de la sangre y reduce drásticamente la capacidad de la sangre de transportar oxígeno, también puede ocasionar cambios estructurales en el corazón y cerebro de los animales, cambios en el umbral de la luminosidad relativa y agudeza visual e impedimento en el funcionamiento de las pruebas psicomotoras.
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Es un gas incoloro y no inflamable, de olor fuerte e irritante, emitido en mayor cantidad después del monóxido de carbono (CO). Su vida media en la atmósfera es corta, de unos 2 a 4 días. Es emitido por actividades humanas, sobre todo por la combustión de	Alrededor de la mitad que llega a la atmósfera vuelve a depositarse en la superficie y el resto se convierte en iones sulfato (SO ₄ ⁻²). Por este motivo es un importante factor en la lluvia ácida, acidificando aguas



	combustibles fósiles y por la metalurgia, debido a la reacción entre el aire de la combustión y el azufre contenido en el combustible. En la naturaleza, es emitido en la actividad volcánica. Otra fuente muy importante es la oxidación del H_2S .	superficiales y suelos y produce corrosión de estructuras.
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	Se produce por combustiones realizadas a altas temperaturas, debido a la reacción entre el nitrógeno presente en el aire y en el combustible y el oxígeno de aire, es precursor de smog fotoquímico	Causa enfermedades respiratorias (fibrosis pulmonar crónica, bronquitis, entre otros), irritación y disminución del crecimiento de las plantas.
Material Particulado (MP) ₅	Compuesto por ceniza, polvo, hollín, entre otros. Están compuestas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono (hollín). Dentro de los metales, los más relevantes desde un punto de vista toxicológico son el arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo, entre otros.	Tos, resolló, dificultad para respirar, agravamiento del asma (en personas que la padecen), agravamiento de enfermedades coronarias, daño al pulmón (incluyendo la disminución de la función del pulmón y enfermedades respiratorias de por vida), alteraciones en la coagulación de la sangre y muerte

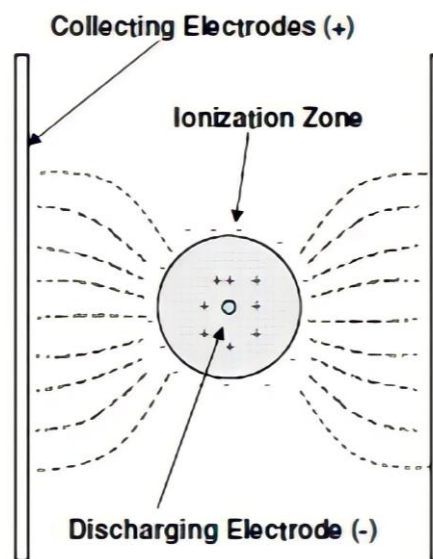
	prematura	en
	individuos	con
	enfermedades	del
	corazón y del pulmón.	

Fuente: ¹²

1.7.7 Ionización de Partículas

El proceso de ionización se da cuando un electrón recibe la energía suficientemente grande para elevarlo a una órbita infinitamente grande para remover el electrón del campo eléctrico del núcleo, obteniendo una disociación de la molécula cargada eléctricamente con iones. ¹³

Figura 3 Ionización de Partículas



¹² Jairciño Páez Claro.

¹³ Morales and Bastidas.



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Fuente: ¹⁴

Existen diferentes métodos por los cuales se pueden ionizar las partículas siendo las más comunes y eficientes:

- Difusión
- Efecto Campo
- Efecto Corona

Tendiendo a ser el efecto corona el mejor método de ionización aplicable a los filtros electrostáticos, esto debido a que al margen de tamaños de diámetros material particulado que puede ionizar

Tabla 2 Métodos de ionización

Método	Tamaño de partículas ionizadas. [um]	Tamaño de partícula de CO ₂ . [um]
Difusión	< 0.2	0.5
Campo	> 1	0.5
Corona	[0.2 – 1]	0.5

Fuente: ¹⁵

1.7.8 Efecto Corona

El efecto de corona o descarga de corona se da cuando se hace fluir un alto potencia en un electrodo, donde se transfiere una corriente a un medio neutro para ser cargado, y así, generar alrededor del electrodo una zona de plasma, esto sucede

¹⁴ V. Colenghi and others, 'Development of an Electrostatic Precipitator Prototype to Reduce Exposure to Radon Progeny in Poorly Ventilated Workplaces', *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13.1 (2020), 747–57 <<https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1838039>>.

¹⁵ Mario Olavarría, " Plan de Mantenimiento de Precipitadores Electroestáticos de Una Planta de Celulosa .", *Universodad Del Bío-Bío*, 2014.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



porque al generarse iones estos desplazan sus cargas a zonas con menor potencial para así volver a su estado neutro.

El efecto corona exclusivamente se genera si el campo eléctrico en la extensión del conductor sobrepasa un valor crítico, la resistencia dieléctrica o el gradiente potencial disruptivo del fluido. En el aire a presión atmosférica, es de aproximadamente 30 kilovoltios por centímetro, y es proporcional a la presión del ambiente, significando que a presiones bajas se puede formar la corona a menor voltaje. Como se mencionó anteriormente, dependiendo de la geometría en la que este el medio neutro, en algunos puntos la corona tiende a formarse primero allí, y algunos autores establecen que se puede formar entre potenciales de 2 a 6 kV. Finalmente, este tipo de descarga o de efecto es efectivo para partículas de tamaños menores a 1 micra, las cuales tengan un requerimiento de voltaje sumamente alto para ser cargadas, por esto, su aplicación es bastante conocida en la carga de gases o fluidos con grandes cantidades de polvo, ya que es capaz de ionizar las partículas más pequeñas, sin cargar el resto del fluido.¹⁶

1.7.9 Corona Inversa o Retro-corona

Este ocurre en el momento en que el material particulado se acumula sobre el alambre haciendo que la corriente iónica que se desplaza hacia las placas colectoras se obstaculice. Para generar un campo eléctrico en la capa de polvo la corriente iónica tiene que pasar a través de esta capa para alcanzar el electrodo. Cuando el campo es lo suficientemente grande se genera un colapso haciendo que se reduzca la carga sobre las partículas y se genere chispas entre el espacio que hay entre el alambre y la placa colectora. Esta condición es la que se conoce como “retro-corona” o “Corona inversa”.

En su trayectoria hacia el alambre de la corona, estos iones positivos chocan contra los iones negativos que se están moviendo hacia la placa colectora, y por lo tanto

¹⁶ OSCAR ALBERTO CUÉLLAR HERNÁNDEZ and AYDER FABIÁN RINCÓN, 'FILTRO POR PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA PARA LA REMOCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN EL ESCAPE DE MOTORES DIESEL OSCAR', *Tesis*, 21.1 (2020), 1–9.





ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



reducen la fuerza del campo general del PES. Esto sucede porque al chocar los iones positivos contra los iones negativos, estos últimos desaparecen, y esto produce disipación y desperdicio de energía que se evidencia en la presencia de chispas. Este fenómeno se denomina como "recombinación de iones". La recombinación no es favorable para la eficiencia del PES, y debe evitarse con el fin de ahorrar energía y mantener condiciones óptimas de seguridad en el campo eléctrico, así como la densidad de corriente suficiente para lograr la máxima precipitación de material particulado en el PES.¹⁷

¹⁷ Julián Gellis Orta, Gustavo Guerrero, and Raúl Narvaez Sáenz, 'Precipitadores Electrostáticos De Sólidos', 2014, 1–16 <[http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2241/1/Principios para el modelamiento de Precipitadores_Julián Gelis Orta_USBCTG_2014.pdf](http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2241/1/Principios%20para%20el%20modelamiento%20de%20Precipitadores_Juli%C3%A1n%20Gel%C3%ADs%20Orta_USBCTG_2014.pdf)>.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



2. CAPÍTULO II: PRECIPITADOR ELECTROSTATICO Y MARCO NORMATIVO

2.1 Precipitador Electrostático

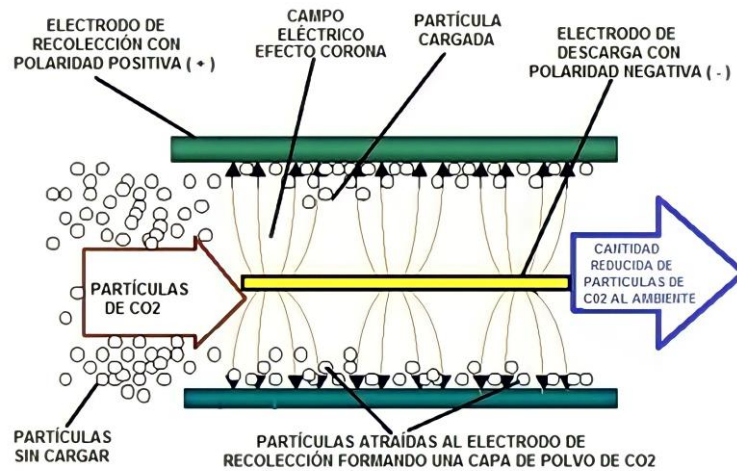
La función principal de un precipitador electroestático es la recolección de partículas producto de los gases de combustión de diferentes procesos industriales. Estos equipos permiten la evacuación de los gases del proceso lo más limpio posible. El proceso de precipitación electroestática consiste en tres pasos fundamentales:

- Carga de partículas.
- Recolección de partículas.
- Desalojo del material recolectado.

La figura 3 ilustra el principio básico. Simplemente, es un aparato que limpia gases del proceso, usando fuerzas eléctricas para quitar las partículas sólidas que acarrea el flujo de gas. Los gases sucios se pasan a través de un campo eléctrico entre electrodos de polaridades opuestas. Los electrodos de descarga que resultan de la aplicación de alto voltaje imparten una carga negativa a las partículas. Estas partículas son atraídas a los electrodos de recolección que son positivos respecto a los electrodos de descarga y en la práctica están conectados a tierra.

En el caso del polvo, las partículas se acumulan en el electrodo de recolección hasta que una fuerza de sacudido se aplique a los electrodos para soltar el polvo y este precipite a la tolva para su posterior evacuación.

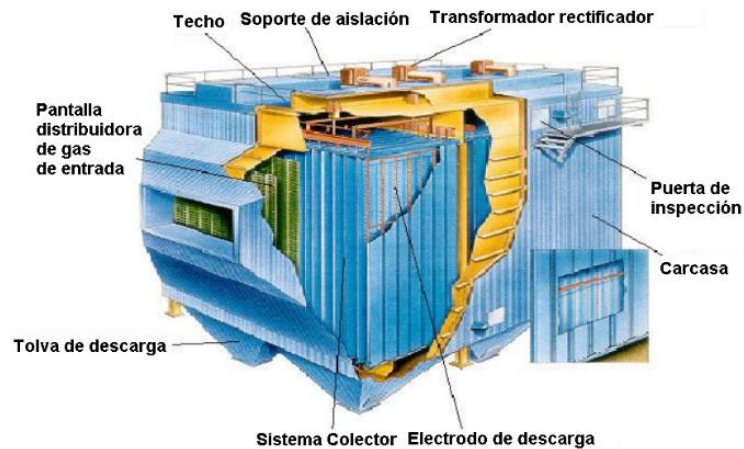
Figura 4 Purificación del gas por ionización



Fuente: ¹⁸

2.2 Componentes del Equipo

Figura 5 Diseño y prototipo de precipitador electrostático



Fuente: ¹⁹

¹⁸ Morales and Bastidas.

¹⁹ Olavarría.

Tabla 3 Componentes del Precipitador Electrostático

COMPONENTES	FUNCION
Sistema colector	Extrae grandes volúmenes de gas que se quedan adheridos por medio del efecto de ionización.
Electrodo de descarga	Generar la descarga de corona en el precipitador.
Carcasa	Cubre y soporta el sistema colector, electrodos de descarga y otros componentes del precipitador.
Transformador rectificador	Permite convertir corriente alterna en corriente continua y aumentas la tensión eléctrica.
Soporte de aislación	El sistema de electrodos de descarga está suspendido en la parte superior de estos aisladores.
Pantalla distribuidora de gas de entrada	Distribuir en forma uniforme el flujo de gas.
Tolva de descarga	Guardar temporalmente el polvo recolectado antes de desalojarlo.
Techo	Sostiene los aisladores de soporte y el transformador rectificador.
Puerta de inspección	Puerta de acceso para inspeccionar el interior del Precipitador.
Sistema de golpeteo	Golpea constantemente el sistema colector para que el material particulado caiga en las tolvas de descarga.

Fuente: ²⁰

²⁰ Olavarría.



2.2.1 Sistema Colector

El método de sistema colector, placa colectora o electrodos colectores son normalmente usados debido a su eficiencia en la recolección de grandes volúmenes de gas o material particulado

Su sección se diseña de modo que produzca una gran estabilidad de forma así como un buen comportamiento vibratorio; Estas propiedades se consiguen mediante múltiples repliegues practicados en el centro del electrodo y mediante ranuras en los lados a lo largo del mismo, estando abiertas hacia un solo lado. Además, estas ranuras actúan como defensas del flujo, evitando que las partículas ya separadas vuelvan a entrar en el flujo de gases. ²¹

2.2.2 Electrodo de Descarga

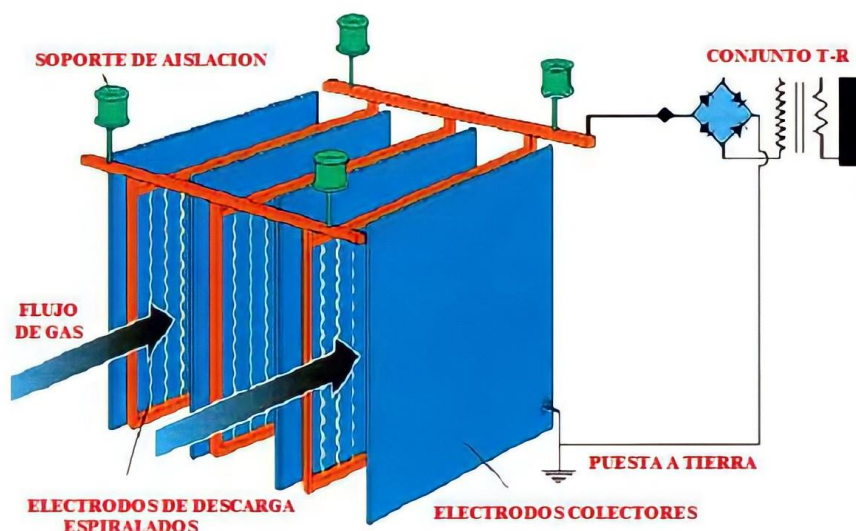
Son elementos conectados a la polaridad negativa del transformador rectificador este electrodo se encarga de producir y provocar la descarga de corona que permite ionizar las partículas de gas. Los iones negativos viajan hacia el sistema colector la cual tiene carga positiva, en su trayectoria colisionan con la partícula de gas, haciendo que estas también se carguen negativamente y por lo tanto haciendo que estas también viajen hacia el sistema colector o placa colectora

En la mayoría de los precipitadores, los electrodos de descarga son cables delgados, redondos de 1.3 a 3.8 mm de diámetro, estos pasan por la línea central de cada pasaje de gas en el que hay una serie de electrodos individuales que se mantienen tensos por medio de un peso de hierro fundido, el que sirve para centrarlos. El número de electrodos por área de placa varía, en general, la mayoría de los diseños coloca dos electrodos por cada 460 mm de largo de placa. El número de electrodos por conjunto T-R se presentan en una variedad de formas para cada instalación y constituyen los componentes de alto voltaje en los pasajes del gas. ²²

²¹ Olavarría.

²² Olavarría.

Figura 6 Sistema Colector y Electrodo de Descarga



Fuente: ²³

2.2.3 Soporte de Aislación

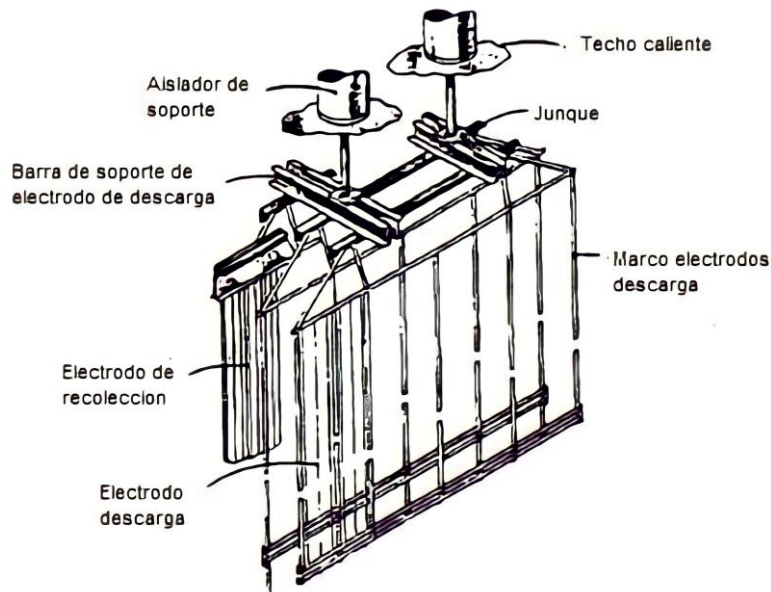
Los soportes de aislación son sistemas que se utilizan para mantener suspendido en la parte superior del precipitador electrostático los electrodos de descarga, estos se mantienen soportados por pestañas con empaquetaduras especiales tanto en la parte superior como inferior con el fin de compensar el coeficiente de expansión de los aceros y así evitar que los aisladores sufran roturas.

Los aisladores de apoyo están ubicados en compartimentos del techo de la carcasa, los compartimentos aislantes, ya sean de diseño de túnel o cajas separadas, dependiendo del ancho de la carcasa, están aislados y calentados (normalmente en forma eléctrica) para mantener los aisladores por encima del punto de condensación del gas de combustión. ²⁴

²³ Olavarría.

²⁴ Henry Jeovany Saravia Morales, 'ESTUDIO AMBIENTAL, TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS, EN PLANTA DE GENERACIÓN ARIZONA', 2008, 461.

Figura 7 Aisladores de apoyo



Fuente: ²⁵

2.2.4 Carcasa

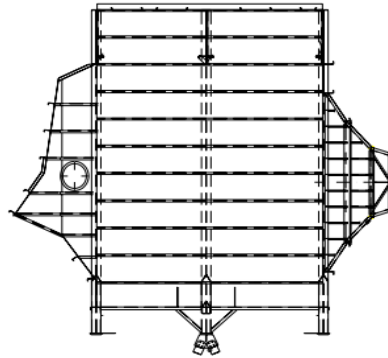
La carcasa de los precipitadores electrostáticos por lo general se diseña en acero al carbono, con conductos que dirigen el gas de la combustión hasta el interior del precipitador por medio de embudos de entrada y salida del contando con compartimientos aislantes que se posicionan en el techo de la carcasa para proporcionar estabilidad a el soporte de aislamiento.

Las columnas de la carcasa compacta se encuentran en el interior de la pared de la carcasa, produciendo una superficie exterior plana lo que simplifica la construcción y aislamiento. Todas las cargas de la carcasa son llevadas por vigas pórtico colocadas en los conductos entre los campos que transfieren las cargas directamente a la estructura de apoyo y cimientos. ²⁶

²⁵ Olavarría.

²⁶ Morales.

Figura 8 Carcasa del precipitador

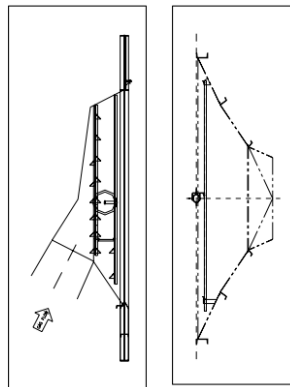


Fuente: ²⁷

2.2.5 Pantalla Distribuidora de Gas de Entrada

Se trata de un sistema de distribución uniforme del gas que entra a sistema precipitador, consiste en placas perforadas que se posicionan en forma de un embudo a la entrada del precipitador, esta permite que el gas que proviene de la combustión del proceso industrial

Figura 9 Pantalla Distribuidora de Gas



Fuente: ²⁸

²⁷ Morales.

²⁸ Morales.



2.2.6 Tolvas de Descarga

Se hace uso de tolvas en un precipitador para guardar temporalmente el polvo recolectado antes de vaciarlo del sistema, este puede llegar a ser re-utilizado en diferentes procesos del sistema precipitador. Para facilitar el deslice del material particulado precipitado se tiene en cuenta que la tolva debe tener una inclinación de 60°, también se debe permitir en su diseño el fácil acceso a la limpieza e inspección llegado el caso el material se quede atorado en su interior.

El polvo recolectado de las tolvas puede crear problemas especiales si no se remueve rápida y continuamente. Por ejemplo, cuando el polvo se enfría y hay humedad presente, se endurece y se vuelve difícil de remover. Otro problema es el sobrellenado. Cuando se acumula tanto polvo que este toca la parte inferior de los electrodos de descarga, puede crear un corto circuito en todo un campo eléctrico. Otros problemas de puente y apelmazamientos también pueden ocurrir, requiriendo que algún tipo de fuerza los remueva. Se pueden usar placas de golpeo, orificios para introducir varas, vibradores, sacudidores y bocinas acústicas.²⁹

2.2.7 Sistema de Golpeteo

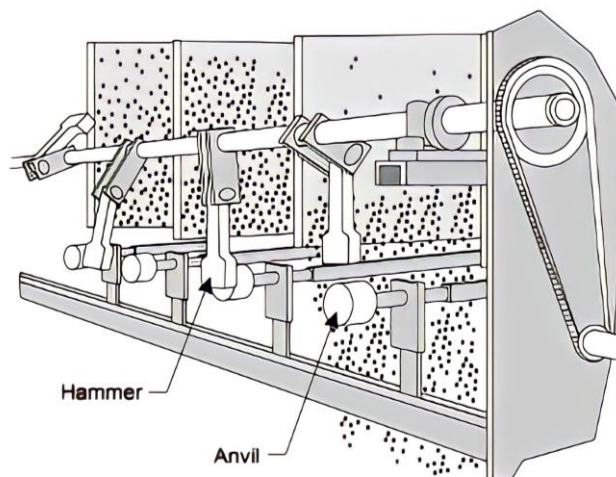
Este tipo de sistema se utiliza en todos los precipitadores electrostáticos; durante el proceso de precipitación el polvo o material particulado que se recoge en los electrodos de descarga, sistema colector y en la estructura se acumulará en una capa de polvo alrededor de todo el sistema de precipitación, en consecuencia, es primordial realizar golpes continuos en estos para sacudir los electrodos para que el material particulado caiga a las tolvas de descarga evitando así su acumulación.

Existe un sistema de golpeteo instalado por cada sección eléctrica de bus. La operación de cada sistema de golpeteo está controlada en forma independiente por un microprocesador y programada para una frecuencia óptima de golpeteo respecto de la recolección y el re-arrastre del polvo. La unidad de accionamiento para el

²⁹ Olavarría.

golpeteo de los electrodos emisores está colocada sobre el techo del PE. El eje aislador se encuentra en una caja aislada y calentada en forma eléctrica.³⁰

Figura 10 Sistema de Golpeteo



Fuente: ³¹

2.3 Tipos De Precipitadores

La estructura y tipo de precipitador electrostático depende de su aplicación, por ende, existen una variedad de maneras de formar un sistema de precipitación electrostática, estos son:

2.3.1 Precipitador Electrostático Tipo Alambre – Placa

En el PE tipo tubo-alambre, también llamado PE tubular, el gas emitido fluye verticalmente a través de tubos conductivos, generalmente con varios tubos operando en paralelo. Los tubos pueden estar alineados en formación circular, cuadrada, o en forma de panal hexagonal. La tubería cuadrada y la hexagonal se

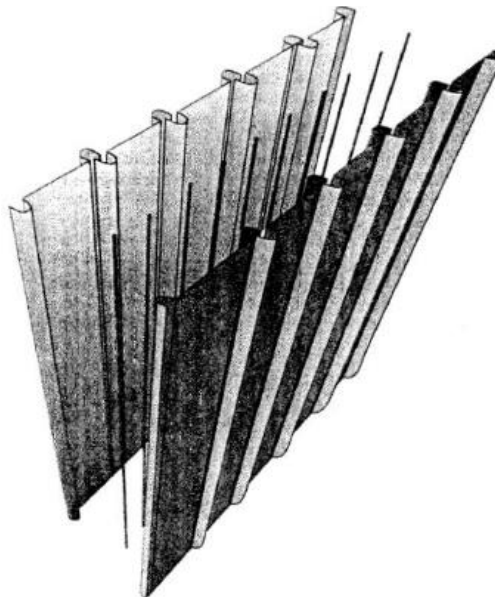
³⁰ Morales.

³¹ Josué Abel Mamani, 'Diseño e Implementación de Un Prototipo a Escala de Un Precipitador Electrostático Para El Control de Polución En Una Industria Cementera', *Universidad Católica de Santa María*, 2019 <<https://tesis.ucsm.edu.pe:80/repositorio/handle/UCSM/9517>>.

pueden compactar más estrechamente que la tubería cilíndrica, reduciendo el espacio desaprovechado. Los tubos son normalmente de 7 a 30 cm (3 a 12 pulgadas) de diámetro y de 1 a 4 metros (3 a 12 pies) de longitud. Los electrodos de alto voltaje son alambres largos o “mástiles” rígidos, suspendidos de un marco en la parte superior del PE, que atraviesan el eje de cada tubo. Los electrodos rígidos están generalmente sostenidos tanto por un marco superior como por uno inferior. En los diseños modernos, se añaden puntas filosas a los electrodos, ya sea a la entrada o a lo largo del tubo, en forma de estrellas para proporcionar sitios de ionización adicionales.

Se utilizan en el control de partículas con diámetros aerodinámicos superiores a $2.5\mu\text{m}$ y contaminantes peligrosos del aire en forma particulada, como son la mayoría de los metales a excepción del mercurio.³²

Figura 11 Representación de un Sistema Alambre – Placa



Fuente: ³³

³² Morales.

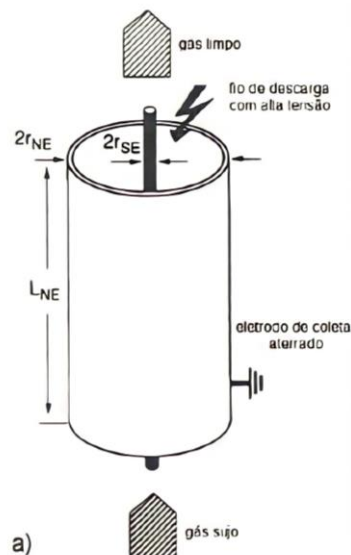
³³ Mamani.

2.3.2 Precipitador Electrostático Tipo Tubular o Tubo – Alambre

Los PES originales eran tubulares, como las chimeneas, donde eran colocados, con los electrodos a alto voltaje orientados a lo largo del eje del tubo. Los precipitadores tubulares tienen aplicaciones típicas en plantas de adición de ácido sulfúrico, limpieza del gas subproducto de los hornos de coque (remoción de alquitrán) y, recientemente, plantas de sinterización de hierro y acero. Tales unidades tubulares aún son utilizadas para algunas aplicaciones; suelen tener muchos tubos en paralelo para manejar mayores flujos de gas. Los tubos pueden tener forma de panal circular, cuadrado o hexagonal, y el gas fluye hacia arriba o hacia abajo

Se utilizan en el control de partículas con diámetros aerodinámicos superiores a $2.5\mu\text{m}$ y contaminantes peligrosos del aire en forma particulada, como son la mayoría de los metales a excepción del mercurio.³⁴

Figura 12 Representación de la Configuración Alambre – Tubo



Fuente: ³⁵

³⁴ Morales.

³⁵ Mamani.

2.3.3 Precipitador Electrostático Tipo Placa Plana

Utiliza placas como reemplazo de alambres para los electrodos expuestos al alto voltaje. Las placas planas ayudan a intensificar el campo eléctrico, que se usa para la recolección de partículas; también aporta una mayor área para la recolección de estas.³⁶

Los electrodos pueden ser agujas puntiagudas adheridas a los bordes de las placas o electrodos de corona independientes. A diferencia de los PE's de placa- electrodo o de los tubulares, este diseño opera igualmente bien con polaridad ya sea negativa o positiva. Los fabricantes han escogido utilizar polaridad positiva para reducir la generación de ozono.

Figura 13 Representacion de la Configuración Placas Planas Paralelas



Fuente: ³⁷

2.3.4 Precipitador Electrostático Tipo Húmedo (PEH):

Recibe este nombre debido a que cualquiera de los otros tipos ya mencionados se puede configurar para que se reemplacen las paredes secas o placas por paredes húmedas. Los PEH se utilizan en situaciones en las que los precipitadores

³⁶ Juan Felipe Rodríguez and others, 'Diseño y Prototipo de Un Precipitador Electrostático', *Revista Mutis*, 7.2 (2017), 86–95 <<https://doi.org/10.21789/22561498.1237>>.

³⁷ Diana Cabrera G, William Ruano R, and Universidad Mariana, 'Diseño de Un Filtro Electrostático a Escala Piloto', 5.2 (2008), 110–13.

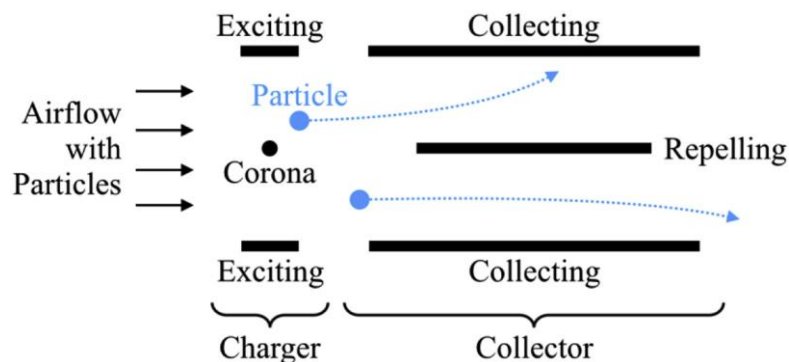
electrostáticos secos (PES) no son apropiados, cuando el material por recolectar está húmedo, pegajoso, es inflamable, es explosivo o tiene una resistividad alta.³⁸

2.3.5 Precipitador Electrostático De Dos Etapas

El precipitador de dos etapas, es un dispositivo en serie con el electrodo de descarga o ionizado, precediendo a los electrodos de recolección. Para aplicaciones en interiores, la unidad es operada con una polaridad positiva para limitar la generación de ozono.

Las ventajas de esta configuración incluyen más tiempo para cargar las partículas, menos propensión a corona invertida y construcción económica para tamaños pequeños. Este tipo de precipitador es generalmente utilizado para volúmenes de flujo de gas de 50,000 acfm y menos y se aplica a fuentes sub-micrométricas emitiendo rocíos de aceite, humos, gases de combustión u otros particulado pegajosos, porque hay poca fuerza eléctrica para retener a los particulado recolectados sobre las placas.³⁹

Figura 14 Representación de la Configuración de Dos Etapas



Fuente:⁴⁰

³⁸ Rodríguez and others.

³⁹ Rodríguez and others.

⁴⁰ Tsrong-Yi Wen and Jiann-Lin Su, 'Corona Discharge Characteristics of Cylindrical Electrodes in a Two-Stage Electrostatic Precipitator', *Heliyon*, 6.2 (2020), e03334 <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03334>>.



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



2.4 Impactos Medio Ambientales

Se considera impacto ambiental según el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial “cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad”.⁴¹ Simplificado de otra manera, se puede considerar impacto ambiental todas aquellas actividades humanas, proyecto de infraestructura y sistemas industriales que generen efecto sobre un entorno o los organismos que estos lo habiten.

2.4.1 Impactos Medio Ambientales a Causa de la Fabricación de Ladrillo

Los agentes contaminantes emitidos por los hornos de fabricación de ladrillo son la causa directa de la contaminación del aire, no obstante, el aire no es el único elemento que se ve implicado en su contaminación, elementos como: el agua potable, los cultivos de alimento, zonas habitadas por personas, entre otras. Pudiendo así afirmar que el cuerpo y la vida humana y animal son contaminadas cuando se come, toma agua o incluso con solo respirar.

No solo el impacto medio ambiental que causa la fabricación de ladrillo puede dañar a seres vivos, este problema hay que analizar sus repercusiones a corto y largo plazo, por lo tanto, a corto plazo podría llegar a generar tales sustancias tóxicas que dañen por ejemplo el crecimiento de la vegetación y a largo plazo esta contaminación puede tener efectos de tamaño macro llegando a causar daños atmosféricos como: calentamiento global, agotamiento del ozono y el smog fotoquímico.

Según la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca en Colombia, los ecosistemas están cambiando debido a la explotación de los recursos naturales y su posterior transformación y beneficio. Esta actividad provoca cambios en la estructura del ecosistema, modificando su dinámica y provocando la pérdida de poblaciones de organismos necesarios para la producción de alimentos. Hablando

⁴¹ Decreto 2254, ‘MINISTERIO DE AMBIENTE , VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL’, 1220 (2005).



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



de la extracción nacional de minerales, la República Centroafricana señala que, en general, esta actividad se realiza con una inversión mínima por parte de los empresarios, debido a la abundancia de materias primas de buena calidad y la facilidad para obtener mano de obra barata y no calificada. Esto se debe ciertamente al creciente impacto sobre los ecosistemas y los recursos naturales en general.⁴²

2.5 Marco Legal y Normativo

2.5.1 Leyes, Decretos y Resoluciones Aplicables

En la siguiente tabla se describe el marco legal que se ha creado en base a estudios medio ambientales en materia de calidad de aire e impacto ambiental

Tabla 4 Marco Legal de Medio Ambiente

MARCO LEGAL		
NORMA	ENTIDAD QUE LA EXPIDE	OBSERVACIONES
Ley 99 de 1993	Congreso de Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público Congreso de Colombia encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
Resolución 601 de 2006	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

⁴² Jairciño Páez Claro.



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL

Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Resolución de 909 de 2008	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1299 de 2008	El presidente de la república de Colombia	Por el cual se reglamenta el departamento de gestión ambiental de las empresas a nivel industrial y se dictan otras disposiciones
Resolución 610 de 2010	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se modifican la Resolución 601 del 4 de abril de 2006
Resolución 650 de 2010	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se adopta el protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire
Resolución 760 de 2010	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se adopta el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas
Resolución 935 de 2011	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales - IDEAM	Por la cual se establecen los métodos para la evaluación de emisiones contaminantes por fuentes fijas y se determina el número de pruebas o corridas para la medición de contaminantes en fuentes fijas
Resolución 6982 de 2011	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire
		Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



Resolución 2254 de 2017	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional para garantizar un ambiente sano y minimizar riesgo sobre la salud humana
----------------------------	---	--

Fuente: Gobierno de Colombia

2.5.2 Límites Permisibles de Contaminantes Para Empresas de Fabricación de Ladrillos

En la resolución 2254 de 2017 se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, con el objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera. En la siguiente tabla, se pueden observar los niveles permisibles y las condiciones de referencia de cada uno de ellos. Adicionalmente, se establecen también los niveles permisibles que se regirán a partir del 1 de enero de 2018:

Tabla 5 Niveles Maximos Permisibles De Contamianates Criterio En El Aire

NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMIANATES CRITERIO EN EL AIRE		
CONTAMINANTE	NIVEL MAXIMO PERMISIBLE (mg/m3)	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
PM ₁₀	50	Anual
	75	24 horas
PM ₂₅	25	Anual
	37	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 horas
NO ₂	60	Anual
	200	1 horas
O ₃	100	8 horas



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



CO	5.000	8 horas
	35.000	1 horas

Fuente: Gobierno de Colombia – Resolución 2254 de 2017

Tabla 6 Niveles Maximos Permisibles De Contaminantes En El Aire Para El 2030

NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN EL AIRE PARA EL 2030		
CONTAMINANTE	NIVEL MAXIMO PERMISIBLE (mg/m3)	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
PM ₁₀	30	Anual
PM ₂₅	15	Anual
SO ₂	20	24 horas
NO ₂	40	Anual

Fuente: Gobierno de Colombia – Resolución 2254 de 2017

2.6 Riesgos y Precauciones de Manipulación de Precipitadores Electrostáticos

Dado que el precipitador electrostático funciona con alto voltaje, se debe tener mucho cuidado durante el mantenimiento y la inspección para evitar descargas eléctricas. Cuando se prueban equipos en interiores, existe el riesgo de exposición a gases tóxicos, especialmente ozono y óxidos de azufre. Otros peligros potenciales incluyen la activación del sistema de vibración durante la inspección, quemaduras por el contacto con la superficie caliente de la carcasa, inflamación de los ojos y daño respiratorio por la inhalación de partículas. Tendiendo a ser los siguientes riesgos los más asociados a precipitadores electrostáticos.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



2.6.1 Riesgo de choque eléctrico

El choque eléctrico al operador del precipitador electrostático ocurre debido al daño, mal uso o mal funcionamiento de los componentes del equipo y puede provocar accidentes tales como: choque por contacto, quemaduras en la piel, incluso la muerte por imposibilidad de extracción. cable de alta tensión.

2.6.2 Riesgo por Manejo de Gases Tóxicos

Entre los gases comúnmente tratados en los filtros de precipitación electrostática se encuentran el dióxido de azufre y el trióxido de azufre. El trióxido de azufre se puede mezclar con agua para formar una neblina de ácido sulfúrico altamente corrosiva y peligrosa. Por otro lado, las concentraciones de dióxido de azufre superiores a 5 ppm provocan irritación respiratoria y una respuesta constrictiva.

En el caso del ozono, el cuerpo humano es muy sensible a este gas, provocando irritación nasofaríngea a concentraciones en torno a 0,3 ppm, y daño pulmonar más grave a concentraciones superiores a 1 ppm.

2.6.3 Precauciones de Manipulación de Precipitadores electrostáticos

El ministerio de protección de la social en consideración de que el trabajo, en todas sus modalidades, goza de la especial protección del Estado y que toda persona tiene derecho a un trabajo en condiciones dignas y justas dando prioridad a la protección del trabajador que se encuentre expuesto a circunstancias extremas o peligrosas crea la resolución 1348 de 2009 en la cual en su artículo número 36, expone las diversas precauciones que se tienen que tener en cuenta en el manejo o manipulación de precipitadores electrostáticos.

Tabla 7 Medidas Preventivas en el Manejo de Precipitadores Electrostáticos

-
- a). No se debe entrar al precipitador sin previamente haber puesto en consignación y seguridad este equipo o la celda que se inspeccionará. Se debe medir las condiciones ambientales y cumplir el procedimiento para trabajos en espacios confinados.
-



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



- b). Debe mantenerse cerradas las puertas del cuarto superior del precipitador.
- c). Nunca se debe entrar si no se tienen des energizados los martillos golpeadores correspondientes a las celdas que se inspeccionen.
- d). Nunca debe darse mantenimiento a un transmisor si no se tiene fuera de servicio esa línea de transporte.
- f). No se deben acercar a los transformadores cuando el ambiente se encuentre húmedo; en caso necesario, se tomarán todas las precauciones posibles.
- g). Nunca se debe abrir la válvula de descarga de un transmisor cuando la presión de los mismos exceda de lo normal; es preferible abrir manualmente la válvula de seguridad para disminuir dicha presión y hasta entonces operar la válvula de descarga o evacuación.
- h). Nunca se debe evacuar un transmisor si hay fugas en la línea de evacuación y se está realizando una descarga de emergencia en el sitio de transferencia.
- i). Al inspeccionar un transmisor, se debe supervisar previamente que esté cerrada la válvula manual antes de la válvula de presurización, evitando el paso de aire en caso de que este último no selle bien.
- j). Nunca debe dejarse abierto el registro cuando se termine una reparación.

Fuente: Resolución 1348 de 2009 Ministerio de la Protección Social – Artículo 36



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



3. CAPÍTULO III: CRITERIOS DE DISEÑO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

3.1 Metodología de Diseño del Precipitador Electrostático

El enfoque del diseño está en reducir la cantidad de material particulado que procede del proceso de los hornos de cocción del ladrillo esperando que su porcentaje mínimo de reducción de gas contaminado sea del 70% utilizando un PES (Precipitador electrostático de sólidos).

3.1.1 Teoría de la Precipitación Electrostática

Para la precipitación electrostática hace necesario la contribución de diversas ramas científicas que permitan implementar con el correcto funcionamiento, constituyendo así un sistema estático donde su trabajo será ionizar las partículas de gas para cargarlas eléctricamente y de esta forma forzarlas a ir hacia placas de recolección. Su funcionamiento ideal dependerá de factores como: punto de operación eléctrico, carga de las partículas, eficiencia de recolección, velocidad de migración de las partículas ionizadas, entre otros factores.

3.1.2 Punto de Operación Eléctrico

Para la obtención de la magnitud del voltaje que se debe generar se debe tener en cuenta el valor mínimo para la formación de la corona de descarga, es decir, la descarga eléctrica en la que se produce la carga o ionización de las partículas. El valor máximo de voltaje se determina según los elementos con los que se estén conformando la sección de descarga, el voltaje de corriente alterna que se esté usando, y en especial según el amperaje que puedan soportar los electrodos. Para alambres redondos, los cuales son los usualmente utilizados en los sistemas de precipitación electrostática, el campo generado en la superficie del alambre está dado por la siguiente ecuación, la cual calcula aproximadamente el voltaje más alto en los electrodos de descarga:



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Fuerza del campo eléctrico: con la siguiente ecuación se logra calcular la fuerza del campo eléctrico para un cable o un cilindro, en este caso para el filtro de precipitación.

Ecuación 1 Fuerza del Campo Eléctrico

$$E_{ps} = \frac{V}{r_w}$$

E_{ps}	Fuerza del campo eléctrico [V/m].
r_w	Radio del electrodo de descarga [m].
V	Voltaje [V].

Densidad relativa del aire: La densidad relativa del aire afecta la descarga de corona que se va a generar, estas dos son inversamente proporcionales, lo que significa que a una mayor densidad del aire menor será la fuerza del campo eléctrico necesaria para generar la corona, y viceversa

Ecuación 2 Densidad Relativa del Aire

$$\delta = \frac{298}{T + 273} \times P_a$$

δ	Densidad relativa del aire [Adimensional].
T	Temperatura del gas [°C].
P_a	Presión Atmosférica [Atm].

Potencial eléctrico de acuerdo con la ley de Peek: para generar una descarga de corona. Esta ecuación se utiliza para conocer, dependiendo del diámetro de los alambres de admisión y la densidad del aire relativa, cuánto debe ser el potencial eléctrico para desencadenar una descarga de corona entre dos cables o también funcionando para tubos



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



Ecuación 3 Potencial Eléctrico

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

E_c	Potencial Eléctrico [V/m].
r_w	Radio del electrodo de descarga [m].
δ	Densidad relativa del aire [Adimensional].

Voltaje de Formación de la Corona: Obteniendo el valor del campo eléctrico que atraviesa la sección del alambre se hace posible calcular la magnitud del voltaje que se debe aplicar al alambre para obtener el valor del campo eléctrico, “aunque este es un valor de referencia, pues este efecto corona se puede producir con un campo de 0.6 veces el valor de V_c ”⁴³. El cual puede calcularse con la siguiente ecuación:

Ecuación 4 Voltaje de Formación de la Corona de Descarga

$$V_c = E_c r_w \ln \left(\frac{d}{r_w} \right)$$

V_c	Voltaje de formación de la corona [V/m].
d	4/B x (Separación placa-alambre) para PES de placa-alambre [m].

Viscosidad del gas: esta varía dependiendo de la temperatura de los gases a la salida del escape, a mayor temperatura, mayor es la viscosidad de estos y es necesaria para el cálculo del camino libre medio de la partícula.

⁴³ HERNÁNDEZ and RINCÓN.



Ecuación 5 Viscosidad del Gas

$$\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \left(\frac{T(K)}{273.15} \right)^{1.5} \left(\frac{273.15 + 110.56}{T(K) + 110.56} \right)$$

μ Viscosidad del gas [V/m].
 $T(K)$ Temperatura del gas [K]

Camino libre medio: este es la distancia promedio recorrida por una partícula en movimiento entre colisiones sucesivas, esta permite calcular el factor Cunningham, que se muestra más adelante, necesario para conocer la velocidad de migración de estas.

Ecuación 6 Camino Libre Medio

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi}{8}} * \frac{\mu}{u} * \frac{1}{\sqrt{\rho P}}$$

λ_p Camino libre medio [m].
 μ Viscosidad del gas [V/m].
 u Factor numérico [0.4987445][Constante].
 ρ Densidad del aire [kg/m³].
 P Presión del aire a la salida del sistema [Pa].

Número de Knudsen: es un número adimensional definido como la relación de la longitud de la ruta libre media molecular a una escala de longitud física representativa, esta puede ser el radio de un cuerpo, por ejemplo. Esta depende del tamaño de la partícula que va a atravesar el cuerpo.



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Ecuación 7 Número de Knudsen

$$K_n = \frac{2\lambda_p}{d_p}$$

K_n Número de Knudsen [Adimensional].
 d_p Diámetro de la partícula [m].

Factor de corrección de deslizamiento de Cunningham: el factor de corrección de deslizamiento de Cunningham permite predecir la fuerza de arrastre sobre una partícula que mueve un fluido con número Knudsen entre el régimen continuo y el flujo molecular libre

Ecuación 8 Factor de Corrección de Deslizamiento de Cunningham

$$C_u = 1 + K_n \left[A + B * e^{-\left(\frac{C}{K_n}\right)} \right]$$

C_u Factor de corrección de deslizamiento de Cunningham [Adimensional].
 A 1.252 [Constante].
 B 0.399 [Constante].
 C 1.1 [Constante].

Ecuación de Cochet: con ayuda de esta ecuación se puede describir la carga del campo, lo que se traduce en la carga final de las partículas, y se define en función del diámetro de las partículas de la siguiente manera



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Ecuación 9 Cochet

$$q_p = \left[(1 + K_n)^2 + \left(\frac{2}{1 + K_n} \right) * \left(\frac{3 - 1}{3 + 1} \right) \right] \pi * \varepsilon_0 * (d_p)^2 * (E_{ps})$$

q_p	Cochet [C].
ε_0	Constante dieléctrica del espacio libre [8.854x10 ⁻¹² V/m][Constante].
ε_R	Permisividad relativa del gas [Constante].

Velocidad de migración de las partículas: como ya se mencionó anteriormente, la velocidad de migración representa la capacidad de recolección de la partícula dentro de los límites de un precipitador electrostático (ESP) específico.

Ecuación 10 Velocidad de Migración de las Partículas

$$\omega_e = \frac{q_p * E_{ps} * C_u}{3\pi * \mu * d_p}$$

ω_e	Velocidad de migración [V/m].
d_p	Diámetro de la partícula [m].

3.2 Criterios de Diseño del Precipitador Electrostático

El diseño del sistema de precipitación electrostática estará dividido en 3 etapas del proceso dividiéndose estas en:

- Entrada del gas procedente de la fabricación del ladrillo
- Precipitación electrostática o purificación del gas entrante.
- Recolección del material particulado.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



A este diseño también se le atribuyen elementos de instrumentación para la medición del material particulado y sistema de conexión eléctrica para la alimentación de los electrodos de descarga y placas colectoras

3.2.1 Criterios de Diseño de la Carcasa

Dentro de los criterios necesarios para elaborar el diseño de la carcasa del prototipo de precipitador electrostático fue necesario como primera medida conocer o evaluar el terreno, es decir, conocer el área de trabajo permisible para no sobredimensionar el diseño, conocer que volumen ocupará esto debido a que la carcasa es la parte que más espacio ocupa ya que esta es la encargada de conllevar todos los elementos del precipitador, aparte de ser la que soporta todas las perturbaciones y procesos internos y externo, en base a esto se establecen unos parámetros que se debe cumplir el diseño de la carcasa:

- Volumen de Diseño: La carcasa del precipitador electrostático constará con un volumen de trabajo de 2 metros máximo de largo, 0.6 metros máximos de altura y 0.6 metros máximo de ancho. Este espacio de trabajo se adapta para incluir tres etapas de electrodos de descarga y placas colectoras, sistema de golpeteo para las placas colectoras, aisladores para los electrodos de descarga, entre otros.
- Resistencia Térmica: La carcasa del precipitador electrostático debe ser de un material resistente a la temperatura ya que el gas procedente de la fabricación del ladrillo tiende a salir con una temperatura entre 300°C y 350°C.
- Resistencia Mecánica: El material será seleccionado para que sea mecánicamente resistente a los esfuerzos ya que este debe soportar todo el peso de materiales como: aisladores, electrodos de descarga, placas colectoras, sistema de golpeteo.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



3.2.2 Criterios de Diseño de Electrodo de Descarga y Placas Colectoras

Dentro de los criterios necesarios para diseñar las placas colectoras y electrodos de descarga es importante primeramente analizar el volumen interno de la carcasa ya que este va a ser espacio de trabajo.

- Separación de las Placas y Electrodo: El diseño constará con una separación entre electrodo de descarga y placa colectora calculada para que permita la formación del efecto corona.
- Resistencia Térmica: Los electrodos de descarga y placas colectoras serán de un material resistente a la temperatura esto debido a que el gas procedente de la fabricación del ladrillo tiene contacto directo con el sistema de precipitación electrostática.
- Resistencia Eléctrica: El material será seleccionado para que pueda resistir una tensión de 10Kv procedentes del sistema Flyback

3.2.3 Criterios de Diseño de Tolvas de Descarga

En los criterios necesarios para el diseño de las tolvas de descarga o tolvas de recolección de material particulado es importante constatar que el diseño dispuesto para el precipitador electrostático se hace partícipes 3 etapas de precipitación o purificación del humo, por ende, se tienen que diseñar 3 tolvas de descarga para la recolección por separado del material particulado y la visualización de la cantidad de material particulado que se recoge en cada etapa.

- Ángulo de Diseño: Para una mejor fluidez en la recolección del material particulado se diseñará una tolva que cuente con 60° de ángulo de inclinación, esto permitirá que el material particulado tenga mayor deslice provocando que el material particulado no obstaculice y obstruya el nuevo material entrante
- Resistencia Térmica del Material: El material particulado después de su precipitación caerá a las tolvas de recolección con una temperatura entre 300°C a 350°C lo cual indica que el material donde se recolecte o almacene

momentáneamente este tiene que ser diseñado a partir de uno que pueda resistir dicha temperatura

3.3 Selección de Materiales

Para la elaboración de este proyecto se deben seleccionar materiales de construcción que estén acordes a los criterios de diseño especificados en el inciso anterior debido a que el prototipo debe contar con características de resistencia mecánica, térmica y eléctrica. También debe contar con un dispositivo medidor independiente que permita el pesaje del material particulado recolectado.

3.3.1 Descripción de Materiales para la Construcción de Carcasa, Tolvas, Embudos de entrada y Salida y Pantalla de distribución

- Acero inoxidable (AISI 304): Acero inoxidable austenítico, aleado con cromo, níquel y bajo contenido de carbono que presenta una buena resistencia a la corrosión. No se manchan, corroen ni oxidan tan fácilmente como los que están hechos de acero al carbono normal. Además, presentan una alta resistencia a la corrosión, a los golpes. Idealmente para trabajo al aire libre con temperaturas a temperaturas inferiores a 1150°C.

Figura 15 Lamina de Acero Inoxidable (AISI 304)

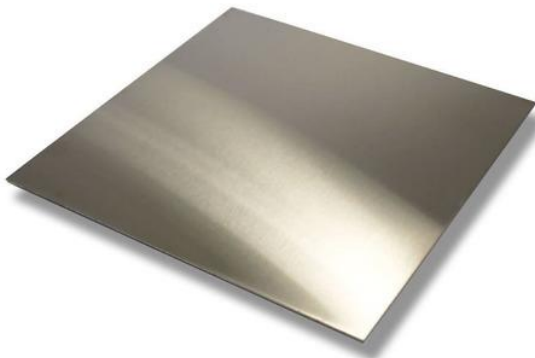


Tabla 8 Propiedades del Acero Inoxidable 304

Propiedades Eléctricas	
Resistividad Eléctrica ($\mu\Omega\text{m}$)	0.72 – 0.73
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm^3)	7.93
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1400 - 1455
Propiedades Mecánicas	
Alargamiento (%)	≥ 45
Módulo de Elasticidad (GPa)	190 - 210
Resistencia a la Tracción (MPa)	460
Propiedades Térmicas	
Coefficiente de Expansión Térmica 20 – 100 $^{\circ}\text{C}$ ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	18.0
Conductividad Térmica a 23 $^{\circ}\text{C}$ ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	16.3

Fuente: Autor

- Acero ASTM A36: Las capacidades de este material lo hacen fuerte en varios aspectos. Según las propiedades físicas, los aspectos que determinan el uso del Acero A 36 son: mecánico, químico y térmico.

Mecánico: Alta resistencia física, tiene alta flexibilidad. Tiene buenas propiedades de fusión, lo que permite la formación de metales y la soldabilidad sin la formación de defectos.

Térmico: La capacidad de transferencia de calor garantiza que el acero sea capaz de transferir electricidad o calor en el rango operativo de 500 $^{\circ}\text{C}$ a 650 $^{\circ}\text{C}$.

Debido a que el A36 tiene una composición simple, es muy fácil de soldar y mantiene su resistencia eléctrica máxima hasta los 343 $^{\circ}\text{C}$.

Figura 16 Lamina ASTM A-36

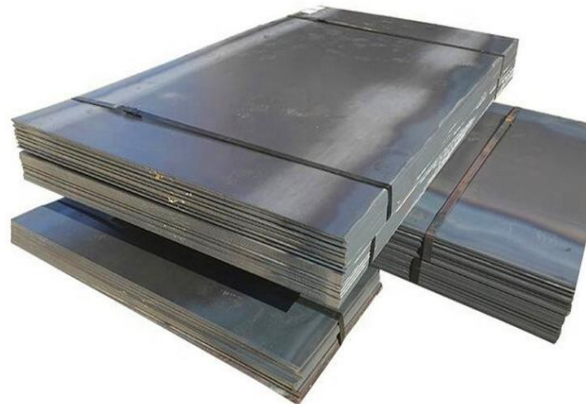


Tabla 9 Propiedades del Acero ASTM A36

Propiedades Eléctricas	
Resistividad Eléctrica ($\mu\Omega\text{m}$)	20
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm^3)	7.85
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1050 - 1200
Propiedades Mecánicas	
Alargamiento (%)	≥ 20
Módulo de Elasticidad (GPa)	200
Resistencia a la Tracción (MPa)	400 - 550
Propiedades Térmicas	
Coefficiente de Expansión Térmica 20 – 100 $^{\circ}\text{C}$ ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	11.7
Conductividad Térmica a 23 $^{\circ}\text{C}$ ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	0.018

Fuente: Autor

- Acero Carbono (SAE 1045): Es un acero de medio carbono ampliamente utilizado en elementos estructurales que requieren resistencia mecánica media y tenacidad a bajo costo, fácil de conformar a temperaturas de 980 $^{\circ}\text{C}$

a 1230°C. Se utiliza para todo tipo de piezas que requieren rigidez y resistencia, como ejes, bielas, llaves, pernos, tuercas, cadenas, engranajes de baja velocidad, pasadores, acoplamientos, bielas, pestillo, cigüeñal y piezas estampadas.

Figura 17 Acero Carbono SAE-1045

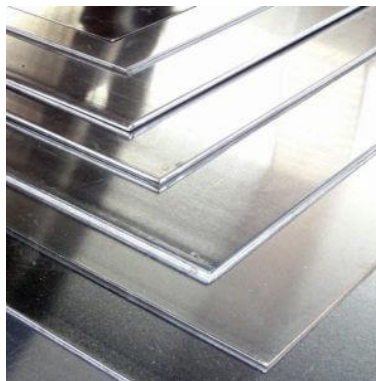


Tabla 10 Propiedades del Acero Carbono SAE-1045

Propiedades Eléctricas	
Resistividad Eléctrica ($\mu\Omega\text{m}$)	22.3
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm^3)	7.85
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1425 - 1538
Propiedades Mecánicas	
Alargamiento (%)	≥ 16
Módulo de Elasticidad (GPa)	200
Resistencia a la Tracción (MPa)	565
Propiedades Térmicas	
Coefficiente de Expansión Térmica 20 – 400°C ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	13.7
Conductividad Térmica a 23°C ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	52

Fuente: Autor

3.3.1.1 Ponderación de Materiales Seleccionados

Tabla 11 Tabla de Ponderacion de Carcasa, Tolva y Embudo de Entrada y Salida

Características	%	AISI 304	ASTM A36	SAE 1045
Resistencia Mecánica (MPa)	30%	460	400 - 550	565
Calificación		9	10	10
Resistencia Térmica	30%	925°C.	500°C y 650°C	980°C y 1230°C
Calificación		10	10	10
Resistencia Eléctrica ($\mu\Omega\text{m}$)	10%	72 - 73 $\mu\Omega\text{m}$	20 $\mu\Omega\text{m}$	22.3 $\mu\Omega\text{m}$
Calificación		5	10	9
Facilidad de Obtención	30%	Regional	Regional	Regional
Calificación		10	10	10
TOTAL		9.2	10	9.45

Fuente: Autor

3.3.2 Descripción de Materiales para la Construcción de Electrodo de Descarga y Placas Colectoras

- Acero inoxidable (AISI 304): Acero inoxidable austenítico, aleado con cromo, níquel y bajo contenido de carbono que presenta una buena resistencia a la corrosión. No se manchan, corroen ni oxidan tan fácilmente como los que están hechos de acero al carbono normal. Además, presentan una alta resistencia a la corrosión, a los golpes. Idealmente para trabajo al aire libre con temperaturas a temperaturas inferiores a 1150°C.

Figura 18 Lamina de Acero Inoxidable (AISI 304)

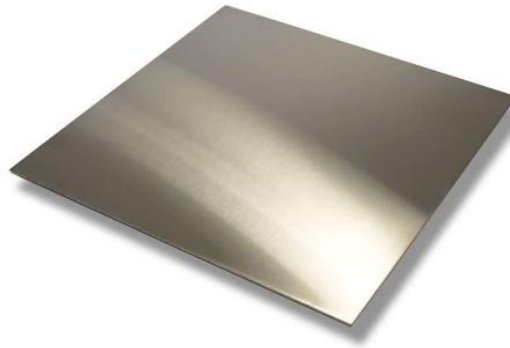


Tabla 12 Propiedades del Acero Inoxidable 304

Propiedades Eléctricas	
Resistividad Eléctrica ($\mu\Omega\text{m}$)	0.72 – 0.73
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm^3)	7.93
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1400 - 1455
Propiedades Mecánicas	
Alargamiento (%)	≥ 45
Módulo de Elasticidad (GPa)	190 - 210
Resistencia a la Tracción (MPa)	460 - 1100
Propiedades Térmicas	
Coeficiente de Expansión Térmica 20 – 100 $^{\circ}\text{C}$ ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	18.0
Conductividad Térmica a 23 $^{\circ}\text{C}$ (W/m·K)	16.3

Fuente: Autor

- Aluminio (Alambre de Aleación de Aluminio): en cuanto a resistencia mecánica de muchas de sus aleaciones, su alta conductividad térmica y eléctrica, su durabilidad (el aluminio es estable al aire) y resistencia a la corrosión hacen de este material ideal para innumerables soluciones, tanto

estructurales, como decorativas o de otra índole. Por otro lado, se maneja en un rango de temperatura entre inferiores a 160°C.

Tabla 13 Propiedades Alambre de Aluminio

Propiedades Eléctricas	
Resistividad Eléctrica ($\mu\Omega\text{m}$)	0.028
Conductividad Eléctrica (S/m)	37.8×10^6
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm^3)	2.70
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	660
Propiedades Mecánicas	
Alargamiento (%)	≥ 16
Módulo de Elasticidad (GPa)	70
Resistencia a la Tracción (MPa)	70
Propiedades Térmicas	
Coeficiente de Expansión Térmica 20 – 400°C ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	13.7
Conductividad Térmica ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	209 - 230

Fuente: Autor

- Acero Inoxidable (AISI 316L): Es un acero inoxidable austenítico de alta aleación y bajo carbono con una buena resistencia a la corrosión general, buena soldabilidad y excelente formabilidad. Puede usarse en el rango de temperatura entre -60°C a 400°C.

Tabla 14 Propiedades del Alambre de Acero Inoxidable (AISI-316L)

Propiedades Eléctricas	
Resistividad Eléctrica ($\mu\Omega\text{m}$)	0.925
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm^3)	7.98



Punto de Fusión (°C) 1370 - 1400

Propiedades Mecánicas

Alargamiento (%)	≥ 45
Módulo de Elasticidad (GPa)	193
Resistencia a la Tracción (MPa)	90

Propiedades Térmicas

Coeficiente de Expansión Térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	15.4
Conductividad Térmica (W/m·K)	12.3

Fuente: Autor

3.3.2.1 Ponderación de los Materiales Seleccionados

Tabla 15 Tabla de Ponderación de Electrodo de Descarga y Sistema Colector

Características	%	Acero Inox. 304	Alambre Aluminio	Acero Inox. 316L
Resistencia Mecánica (MPa)	20%	460	70	90
Calificación		10	5	7
Resistencia Térmica	30%	< 1150°C.	160°C	-60°C a 400°C.
Calificación		10	4	6
Resistencia Eléctrica	30%	0.72 – 0.73 $\mu\Omega\text{m}$	0.028 $\mu\Omega\text{m}$	0.925 $\mu\Omega\text{m}$
Calificación		8	10	5
	20%	Regional	Regional	Nacional
Calificación		10	10	5
TOTAL		9.4	7.2	5.7

Fuente: Autor



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

3.3.3 Descripción de Materiales de Sistema de Golpeteo

3.3.4 Descripción de Materiales de Aisladores Electrostáticos

Aislador de Soporte Barra (AB – 76): Es un aislador de soporte como se observa en la figura 18, es un aislador de materiales eléctricos con óptima capacidad de aislamiento que pueden emplearse para resistencia mecánica y/o como elemento espaciador y/o de rigidez de un sistema formado por barras conductoras. La temperatura máxima a la que puede trabajar es de 140°C y el voltaje máximo que soporta es 40kV para un aislador de barra tipo AB – 76.

Figura 19 Aisladore de Soporte de Barraje

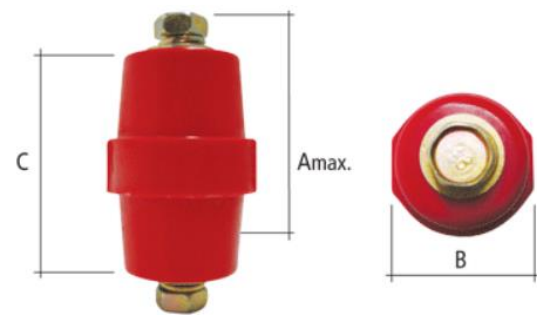


Tabla 16 Dimensiones de Aisladores de Barraje

CODIGO	A (mm)	B (mm)	C (mm)
AB – 30	57	33	30
AB – 40	70	38	40
AB – 51	80	40	51
AB – 76	110	50	76

Fuente: Autor

Aislador de Porcelana: El aislador de porcelana como se observa en la Figura 20, consiste en un aislador eléctrico fabricado en porcelana para que de esta forma pueda adquirir una mejor resistencia a la temperatura, su funcionamiento consiste en la suspensión de los electrodos de descarga y colección mediante un tornillo de

con acabado de bronce anclados a los soportes que sostienen los marcos colectores y de descarga con la finalidad de que pueda distribuir la electricidad a estos.

Figura 20 Aislador de Porcelana



Aislador Cónico de Soporte: Se utiliza como aislante y sellador de alta tensión, a través del cual la suspensión del electrodo de descarga ingresa al campo eléctrico en EPS, y en EPS pequeños también actúa como soporte para el sistema de paletas. Dependiendo de la configuración, se divide en tres tipos: aisladores cilíndricos, aisladores cónicos y aisladores de formas especiales.

El aislador cónico de soporte tiene una resistencia térmica debido a que es de un material cerámico, también, cuenta con una resistencia a los esfuerzos que le permite soportar grandes cargas mayores a 500kN

Figura 21 Aislador Cónico de Soporte Electrostático



3.3.4.1 Ponderación de Materiales Seleccionados

Tabla 17 Ponderación de Aisladores

Características	%	Aislador de Soporte de Barraje	Aislador de Porcelana	Aislador Cónico de Soporte
Tamaño Aislador	10%	110	89	80
Calificación		6	8	10
Resistencia Térmica	30%	< 200°C.	< 160°C	< 350°C.
Calificación		5	3	10
Resistencia Eléctrica	30%	< 25kV	< 11kV	< 72kV
Calificación		10	10	10
Facilidad de Obtención	20%	Regional	Regional	Nacional
Calificación		10	10	5
TOTAL		7.1	6.7	8.0

Fuente: Autor

3.4 Selección de Materiales Adicionales

3.4.1 Selección de Elementos de Pesaje

Celda de Carga 50Kg: Este modelo de celda de carga soporta hasta 50kg de peso, consiste en una barra de aluminio con agujeros roscados para montaje y 4 galgas extensiométricas unidas a la barra. Entrega 4 cables de salida que funcionan como un puente Wheatstone. Este se conecta mediante un transmisor HX711 el cual está especialmente diseñado para trabajar con celdas de carga de este tipo y ofrecer una salida digital para ser leída por el microcontrolador.

Figura 22 Celda de Carga 50Kg



Entre sus características principales se encuentran las siguientes:

Capacidad máxima: 50 Kg

Salida: 2.0 ± 0.15 MV/V

Voltaje de excitación: 10-15V

Temperatura de trabajo compensada: -10°C a 40°C

Temperatura de operación: -35°C a 80°C

Salida: 4 cables (puente wheatstone)

Dimensiones: 13cm x 3cm x 2.2cm

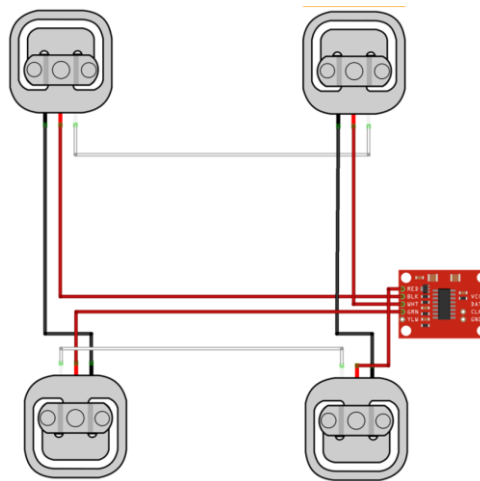
Agujeros (4): D4mm

Material: Aluminio

Balanza de carga de 50Kg: Esta configuración de celda de carga resistiva ideal para poder medir variaciones sobre presión en una superficie o como simple transductor para medir un peso de algún elemento en contacto con el dispositivo. Consiste en una configuración serie de 4 sensores de peso ubicados inmóvil bajo una base que se encarga de distribuir uniformemente el peso formando un sensor de carga tipo

balanza, al igual que cualquier celda de carga este se encarga de convertir la fuerza en una señal eléctrica haciendo así que el peso de un objeto sea correspondiente a un determinado voltaje

Figura 23 Balanza de Carga de 50Kg



- Voltaje de operación DC: 3V ~ 10V
- Capacidad Máxima: 50 Kg
- Sensibilidad de salida: $1.0 \pm 0.1 \text{ mv} / \text{v}$
- Resistencia de entrada: $1000 \Omega \pm 20$
- Resistencia de salida: $1000 \Omega \pm 20$
- Temperatura de funcionamiento: $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$
- Medidas: 3.4cm x 3.4cm x 0.78cm

Celda de Carga Tipo Viga de 100Kg: Este modelo de celda de carga soporta hasta 100kg de peso, consiste en una barra de aluminio con 2 agujeros superiores y 2 agujeros inferiores roscados para montaje y 4 galgas extensiométricas unidas a la barra. Entrega 4 cables de salida que funcionan como un puente Wheatstone. Al igual que cualquier celda de carga este se encarga de convertir la fuerza en una señal eléctrica haciendo así que el peso de un objeto sea correspondiente a un determinado voltaje

Figura 24 Celda de Carga Tipo Viga 100Kg



- Capacidad máxima: 100 Kg
- Salida: 2.0 ± 0.002 MV/V
- Voltaje de excitación: 5 – 12 (AC o DC)
- Temperatura de trabajo compensada: -10°C a 40°C
- Temperatura de operación: -30°C a 70°C
- Salida: 4 cables
- Dimensiones: 13cm x 3cm x 2.2cm
- Material: Aluminio

3.4.1.1 Ponderación de Materiales Seleccionados

Características	%	Celda de carga 50Kg	Balanza de peso 50Kg	Celda de Carga Tipo Viga 100Kg
Capacidad de Carga	25%	50Kg	50Kg	100Kg
Calificación		8	8	10
Voltaje de Alimentación	25%	10 –15V	3V – 10V	5V – 12V
Calificación		10	8	8
Resistencia Térmica	25%	-10°C a 40°C	0 °C a 50°C	-30°C a 70°C.
Calificación		7	8	10
Configuración física	5%	Sencilla	Compleja	Sencilla
Calificación		10	1	10
Dispositivo Amplificador	15%	HX711	HX711	HX711
Calificación		10	10	10
TOTAL		8.25	7.55	9

Fuente: Autor

3.4.2 Caja de Circuitería

Se utilizará una caja de derivación Dexson para contener la circuitería debido a que cuenta con el espacio suficiente para albergar la circuitería, de dimensiones:

- Largo: 25cm
- Ancho: 20cm
- Alto: 10cm

Figura 25 Caja de Derivación Desxon



3.4.3 Rodamientos

Se utilizarán rodamientos acoplados a la carcasa del precipitador electrostático que permitirán el rodamiento y aislamiento para el sistema de golpeteo, también contando con la resistencia térmica de estos al poder soportar temperaturas mayores o iguales a 300°C

Figura 26 Rodamiento ENC330°



3.4.4 Flyback

Se utilizará un transformador flyback de 10kV previamente adquirido y establecido en las bases del proyecto con el cual se pretende alimentar las placas colectoras y los electrodos de descarga, acoplando previamente a este un circuito para generar tensión de alta frecuencia

Figura 27 Flyback TYF-10K



3.4.4.1 Circuitería Principal Pre-Flyback

Regulador LM317T: Es un regulador de voltaje lineal ajustable en condiciones normales que puede proporcionar una salida de 1.2 a 37 V y una corriente de 1.5 A. Tiene tres contactos: ajuste (ADJ), entrada (IN) y salida (OUT).

Figura 28 Regulador de Voltaje LM317T



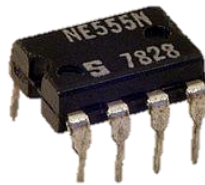
Regulador LM7805: es un circuito integrado cuyo propósito es mantener un voltaje constante de 5V a través de su contacto de salida, independientemente del voltaje aplicado a su contacto de entrada.

Figura 29 Regulador de voltaje LM7805



NE555 Astable: Es un circuito integrado muy estable cuya función principal es generar pulsos de reloj de alta precisión, también puede actuar como oscilador de frecuencia.

Figura 30 Circuito Integrado NE555



Transformador 15v: elemento eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.

Figura 31 Transformador 15v



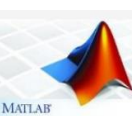
Mosfet IRFP540: es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas.

Figura 32 Mosfet IRFP540



3.4.5 Selección de Software para la Interfaz Gráfica

Tabla 18 Selección de Software para la Interfaz de Usuario

Características	Subcaracterísticas	Máximo puntaje	Processing 	Matlab 	OpenCV 
EFFECTIVIDAD	Efectividad	10	9	9	7
PRODUCTIVIDAD	Productividad	5	4	4	3
SEGUIRIDAD	Riesgo de Daño Económico	5	5	1	5
	Riesgo de Salud	5	5	5	5
	Riesgo Ambiental	5	5	5	5
SATISFACCIÓN	Cumplimiento del Propósito	10	9	9	8
	Confianza	5	4	4	3
	Placer	5	4	4	3
	Confort	5	3	3	3
	Flexibilidad	5	3	2	2
CONTEXTO DE USO	Cumplimiento de Contexto de uso	5	4	5	2
TOTAL		255	205	181	166

Fuente: Autor



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



4. CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA

4.1 Condiciones Generales

4.1.1 Descripción del Precipitador Electrostático

Como se vio en capítulos anteriores se habló acerca de los tipos de precipitadores electrostáticos y como estos dependiendo de la aplicación pueden ser más beneficiosos a el momento de contener el material particulado, los precipitadores electrostáticos placa - alambre son equipos de altos costos de operación, se requiere espacios bastante amplios, el consumo de energía es alta, los costos de mantenimiento son altos, por ende, los anteriores equipos colectores de material particulado incluyendo el precipitador electrostático tubular presenta muchos desventajas o equipos de precipitación electrostática placa plana paralela presentan un sobre coste innecesario.

4.1.2 Modo de Operación

El sistema de precipitación electrostática placa – alambre se instala en el interior de la carcasa, el humo proveniente del horno se conduce dentro de esta donde el material particulado queda ionizado por medio del electrodo de descarga, para luego migrar hacia la placa colectora. De forma intermitente un sistema de golpeteo que se ubica en la parte inferior de la carcasa en serie con la primera fase de precipitación golpea las placas colectoras y vuelve al material a las tolvas de recolección.



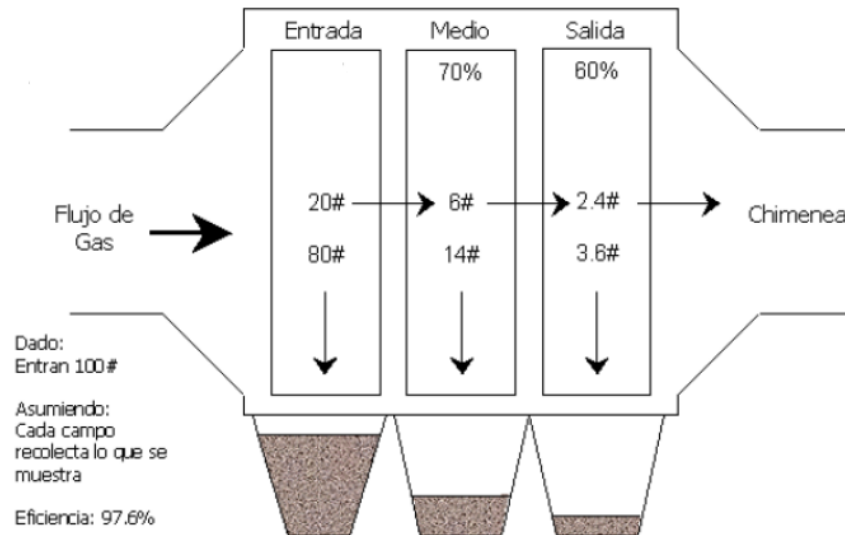
SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

Figura 33 Modo de Operación, Distribución de Material Particulado



Fuente: ⁴⁴

4.2 Cálculos del Precipitador Electrostático

Las ecuaciones mostradas anteriormente en el capítulo III, donde se sustentan las fórmulas de la teoría de precipitación electrostática, las cuales permiten conocer la eficiencia que un filtro puede tener cuando una partícula de un tamaño determinado pasa por él, también el voltaje de tensión y la distancia de separación de las placas colectoras y electrodos de descarga. A continuación, se presenta el proceso.

Fuerza del campo eléctrico. Ecuación 1.

$$E_{ps} = \frac{10000}{0.002} = 5000 \text{ kV/m}$$

La densidad relativa del gas a una temperatura de 300°C y 1 atmósfera de presión se encuentra mediante la Ecuación 2.

⁴⁴ Mamani.



$$\delta = \frac{298}{300 + 273} \times 1 = 0.52$$

La intensidad del campo eléctrico según la ley de Peek para generar una descarga de corona se obtiene mediante la Ecuación 3.

$$E_c = 3.126 \times 10^6 * 0.52 \left[1 + 0.0301 \left(\frac{0.52}{0.002} \right)^{0.5} \right] = 2414.46 \text{ kV/m}$$

Usando la Ecuación 4, para hallar el voltaje de formación de la descarga de corona

$$V_c = (2414.46 \times 10^3)(0.002) \ln \left(\frac{0.05}{0.002} \right) = 15.54 \times 10^3 \text{ kV/m}$$

$$V_c = (15.54 \times 10^3)(0.6) = 9.324 \times 10^3 \text{ kV/m}$$

Usando la Ecuación 5, Para hallar la viscosidad del gas a una temperatura absoluta de los 300°C de escape del gas

$$\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \left(\frac{573.15}{273.15} \right)^{1.5} \left(\frac{273.15 + 110.56}{573.15 + 110.56} \right) = 3.053 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

La distancia promedio que recorren las partículas en movimiento se calcula con la Ecuación 6

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi}{8}} * \frac{3.053 \times 10^{-5}}{0.4987445} * \frac{1}{\sqrt{(0.616 \times 101.325 \times 10^3)}} = 1.535 \times 10^{-7} \text{ m}$$

El número de Knudsen que escala la relación que existe entre la ruta libre y la molécula se calcula con la Ecuación 7.

$$K_n = \frac{2 * 1.088 \times 10^{-7}}{10 \times 10^{-6}} = 0.031$$

El factor de corrección de deslizamiento de Cunningham se calcula con la Ecuación 8.



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



$$C_u = 1 + 0.02176 \left[1.252 + 0.399 * e^{-\left(\frac{1.1}{0.02176}\right)} \right] = 1.038$$

Usando la ecuación de Cochet, Ecuación 9, se puede encontrar la carga que atraerá a la partícula que tiene un rango de tamaño de 10um.

$$q_p = \left[(1 + 0.02176)^2 + \left(\frac{2}{1 + 0.02176} \right) * \left(\frac{3 - 1}{3 + 1} \right) \right] (\pi * 8.854 \times 10^{-12} * (10 \times 10^{-6})^2 * (5000 \times 10^3)) = 5.626 \times 10^{-16}$$

Velocidad media de migración de las partículas cargadas se da por Ecuación 10.

$$\omega_e = \frac{(5.626 \times 10^{-16}) * (5000 \times 10^3) * (1.038)}{(3\pi) * (3.053 \times 10^{-5}) * (10 \times 10^{-6})} = 1.01 \text{ m/s}$$

4.3 Diseño CAD del Prototipo de Precipitación Electrostática

El precipitador electrostático se diseñó bajo unas especificaciones dadas por un espacio limitado, debido a que al ser un prototipo la empresa asignó un lugar donde este pueda ser fácilmente usado para probar su efectividad y su conexión a la entrada de muestra de gas pueda ser más fácil llevar acabo.

4.3.1 Carcasa

Se diseñó una carcasa que cumpliera con los requerimientos de medias mencionados anteriormente en los criterios de diseño. Cuenta con medidas y espacios acoplados para añadir diversas partes que complementan en sistema precipitador como lo pueden ser los embudos de entrada y salida, tolvas y huecos para aisladores de soporte como se puede observar en la Figura 34.



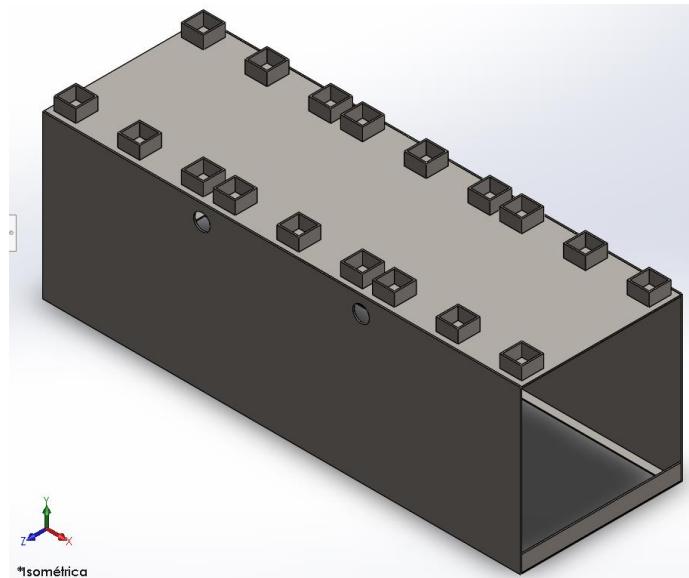
SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

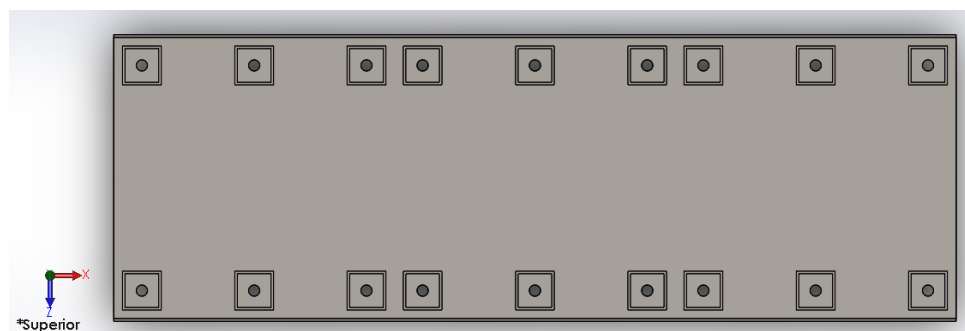
Figura 34 Vista Isométrica Carcasa



Fuente: Autor

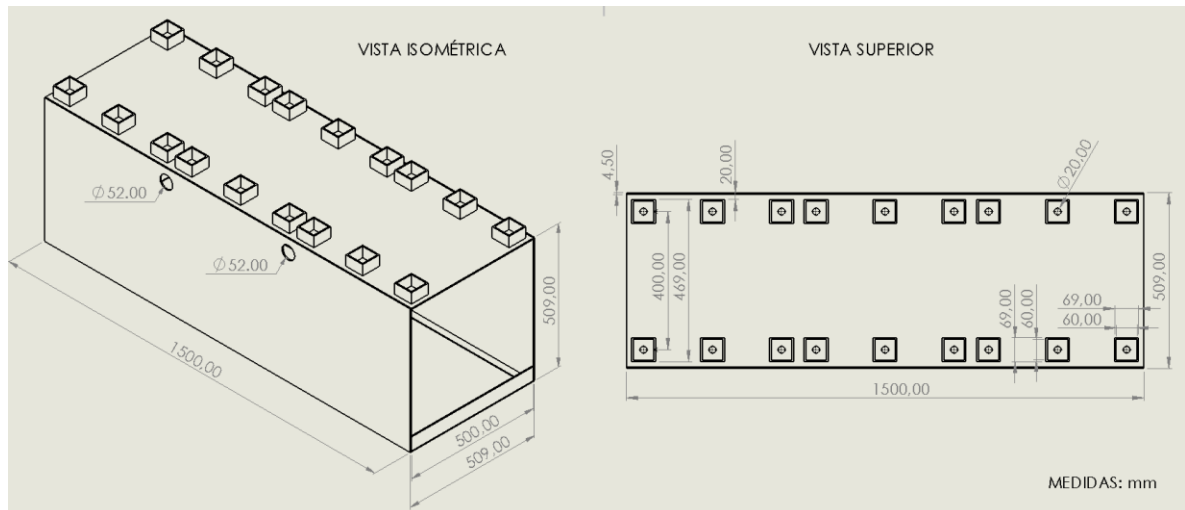
La parte superior de la carcasa del precipitador como se observa en la Figura 35, fue diseñada con el fin de poder posicionar aisladores que cargarán los electrodos de descarga y el sistema colector y estos huecos permitirán el ingreso de barras que conectarán y llevarán la tensión del flyback al interior de la carcasa

Figura 35 Vista Superior Carcasa



Fuente: Autor

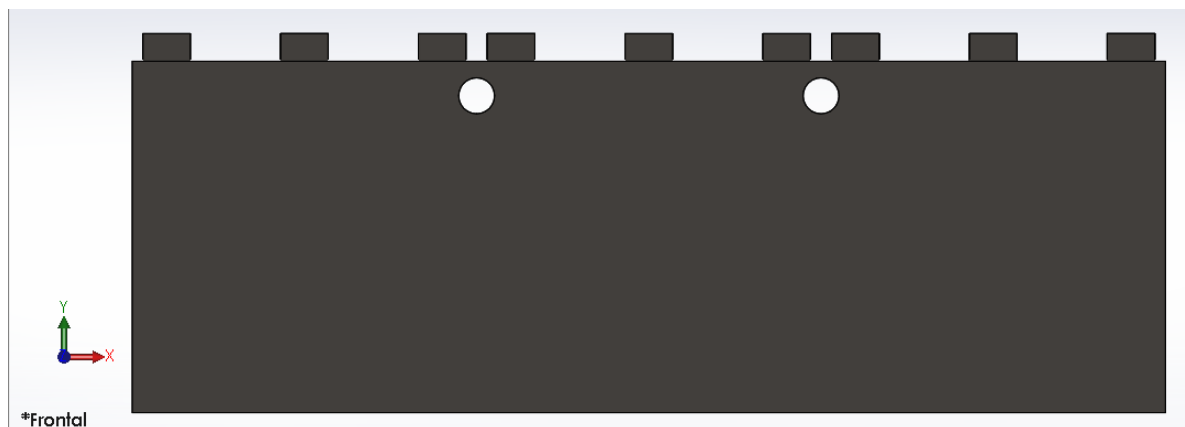
Figura 36 Plano Isométrico y Superior de la Carcasa



Fuente: Autor

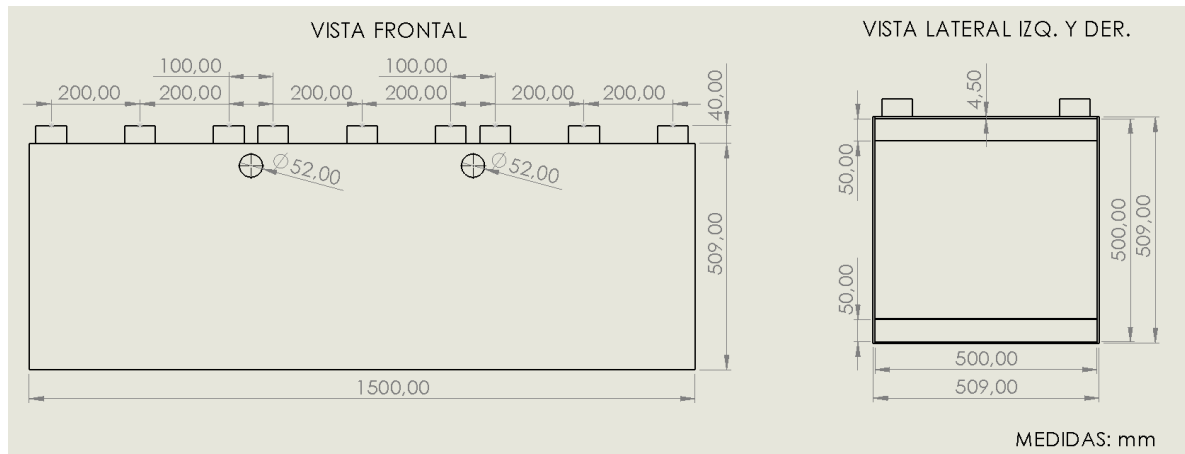
La parte frontal de la carcasa fue adaptada con dos agujeros que permitan soportar el sistema de golpeteo y los rodamientos que se posicionan en los extremos de la carcasa como se observa en la Figura 37

Figura 37 Vista Frontal de Carcasa



Fuente: Autor

Figura 38 Plano Vista Frontal y Lateral de la Carcasa

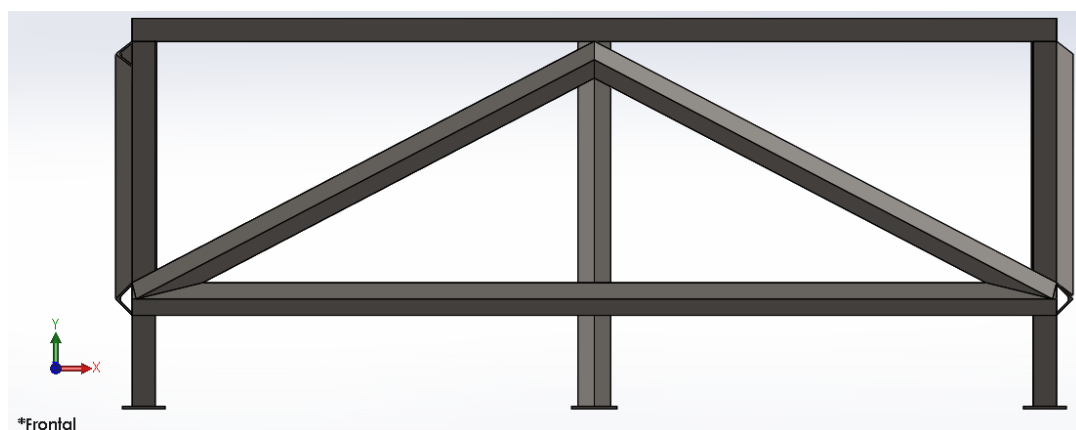


Fuente: Autor

4.3.2 Estructura de Soporte

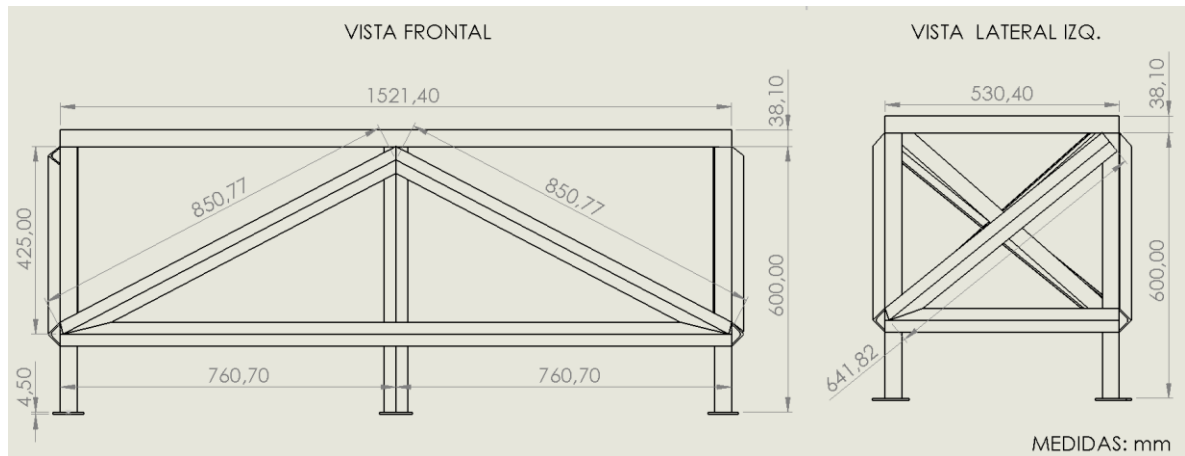
La estructura de soporte se diseñó con perfiles en L que hagan de base para poder resistir y mantener firme todo el sistema precipitador, no obstante, se seleccionó que dichos perfiles en L fueran de acero A36 ya que su resistencia a la temperatura y resistencia mecánica son las óptimas para el trabajo

Figura 39 Vista Frontal Estructura de Soporte



Fuente: Autor

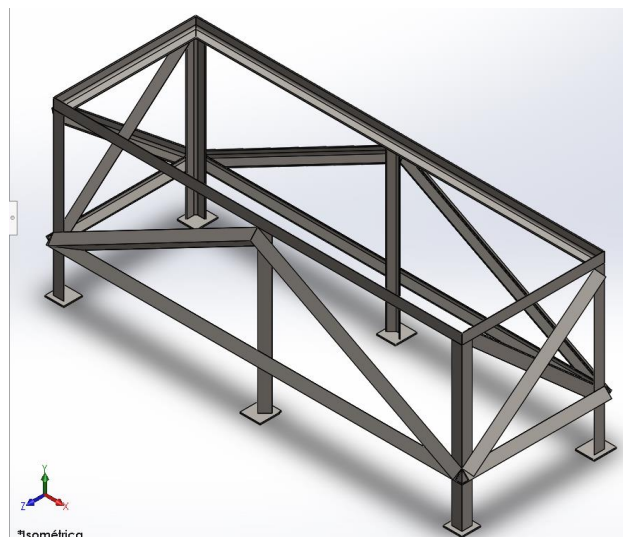
Figura 40 Plano Vista Frontal y Lateral de la Base Soporte



Fuente: Autor

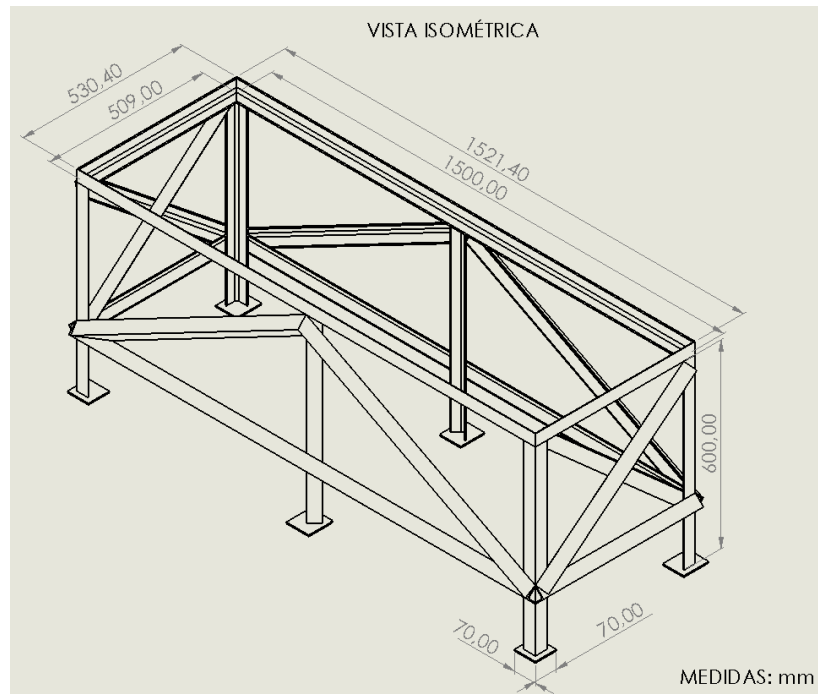
La base de soporte cuenta con unos peldaños en su parte superior como se observa en la Figura 41, que permiten el posicionamiento del resto de la estructura y con esto soportar todo el peso

Figura 41 Vista Isométrica de Estructura de Soporte



Fuente: Autor

Figura 42 Vista Isométrica de la Base Soporte

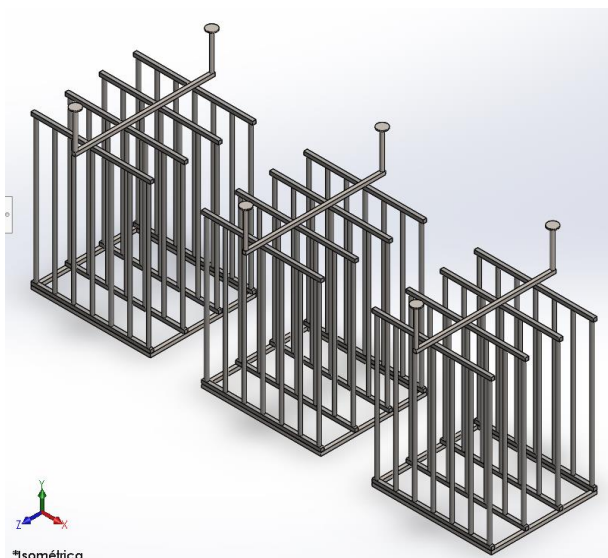


Fuente: Autor

4.3.3 Electrodo de Descarga

Los electrodos colectores se diseñaron para ser distribuidas en tres secciones o fases como se observa en la Figura 43, esto con el fin de poder posicionar paralelamente placas colectoras estas puedan tener el soporte de electrodo que carga electrostáticamente las partículas de gas de esta forma aseguramos que en cada sección va a aumentar o mantenerse el nivel de ionización, se seleccionó el acero inox. 304 como material de construcción de este sistema, debido a su excelente y alta resistencia térmica y buena conducción eléctrica.

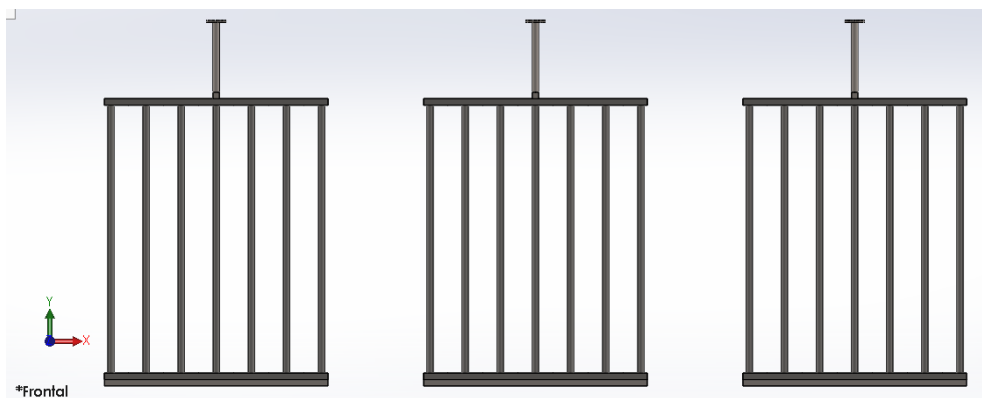
Figura 43 Vista Isométrica de las 3 Secciones de Electrodo de Descarga



Fuente: Autor

En la Figura 44, podemos observar una vista frontal de estos electrodos de descarga donde se evidencia la separación de las secciones siendo aproximadamente unos 10cm y se evidencia también la separación entre cada alambre de sección, esta separación está calculada para que se forme un efecto corona uniforme

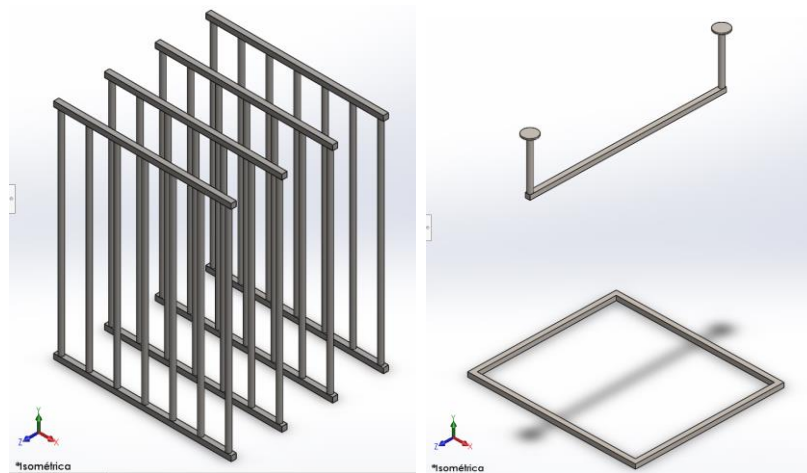
Figura 44 Vista Frontal de las 3 Secciones de Electrodo de Descarga



Fuente: Autor

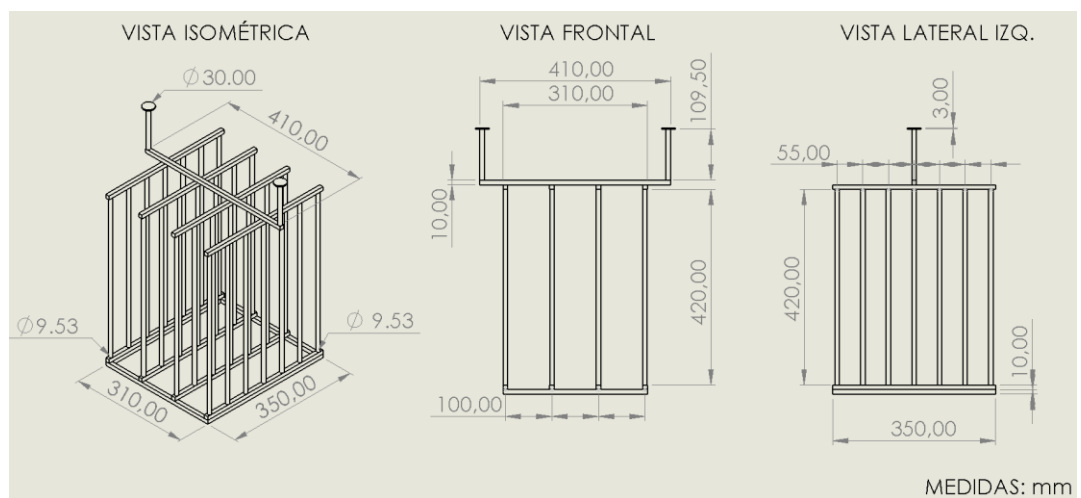
Los electrodos de descarga van soldados a un sistema denominado soporte de electrodos de descarga como se observa en la Figura 45, esto se diseñó con la finalidad de que sirva como el medio por el cual se lleve la tensión eléctrica de alta frecuencia a los electrodos, seguidamente sirve como soporte de suspensión a la carcasa.

Figura 45 Vista Isométrica de Electrodos de Descarga y Soporte de Electrodos de Descarga



Fuente: Autor

Figura 46 Plano Isométrico, Frontal y Lateral del Sistema de Electrodos de Descarga

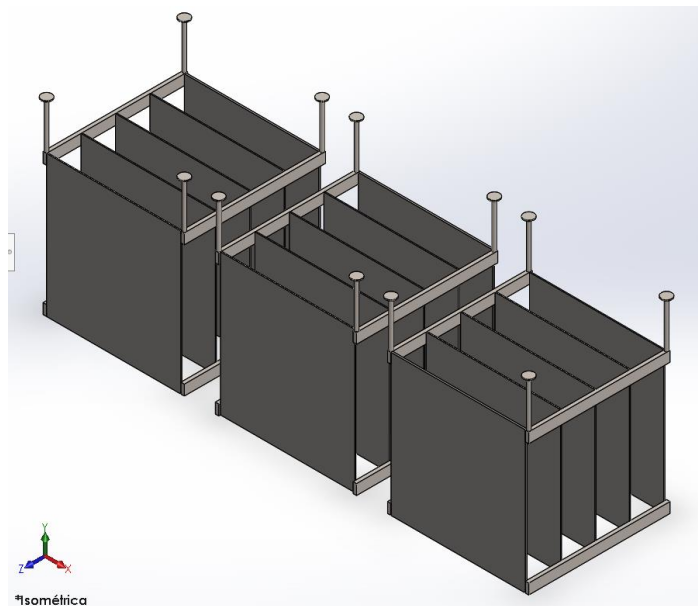


Fuente: Autor

4.3.4 Placas Colectoras

Las placas colectoras se diseñaron específicamente para ser distribuidas en tres secciones o fases como se observa en la Figura 47, esto con el fin de ver hasta qué punto las placas colectoras siguen atrayendo electrostáticamente las partículas de gas y cuanto material particulado se puede recolectar en cada una de estas secciones, se seleccionó el acero inox. 304 como material de construcción de este sistema, debido a su excelente y alta resistencia térmica y buena conductividad eléctrica.

Figura 47 Vista Isométrica de las 3 Secciones de Placas Colectoras

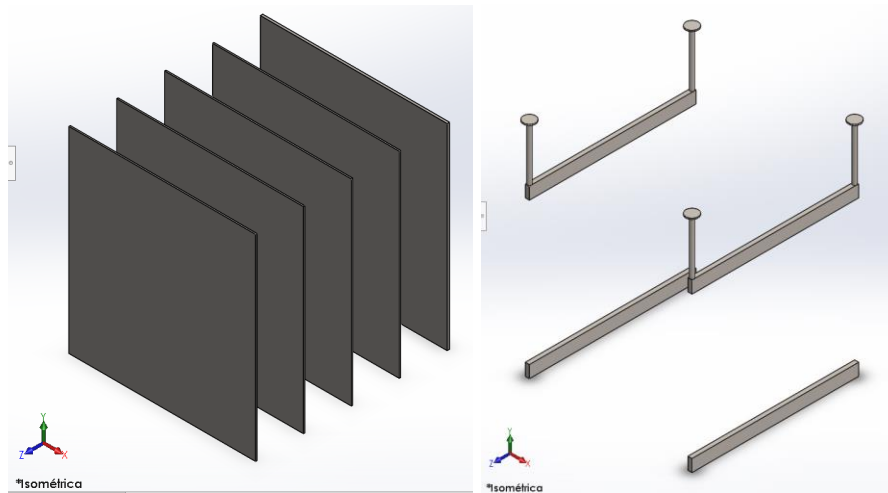


Fuente: Autor

Las placas colectoras van soldadas a un sistema llamado soporte de la placa colectoras como se observa en la Figura 48, esto se diseñó con la finalidad de que sirva como el medio por el cual se lleve la tensión eléctrica a las placas, también sirve como soporte de suspensión a la carcasa ya que se puede mantener

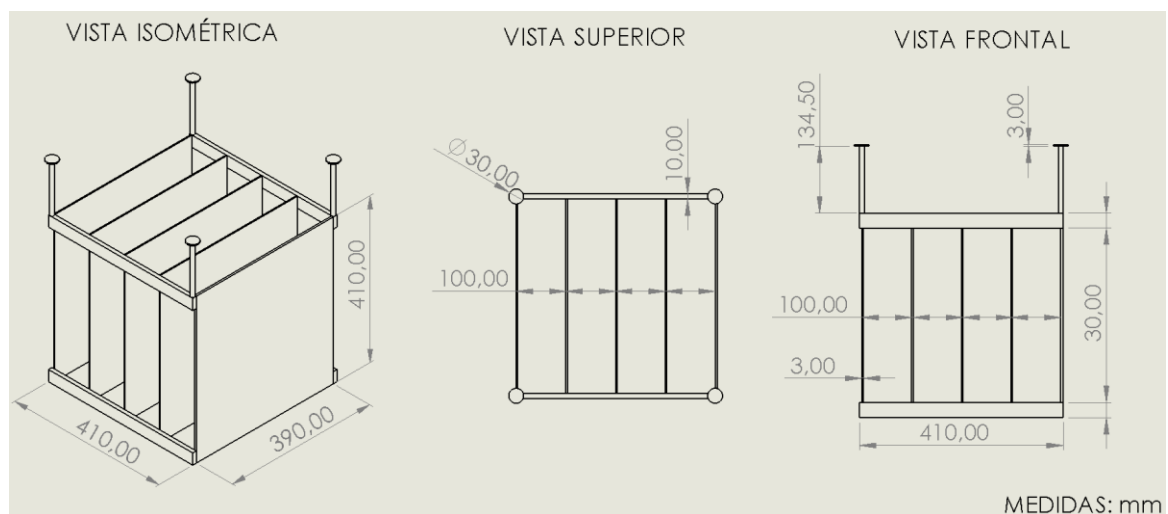
suspendida y también sirve como punto de golpeteo ya que en este soporte es donde el sistema de golpeteo tocará para derribar el material particulado

Figura 48 Placa colectora y Soporte de Placa Colectora



Fuente: Autor

Figura 49 Plano del Sistema Colector

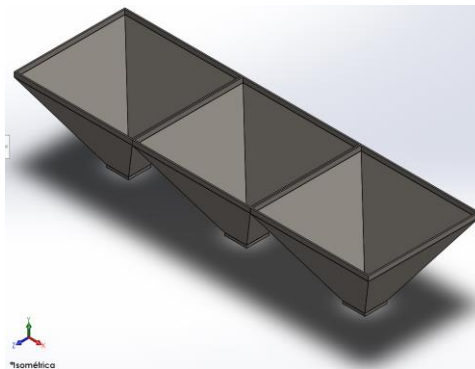


Fuente: Autor

4.3.5 Tolvas de Recolección

Las placas colectoras se diseñaron específicamente para ser distribuidas en tres secciones o fases como se observa en la Figura 50, esto nos permite conocer la cuanta cantidad de material particulado se está recolectando por sección, debido a la temperatura que tiene que someterse la tolva se realizará en acero A-36.

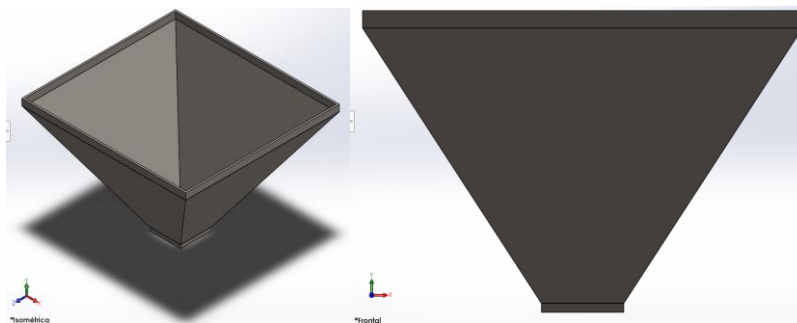
Figura 50 Vista Isométrica de las 3 Secciones de las Tolvas de Recolección



Fuente: Autor

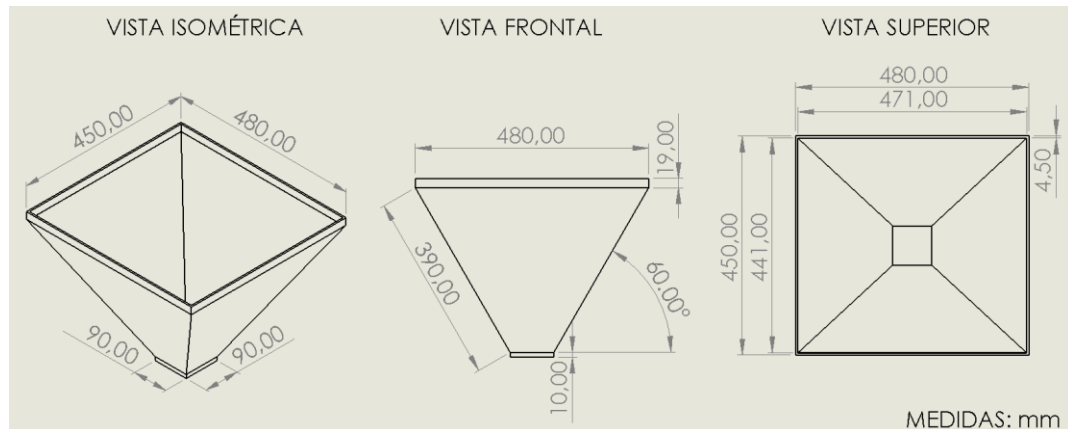
Las tolvas de recolección se hacen con un ángulo de 60° de inclinación como se observa en la Figura 52, esto con el fin de poder generar un desplazamiento del material particulado y que no se quede atascado obstruyendo la recolección del resto del material

Figura 51 Vista Isométrica y Frontal de la Tolva de Recolección



Fuente: Autor

Figura 52 Plano Isométrico, Frontal y Superior de la Tolva de Recolección

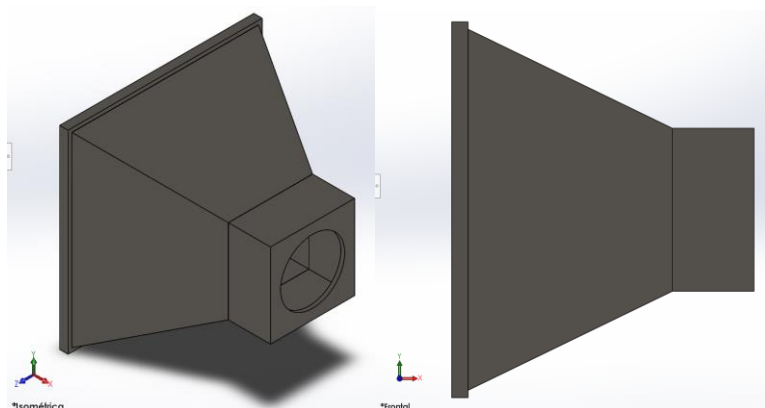


Fuente: Autor

4.3.6 Pantalla de Distribución y Embudo de Entrada

El filtro de distribución del gas se diseñó en dos secciones esto con el fin de poder acoplar dos placas planas agujeradas en el recorrido del flujo del gas, estas placas se diseñaron con agujeros lo suficientemente pequeños y separados que permitieran que el gas que pase se distribuya uniformemente en el volumen interno del sistema precipitador.

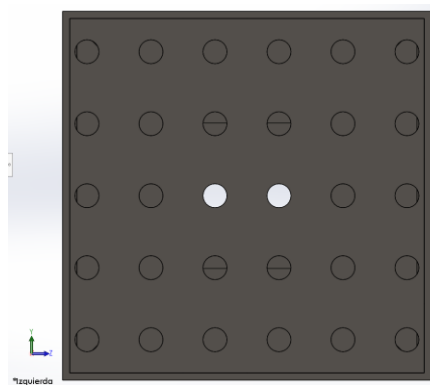
Figura 53 Vista Isométrica y Frontal del Embudo Entrada



Fuente: Autor

Seguido de la entrada la muestra de gas se encuentra con la primera pantalla de distribución como se observa en la Figura 54, que permite que el gas comience a distribuirse uniformemente hacia su segundo filtro.

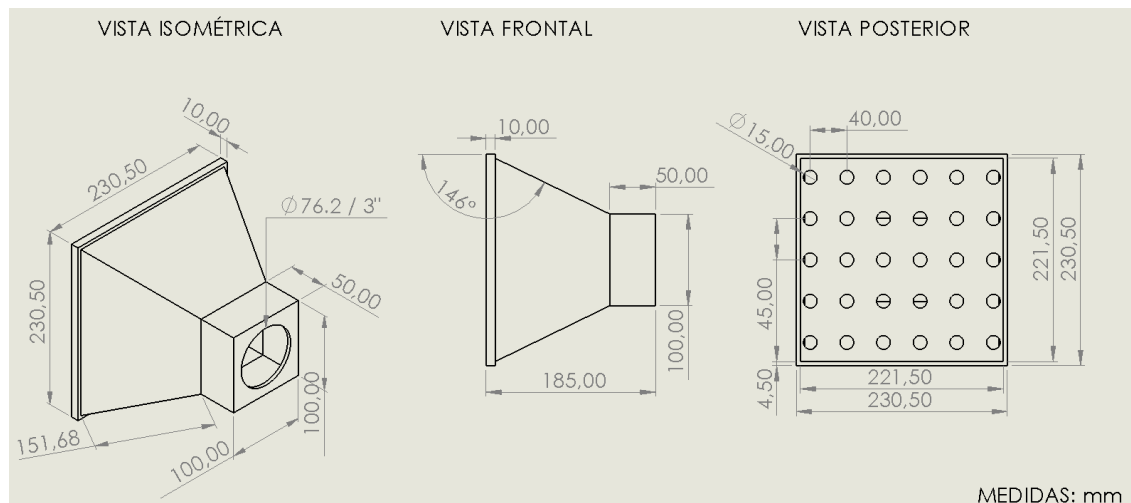
Figura 54 Vista Lateral Izquierda del Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Pequeña



Fuente: Autor

El final de cada sección se realizó con un ángulo de entrada siguiente de 146° permitiendo un mejor paso del fluido de gas como se observa en la Figura 55.

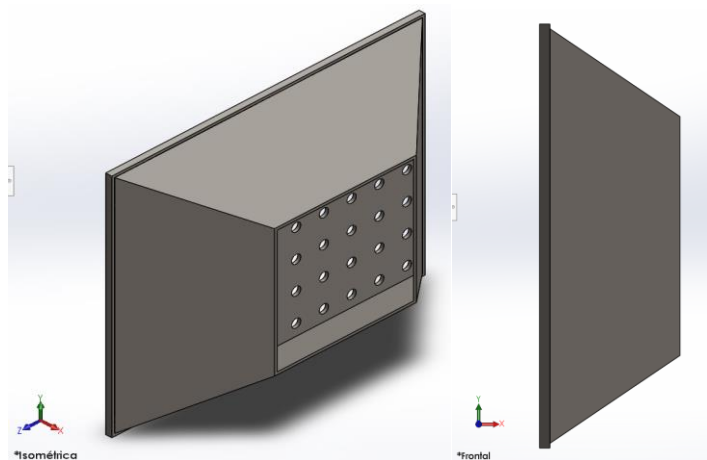
Figura 55 Plano Isométrico, Lateral Izq. y Posterior Embudo de Entrada y Pantalla Distribución



Fuente: Autor

En la Figura 56, se observa donde inicia la entrada de la muestra de gas para el segundo filtro de distribución donde este empieza a agrandar su área cónicamente para que pueda poco a poco irse acoplando a el área de entrada del sistema precipitador.

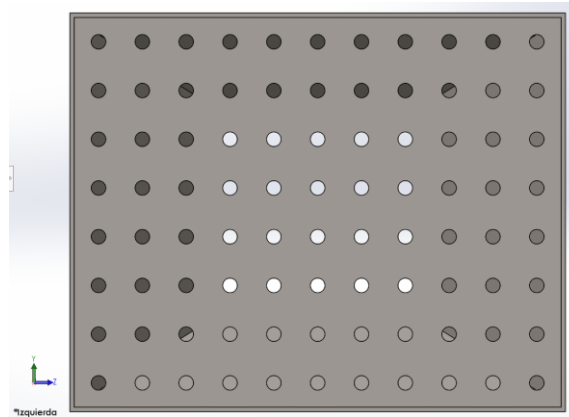
Figura 56 Vista Isométrica y Frontal del Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Grande



Fuente: Autor

Y finalmente se diseñó la última pantalla de distribución como se observa en la Figura 57, con el objetivo de darle una mejor distribución final al gas que entrante antes de que empiece a ser precipitado. De esta forma podemos asegurar que el gas que va a ingresar se va a repartir uniformemente por cada fase del precipitador electrostático

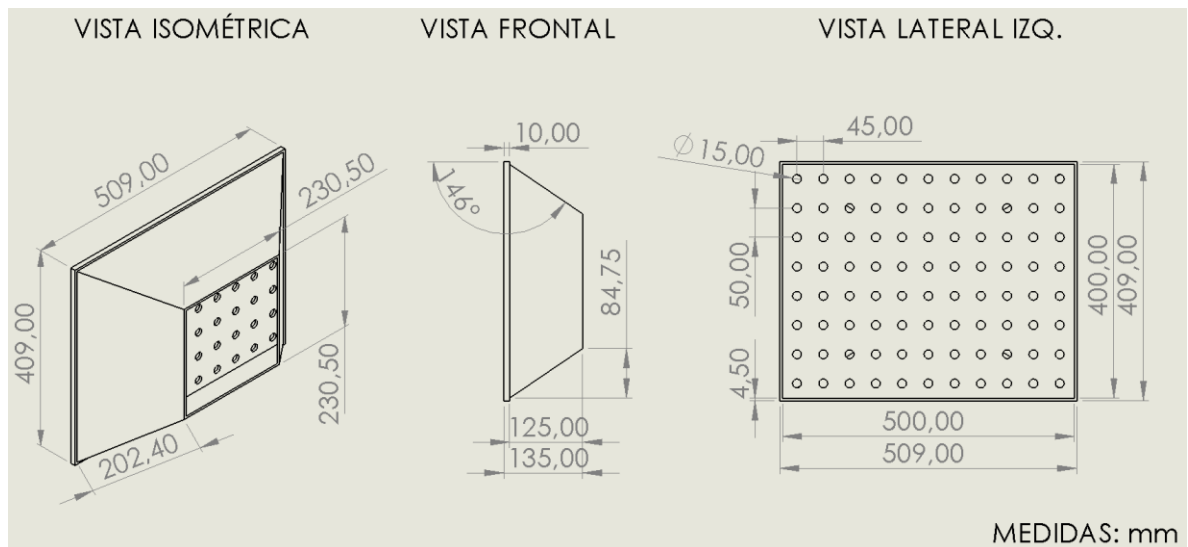
Figura 57 Vista Lateral Izq. del Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Grande



Fuente: Autor

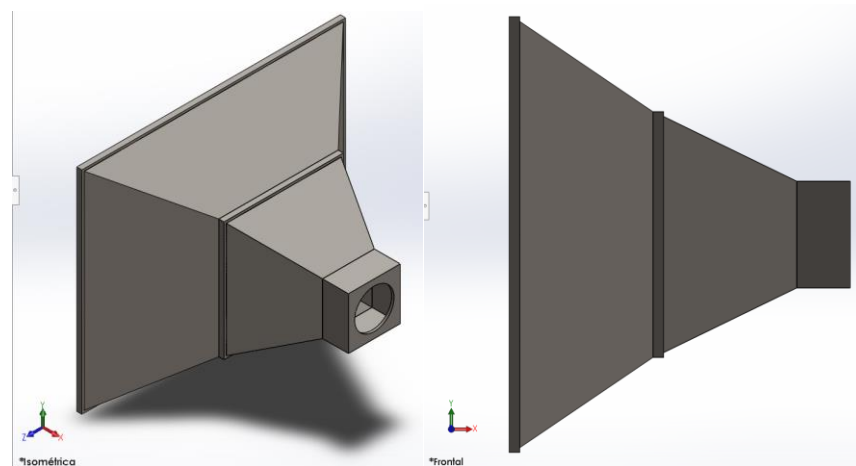
Nuevamente la última parte del embudo de entrada se diseña con un ángulo de 146° para que este siga teniendo un buen tránsito de flujo del gas

Figura 58 Plano Isométrico, Frontal y Lateral Izq. de Embudo de Entrada y Pantalla de Distribución Grande



Fuente: Autor

Figura 59 Vista Isometrica y Frontal del Embudo de Entrada Completo

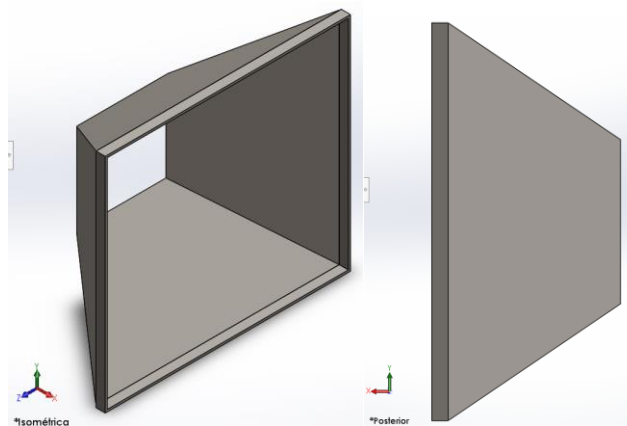


Fuente: Autor

4.3.7 Embudo de Salida

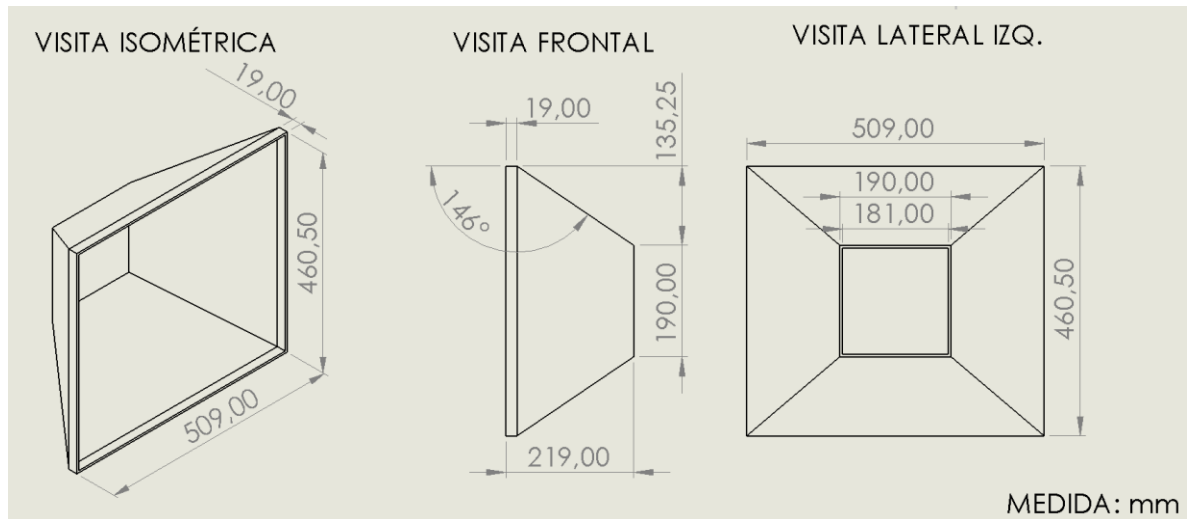
El embudo de salida se diseñó para adaptarse a una chimenea se escape, pero también teniendo en cuenta que el flujo de gas debe salir uniforme y sin interrupciones, por esto se mantuvo el ángulo de 146° como se observa en la Figura 61

Figura 60 Vista Isometrica y Posterior del Embudo de Salida



Fuente: Autor

Figura 61 Plano Embudo de Salida

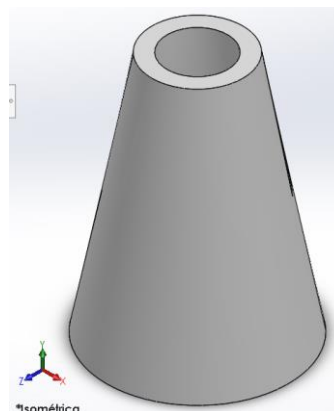


Fuente: Autor

4.3.8 Aisladores Cónicos de Soporte

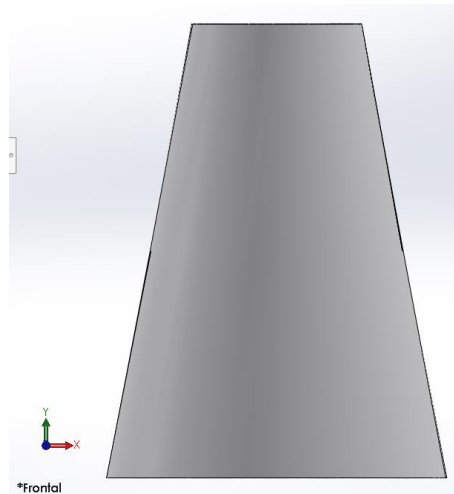
El aislador se seleccionó de tal forma que pudiera soportar la temperatura y de paso que sirviera para ser soporte de apoyo para mantener el sistema colector y el sistema de electrodos de descarga

Figura 62 Vista Isométrica del Aislador Cónico de Soporte



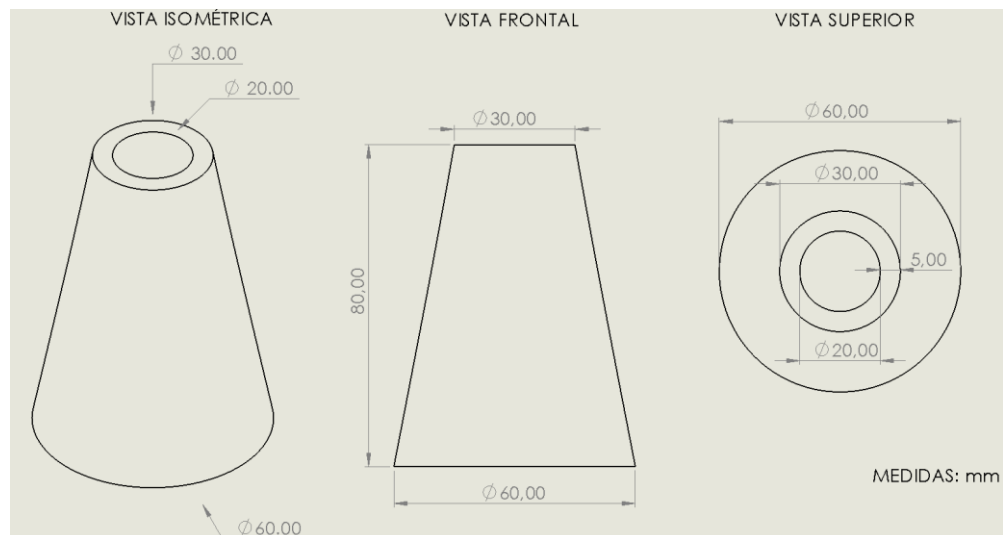
Fuente: Autor

Figura 63 Vista Frontal y Superior del Aislador Cónico de Soporte



Fuente: Autor

Figura 64 Plano Isométrico y Frontal del Aislador Cónico

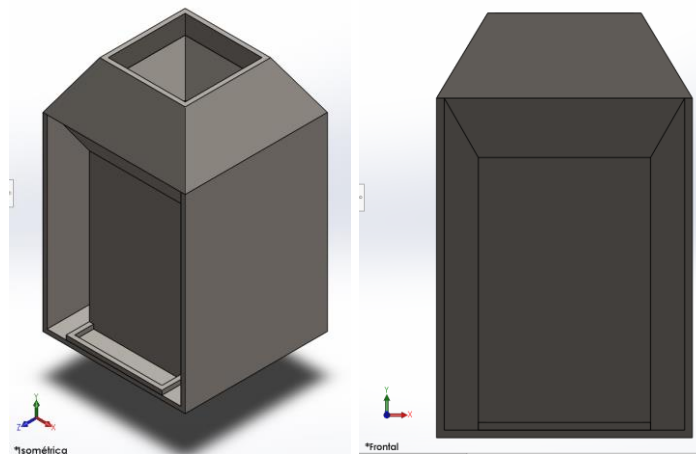


Fuente: Autor

4.3.9 Base de Recolección de Material Particulado

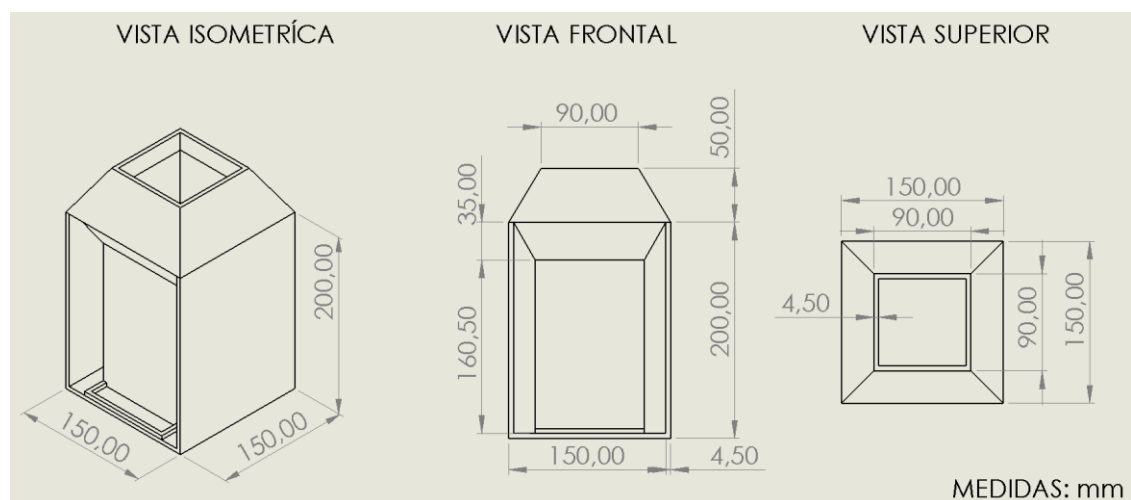
La base de recolección se diseñó para poder soldarse a las tolvas de recolección y que de esta forma sirviera sostener las cajas de recolección las cuales pueden ser extraíbles, esto con el fin de que se pueda vaciar el material particulado que fue previamente precipitado.

Figura 65 Vista Isométrica y Frontal de la Base y Caja de Recolección



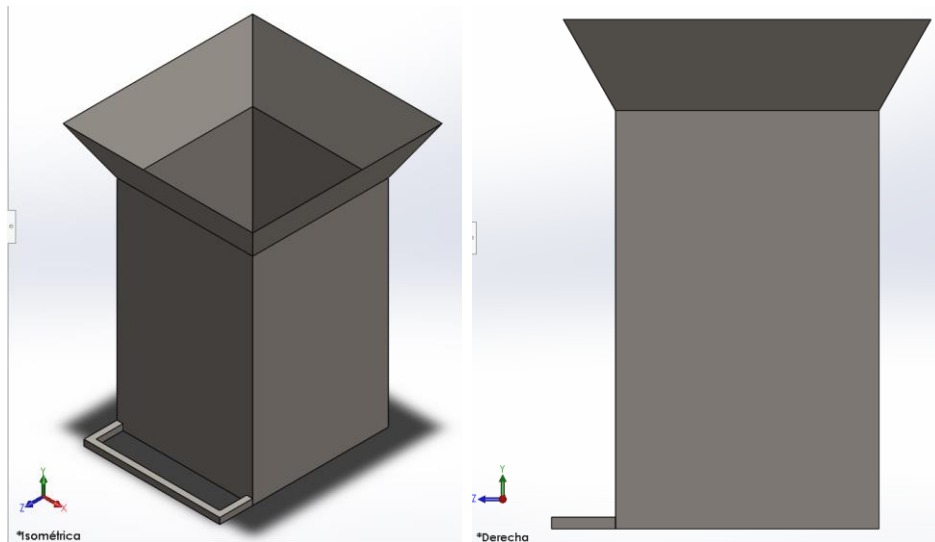
Fuente: Autor

Figura 66 Plano Isométrico, Frontal y Superior de la Base y Caja de Recolección



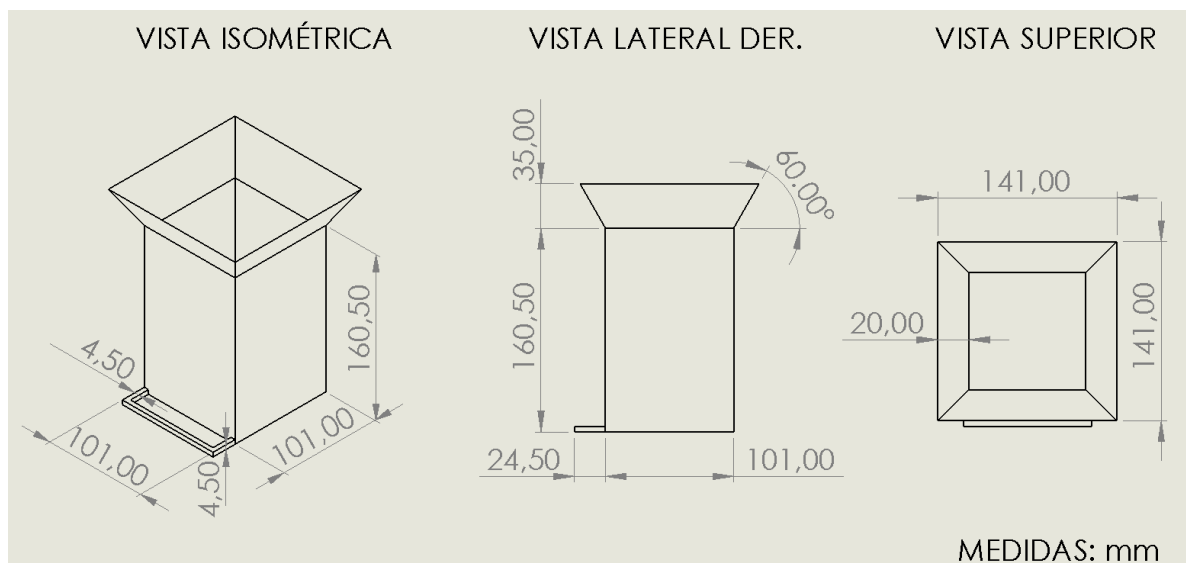
Fuente: Autor

Figura 67 Vista Isométrica y Lateral Der. de la Caja de Recolección de Material Particulado



Fuente: Autor

Figura 68 Plano Isométrico, Lateral Der. y Superior de la Caja de Recolección

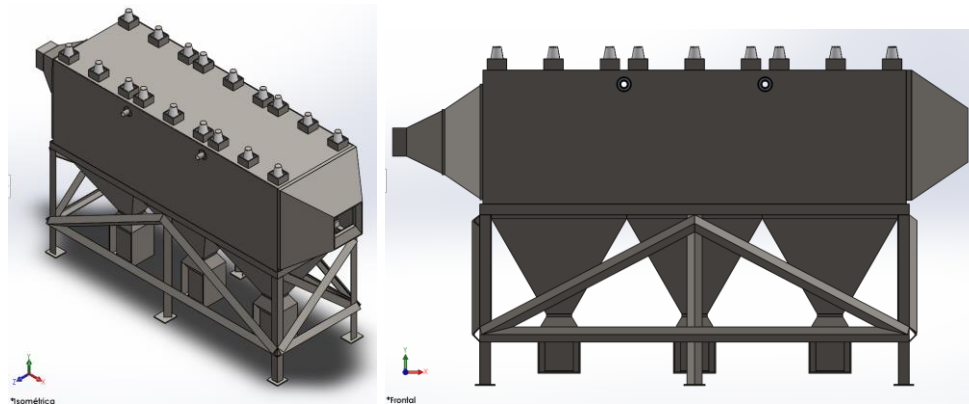


Fuente: Autor

4.3.10 Precipitador Electrostático

El precipitador electrostático ensamblado como se observa en la Figura 69, y en la Figura 71, cuenta con cada una de las etapas y partes definidas con anterioridad

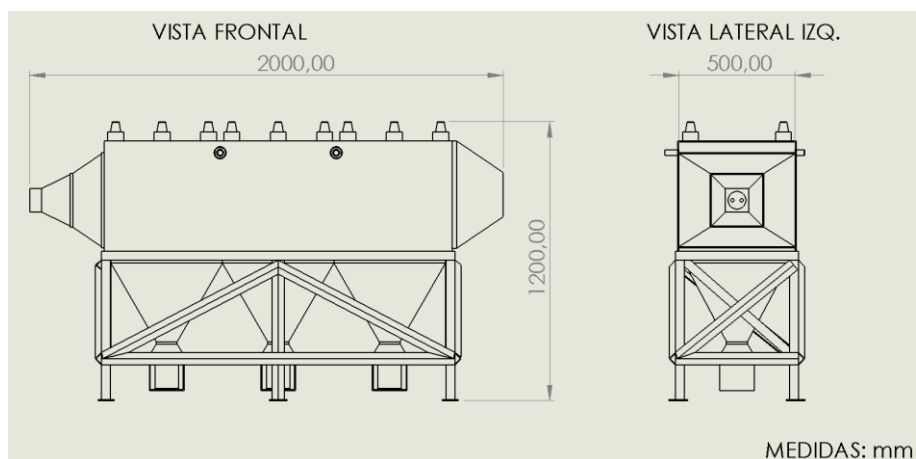
Figura 69 Vista Isométrica y Frontal del Precipitador Electrostático



Fuente: Autor

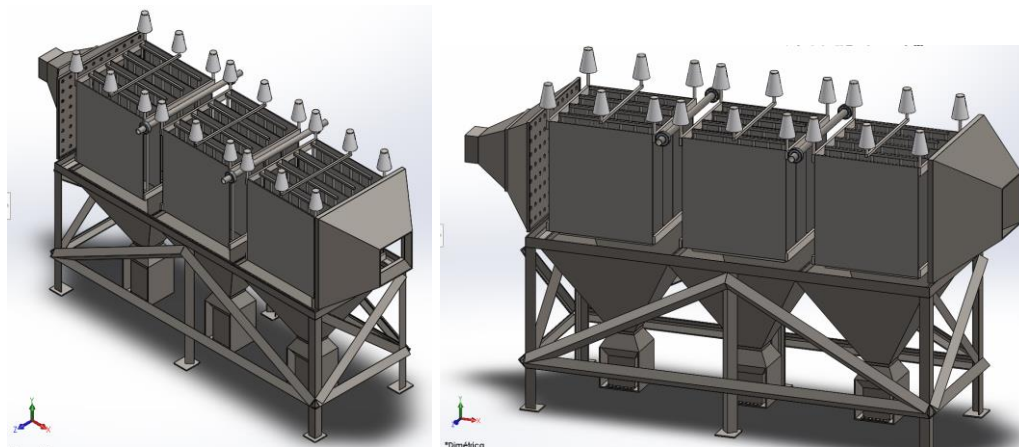
Demostrando mediante la Figura 70, que todo el diseño se realizó con las medidas de espacio de trabajo estipuladas

Figura 70 Plano Frontal y Lateral Izq. del Precipitador Electrostático



Fuente: Autor

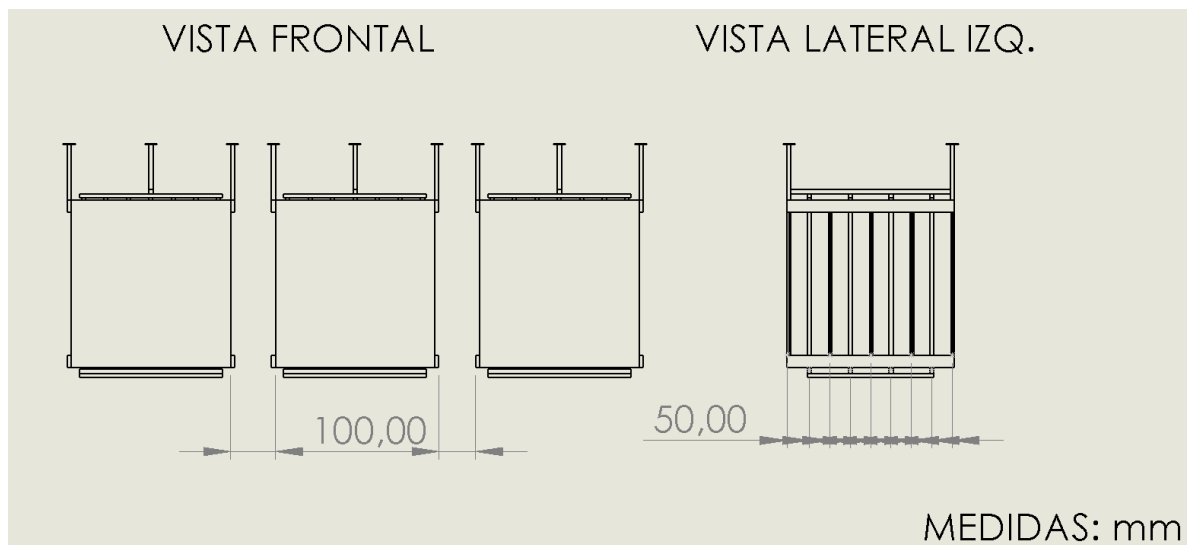
Figura 71 Vista Isométrica y Dimétrica Sistema de Precipitación sin carcasa



Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 72, se dejó un espacio de 50mm que representa la separación calculada en la cual se genera el efecto corona en la ionización del gas

Figura 72 Plano Frontal y Lateral Izq. del Sistema Placa Colectora y Electrodo de Descarga



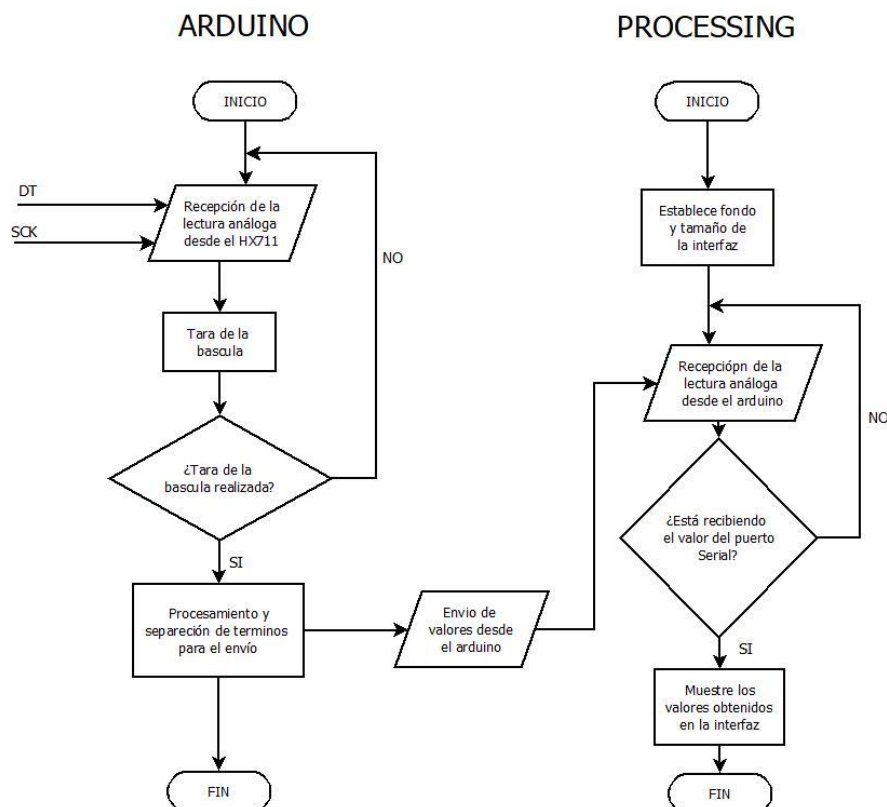
Fuente: Autor

4.4 Sistema de Medición del Material Particulado

Para la medición de la cantidad de material particulado o escoria recolectada en el proceso de la precipitación electrostática se mide independientemente por la cantidad que se recolecta en cada tolva, este proceso se realiza con la medición del volumen de material particulado almacenado en cada fase este valor lo obtenemos indirectamente debido a que para medir este valor se hizo necesario hacer uso de un elemento de instrumentación que permitiera medir el peso de la escoria recolectada y de esta forma poder encontrar la variable volumen

4.4.1 Diagrama de Flujo

Figura 73 Diagrama de Flujo del Código de Arduino y Processing



Fuente: Autor

4.4.2 Diseño de Interfaz

Se diseñó una interfaz gráfica que permita visualizar la cantidad de material particulado que se ha recolectado en el proceso de precipitación electrostática, para medir la cantidad de material particulado se tiene en cuenta el volumen que ocupa en un recipiente de 10cm x 10cm, mediante la Ecuación 11, se obtiene el volumen.

Ecuación 11 Volumen

$$V = \frac{m}{D}$$

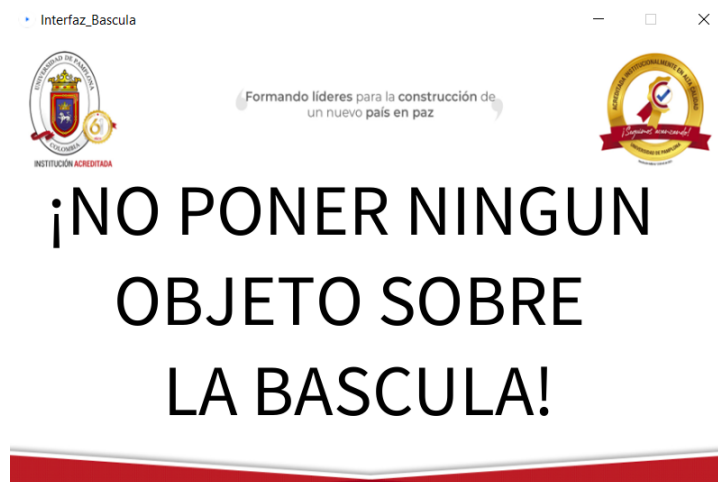
V Volumen [cm^3].

m Masa [g].

D Densidad [g/cm^3].

Primeramente, se presenta una interfaz para Tara del sistema para establecer el valor inicial sin material particulado

Figura 74 Interfaz Gráfica de la Tara del Sistema de Pesaje



Fuente: Autor

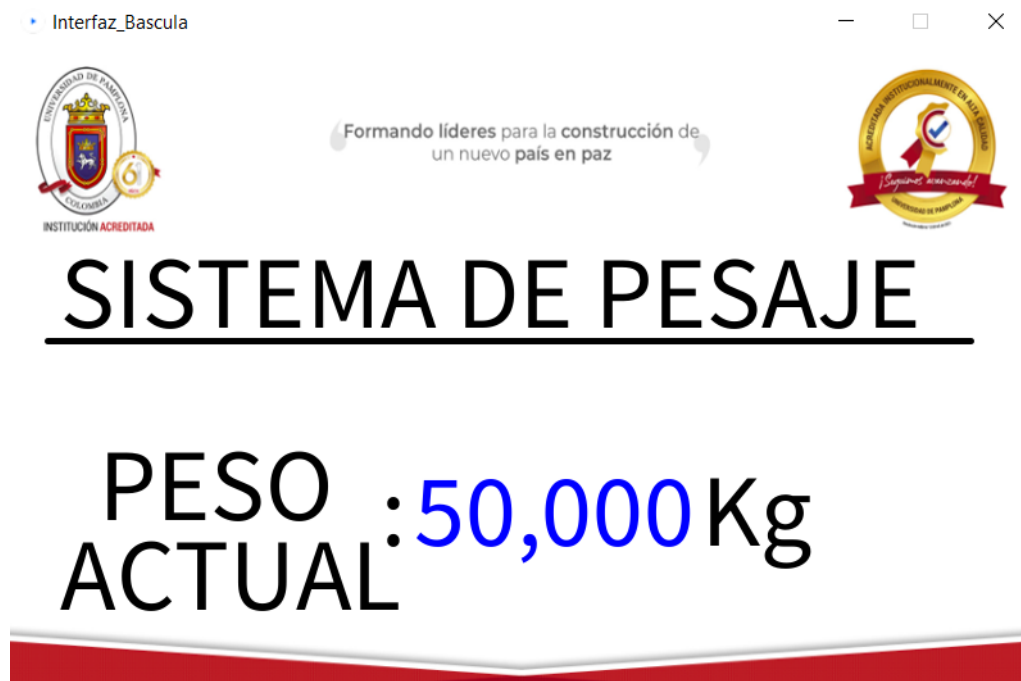


ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Seguidamente, se genera una interfaz que en tiempo real refleja el valor del peso que se está en el recipiente, con esto se visualiza cuanto material particulado fue posible extraer en el proceso de precipitación electrostática.

Figura 75 Interfaz Gráfica del Sistema de Pesaje



Fuente: Autor

4.4.3 Diseño CAD del Sistema de Pesaje

Se seleccionó una celda de carga de 50kg (YZC-1B) que permita obtener el valor de peso del material particulado extraído del sistema de precipitación, acoplado a una base inferior que haga de soporte del sistema de pesaje y una base superior que permita almacenar el material particulado.



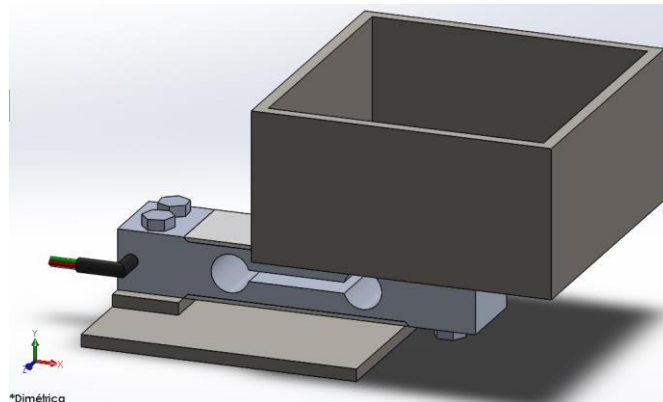
SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

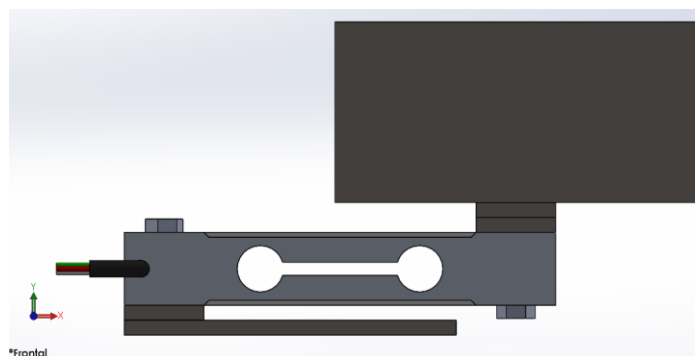
Figura 76 Vista Dimétrica del Sistema de Pesaje



Fuente: Autor

En la base superior se acopla unas pequeñas laminas perforadas para ingresar el tornillo hexagonal M6 y también que ayude a distribuir uniformemente el peso.

Figura 77 Vista Frontal del Sistema de Pesaje



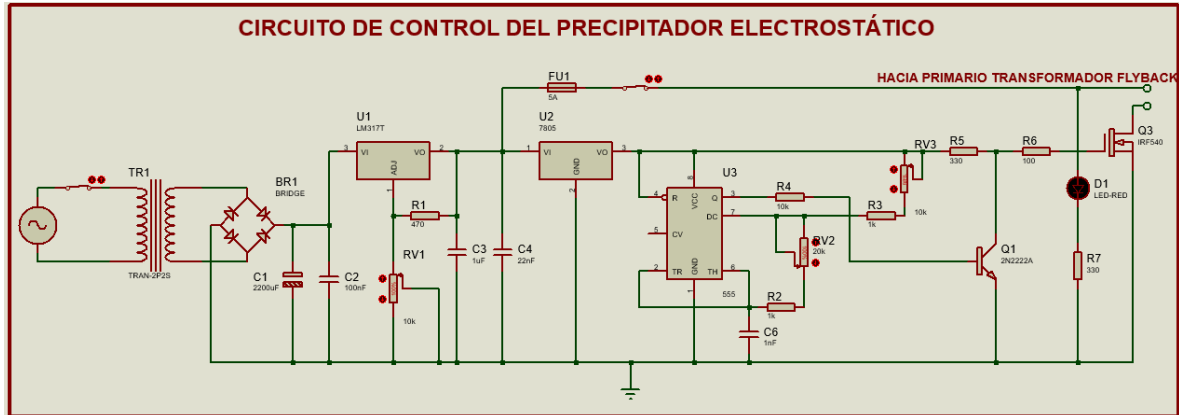
Fuente: Autor

4.5 Circuito Flyback

Para la debida adecuación y el correcto funcionamiento del flyback se le antepuso a este un circuito que ayudara a convertir la tensión alterna en tensión continua mediante un transformador y un regulador de tensión lineal, siguiente a esto se hizo

disposición de un circuito variador de frecuencia que aumente la frecuencia de la tensión.

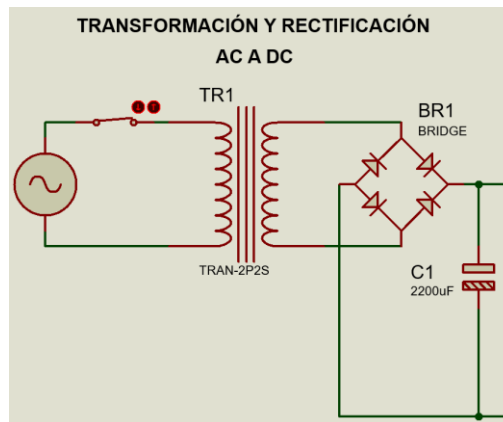
Figura 78 Circuito General Pre-Flyback



Fuente: Autor

Se utiliza primeramente un transformador con un devanado primario y uno secundario para transformar la tensión de 220 VAC a 15 VAC, con un puente rectificador con un condensador electrolítico para transformar la tensión AC en tensión DC

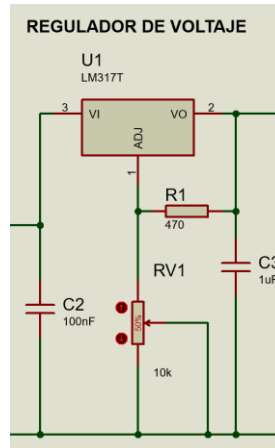
Figura 79 Circuito de Transformación y Rectificación AC a DC



Fuente: Autor

Seguidamente, se hace uso de un regulador de tensión (LM317T) que permita obtener un valor de tensión continua estable y variable (1.2 a 37 V)

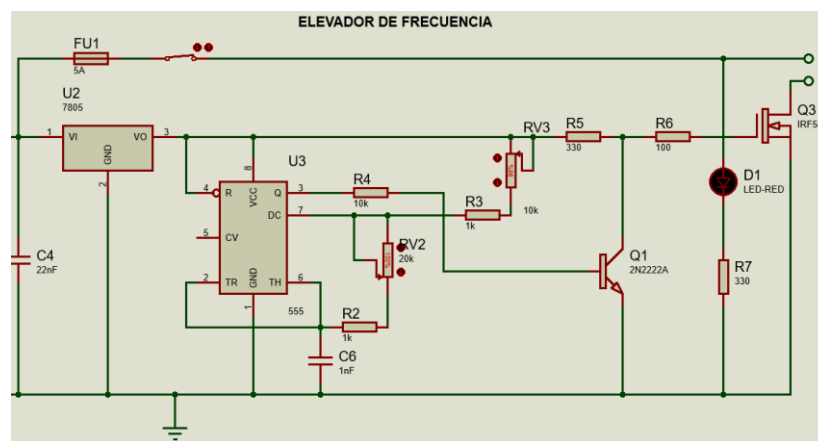
Figura 80 Circuito de Regulación de Voltaje



Fuente: Autor

Por último, se utiliza un NE555 en configuración astable para aumentar o elevar la frecuencia de salida de tensión con conexión final a un mosfet debido a su alta frecuencia de conmutación

Figura 81 Circuito de Elevación de Frecuencia



Fuente: Autor

5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS COSTE – BENEFICIO

5.1 Análisis de Costos

Mediante la “Departamentalización” se extrajo los costos de producción de cada sistema que conforma el prototipo de precipitación electrostática, los mismos que son:

5.1.1 Costo de Estructura y Cuerpo

Tabla 19 Costos de Estructura del Precipitador Electrostático

Cant.	Material	Referencia	Precio Unitario	Costo Total
3	Lamina A-36	1.20mts x 2.40mts x 4.5mm	\$ 800.400 + iva c/u	\$ 2.401.200 + iva
1	Tubo A-36	D 1” x 1mtr	\$ 45.900 + iva c/u	\$ 45.900 + iva
2	Perfil en L de A-36	L 1/8” x 1 1/2” x 6mts	\$ 64.800 + iva c/u	\$ 129.600 + iva
2	Lamina Acero Inox. 304	1.52mts x 3mts x 3mm	\$ 2.673.633 + iva c/u	\$5.347.266+ iva
6	Barras Acero Inox. 304	D 3/8” x 6mts	\$ 79.900 + iva c/u	\$ 479.400 + iva
28	Aislador de Soporte Cónico	D1 9cm x D2 4cm x H 10cm x E 1cm	\$ 39.750 + iva c/u	\$ 1.113.000 + iva
TOTAL				\$ 9.516.366 + iva

Fuente: Autor

5.1.2 Costo de Materiales Eléctricos y Electrónicos

Tabla 20 Costos de Elementos de Electrónica y Eléctrica

Cant.	Material	Precio Unitario	Costo Total
1	Cables de Alta Tensión	\$ 15.300	\$ 15.300
1	Pinzas Eléctricas	\$14.500	\$14.500
1	Flyback	\$43.200	\$43.200
1	Celda de Carga + HX711	\$ 54.000	\$ 54.000
1	Arduino Uno	\$89.000 c/u	\$89.000
	Circuitería Flyback	\$65.000	\$65.000
1	Motor	\$ 150.000	\$ 150.000
TOTAL			\$ 431.000

Fuente: Autor

5.1.3 Costos Adicionales

Tabla 21 Costos Adicionales

Cant.	Material	Referencia	Precio Unitario	Mano de obra	Costo Total
1	Caja Derivación Dexson	0.2mts x 0.25mts x 0.1mts	\$ 46.000 + iva c/u		\$ 46.000 + iva
4	Rodamiento	1" x 2 3/64" x 360 grados	\$ 134.200 + iva c/u		\$ 536.800 + iva
4	Manta Cerámica de Aislamiento	0,61mts x 7,62mts x 1".	\$ 382.000		\$ 382.000



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



	Programación			\$ 200.000	\$ 200.000
TOTAL					\$ 821.000 + iva

Fuente: Autor

5.1.4 Costo Total de Inversión

Tabla 22 Costo Total de Inversión

Elementos	Valor COP.
Estructura y Cuerpo	\$ 9.516.366 + iva
Componentes Eléctricos y Electrónicos	\$ 431.000
Componentes Adicionales	\$ 821.000 + iva
Valor de Inversión del proyecto	\$ 10.768.366 + iva

Fuente: Autor

5.2 Análisis de Beneficio

Para el análisis costo – beneficio se utilizó el método VAN y TIR para cualificar y cuantificar la viabilidad de implementar el diseño del precipitador electrostático

5.2.1 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

Para perfilar la viabilidad se proyectó un flujo neto anual de tal forma que en este plazo sirva poder recuperar la inversión con una tasa de actualización del 10%.

Como se observa en la Tabla 23, Se realizó un descuento del valor de flujo neto dado a la variación que presenta la tasa de actualización al pasar cada periodo o año, dando así que los flujos futuros representan la sustracción del 10% a cada



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

periodo anterior, dando así que en un periodo de 5 años la inversión inicial ya se ve recuperada y reflejada

Tabla 23 Flujo Futuro a Proyección de 5 Años

	AÑO					
	0	1	2	3	4	5
Flujo Futuro (FF)	10.768.366	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000
Flujo Actualizado 10%	10.768.366	2.727.273	2.479.339	2.253.944	2.049.040	1.862.764
Flujo Actualizado Acumulado	-10.768.366	-8.041.093	-5.561.754	-3.307.810	-1.258.770	603.994

Fuente: Autor

Con la Ecuación 12, se corroboró que el valor actual neto en un periodo de 5 años tiene un resultado positivo permitiendo conocer su eficiencia en la recuperación de la inversión inicial

Ecuación 12 Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = -I_0 + \frac{FF_1}{(1+K)^1} + \frac{FF_2}{(1+K)^2} + \frac{FF_3}{(1+K)^3} + \frac{FF_4}{(1+K)^4} + \frac{FF_5}{(1+K)^5}$$

VAN Valor Actual Neto [*Cuantificable*].

$FF_{(año)}$ Flujo Futuro [*Cuantificable*].

K Tasa de Actualización [%].

Con la Ecuación 13, se corroboró que la tasa de actualización es menor a la tasa interna de retorno, concluyendo entonces que se está teniendo una mayor tasa a la



que se está solicitando implicando esto un por cierto el supuesto de una oportunidad para invertir o llevar acabo la idea.

Ecuación 13 Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$TIR = \frac{FF_0}{(1+K)^0} + \frac{FF_1}{(1+K)^1} + \frac{FF_2}{(1+K)^2} + \frac{FF_3}{(1+K)^3} + \frac{FF_4}{(1+K)^4} + \frac{FF_5}{(1+K)^5}$$

TIR Tasa Interna de Retorno [%].
 $FF_{(año)}$ Flujo Futuro [*Cuantificable*].
 K Tasa de Actualización [%].

Con la Ecuación 14, se calculó un aproximado para saber en qué momento del horizonte de evaluación la inversión se recuperó

Ecuación 14 Periodo de Recuperación (PR)

$$PR = A - \frac{|B|}{C}$$

PR Periodo de Recuperación.
 A Año anterior de Recuperación de la Inversión.
 B Flujo Acumulado Anterior a la Recuperación [*Cuantificable*].
 C Flujo Actualizado del Año de Recuperación [*Cuantificable*].

Como se observa en la Tabla 24, los resultados cuantificables y porcentuales del VAN, el TIR y el PR expresan la favorabilidad de realizar la inversión en la construcción del diseño del precipitador electrostático concluyendo que si es viable y rentable realizar la implementación de este mismo



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Tabla 24 Resultado del Análisis Costo - Beneficio

Tasa de Actualización	10%
VAN	\$ 603.994
TIR	12%
PR	4.68

Fuente: Autor



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio de los fenómenos físicos que repercutían en el precipitador electrostático para así poder a nivel de diseño entender y ver de una forma más clara como se podía ejecutar, fue posible hacer un diseño con las medidas predeterminadas de espacio de trabajo que contuviera todas y cada una de las partes y etapas que recorre tanto el gas como el material particulado extraído, dejando así no solo una brecha para el análisis del comportamiento del precipitador, sino también, un espacio de mejora para este mismo.
- Un precipitador electrostático es un dispositivo de control de emisiones eléctricas. Estos dispositivos están especialmente diseñados para atrapar y eliminar partículas utilizando fuerzas electrostáticas, la eficiencia de montaje de estos dispositivos depende del tamaño y la calidad,
- El diseño del precipitador electrostático considera normas ambientales para el control de material particulado en la industria de fabricación de ladrillo y en general.
- En este trabajo se compararon los diversos tipos de sistemas de precipitación electrostática, analizando cuál de los diversos sistemas nos proporcionaba una mejor eficiencia de recolección permitiendo no solamente saber cuál era el indicado para el proceso que se quería realizar la purificación, sino también, saber a partir de cual se podían reducir costos en materiales y procesos adicionales.
- Con el fin de minimizar costos en la selección de materiales de los electrodos de descarga y placas colectoras se optó por usar acero inox. 304 ya que este material a nivel nacional y regional tiene una predominancia en comparativa el acero inox. 316L que tiende a doblar e incluso triplicar el precio.



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



- Mediante el software Ansys Workbench podemos concluir que la generación del campo eléctrico de los electrodos de descarga se forma de manera perpendicular, siendo así que este viaja a las placas colectora por medio de la ley de atracción y de esta forma se conforma el campo de ionización de partículas
- Con el análisis de costos y beneficios podemos obtener una rentabilidad en la ejecución del prototipo precipitador electrostático debido a que se genera un TIR del 12% siendo mayor a la tasa de actualización y calculando un periodo de actualización de 4.68 donde se expresa el tiempo para recuperar la inversión



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



RECOMENDACIONES

- Cuando se implemente este diseño y se comience a trabajar con este tipo de equipos de precipitación, es recomendable realizar una capacitación técnica del personal de trabajo antes de proceder a manipularlo.
- De acuerdo a las precauciones de manejo que se observan en la [Tabla 7](#), es recomendable no manipular el precipitador electrostático una vez puesto en marcha el equipo.
- Como material alternativo del aislador de soporte estos se podrían llegar a fabricar manualmente, aprovechando la materia prima que predomina en la fabricación del ladrillo (arcilla), esto porque la búsqueda, precio y poca probabilidad de conseguirse nacionalmente este material hace que sea más factible hacer manualmente el aislador de soporte.
- Para mejorar la fuerza de atracción del sistema de precipitación electrostática aumentando así su eficiencia se podría cambiar el Flyback de 10kV por uno que no supere los 18kV o 20kV esto dado a que con los cálculos realizados estos voltajes solo aumentarían la fuerza del campo sin modificar el diseño ya establecido.
- La placa colectora deberá estar conectada a tierra para evitar cargas estáticas durante el funcionamiento



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



BIBLIOGRAFÍA

- Adad, Roger Cohen, Université Lyon I, Laboratoire De Physico, and L A N Cnrs, 'PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO', 57.2 (2013), 255–62
- Colenghi, V., L. Lepore, C. Di Carlo, F. Bochicchio, and R. Remetti, 'Development of an Electrostatic Precipitator Prototype to Reduce Exposure to Radon Progeny in Poorly Ventilated Workplaces', *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13.1 (2020), 747–57
<<https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1838039>>
- Dise, Manual D E, D E Proceso, and Presion D E Dise, 'Manual de Diseño de Proceso', 1994
- EPA, 'Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes Del Aire (EPA-452/F-03-060)', 2002, 1–7
- Feal Veira, A., 'Precipitadores Electrostáticos (I)', *Ingenieria Quimica*, 33.381 (2001), 177
- Fernández Oviedo, Ismael Prieto, 'Precipitadores Electrostáticos Utilizados En Centrales Termoeléctricas', *Centrales Termicas*, 5 (2000), 1–13
- G, Diana Cabrera, William Ruano R, and Universidad Mariana, 'Diseño de Un Filtro Electrostático a Escala Piloto', 5.2 (2008), 110–13
- Gellis Orta, Julián, Gustavo Guerrero, and Raúl Narvaez Sáenz, 'Precipitadores Electrostáticos De Solidos', 2014, 1–16
<[http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2241/1/Principios para el modelamiento de Precipitadores_Julián Gelis Orta_USBCTG_2014.pdf](http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2241/1/Principios_para_el_modelamiento_de_Precipitadores_Julián_Gelis_Orta_USBCTG_2014.pdf)>
- GOMEZ, ALEJANDRA LOPERA, 'Cuantificación De Las Emisiones De Dióxido De Carbono En El Valle De Aburrá', 2016
- HERNÁNDEZ, OSCAR ALBERTO CUÉLLAR, and AYDER FABIÁN RINCÓN, 'FILTRO POR PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA PARA LA REMOCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN EL ESCAPE DE MOTORES DIESEL OSCAR', *Tesis*, 21.1 (2020), 1–9
- Jairciño Páez Claro, 'Tipos de Contaminantes Atmosféricos Asociados a La Fabricación de Ladrillos Artesanales En Colombia', 3.2017 (2020), 54–67
<<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>>
- Jaworek, A., A. Marchewicz, A.T. Sobczyk, A. Krupa, and T. Czech, 'Two-Stage Electrostatic Precipitators for the Reduction of PM2.5 Particle Emission', *Progress in Energy and Combustion Science*, 67 (2018), 206–33
<<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.03.003>>
- Lee, Gi Hyuk, So Young Hwang, Tae Won Cheon, Hak Joon Kim, Bangwoo Han, and Se Jin Yook, 'Optimization of Pipe-and-Spike Discharge Electrode Shape for Improving Electrostatic Precipitator Collection Efficiency', *Powder*



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



- Technology, 379 (2021), 241–50
<<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.044>>
- Liang, Chun-Sheng, Feng-Kui Duan, Ke-Bin He, and Yong-Liang Ma, 'Review on Recent Progress in Observations, Source Identifications and Countermeasures of PM_{2.5}', *Environment International*, 86 (2016), 150–70
<<https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.016>>
- LÓPEZ BLANCA, ALEJANDRA PROAÑO, JONATHAN HERNÁN, ZURITA PROAÑO, 'Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito', *Tesis*, 1 (2016), 17
<<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>>
- Mamani, Josué Abel, 'Diseño e Implementación de Un Prototipo a Escala de Un Precipitador Electrostático Para El Control de Polución En Una Industria Cementera', *Universidad Católica de Santa María*, 2019
<<https://tesis.ucsm.edu.pe:80/repositorio/handle/UCSM/9517>>
- Manzano-Agugliaro, Francisco, and Javier Carrillo-Valle, 'Transformación de Un Precipitador Electrostático a Un Filtro de Mangas Pulse Jet En Centrales Térmicas Convencionales', *DYNA (Colombia)*, 83.195 (2016), 189–97
<<https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.49723>>
- Morales, CA Martínez, and ER Ramos Bastidas, 'Desarrollo de Un Prototipo de Filtro Electrostático Para Partículas de Co₂ Emitidas Por Automotores a Diésel', *Tesis*, 2017 <<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14043>>
- Morales, Henry Jeovany Saravia, 'ESTUDIO AMBIENTAL, TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS, EN PLANTA DE GENERACIÓN ARIZONA', 2008, 461
- Olavarría, Mario, "Plan de Mantenimiento de Precipitadores Electroestáticos de Una Planta de Celulosa .", *Universodad Del Bío-Bío*, 2014
- Pal, Anurag, Anuj Dixit, and Ashish Kumar Srivastava, 'Design and Optimization of the Shape of Electrostatic Precipitator System', *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 2021 <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.448>>
- PAULA ANDREA GONZALEZ RUIZ, 'PRECIPITADOR ELECTROSTATICO A ESCALA PILOTO PARA EL LABORATORIO DE AIRE DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA. PAULA', *Ayan*, 8.5 (2019), 55 <<http://hdl.handle.net/20.500.11912/6875>>
- Rodríguez, Juan Felipe, Uriel Faruk Alarcón Pinto, Olmer Garcia Bedoya, and Germán Benavides, 'Diseño y Prototipo de Un Precipitador Electrostático', *Revista Mutis*, 7.2 (2017), 86–95 <<https://doi.org/10.21789/22561498.1237>>
- Sudrajat, Agung, and Ahmad Fitri Yusof, 'Review of Electrostatic Precipitator Device for Reduce of Diesel Engine Particulate Matter', *Energy Procedia*, 68 (2015), 370–80 <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.268>>



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Valdivia, Planta, 'Precipitadores Electrostáticos', 2003

Wen, Tsrong-Yi, and Jiann-Lin Su, 'Corona Discharge Characteristics of Cylindrical Electrodes in a Two-Stage Electrostatic Precipitator', *Heliyon*, 6.2 (2020), e03334 <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03334>>

Zhang, Siyi, Wuxuan Pan, Hongsheng Zhang, Zhengwei Long, and Tao Yu, 'High-Efficient Removal of Airborne Oil Mist in a Wire-Plate Electrostatic Precipitator', *Journal of Electrostatics*, 108.October (2020), 103516 <<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103516>>

Zhang, Xiaobin, and Tianli Bo, 'The Effectiveness of Electrostatic Haze Removal Scheme and the Optimization of Electrostatic Precipitator Based on the Charged Properties of Airborne Haze Particles: Experiment and Simulation', *Journal of Cleaner Production*, 288 (2021), 125096 <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125096>>



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



ANEXOS

Anexo A. Código Processing

```
import processing.serial.*;

PImage img;

Serial myPort;

int val, cont = 0, x = 0;

float digito1, digito2, digito3, digito4, peso;

String Speso;

void setup() {

    size(800, 500);

    String portName = Serial.list()[0];

    myPort = new Serial(this, portName, 9600);

    img = loadImage("Unipamplona.png");

}

void draw(){

    image(img,0,0,800,500);

    if ( myPort.available() > 0) {

        val = myPort.read();

        if(x == 0){

            textSize(80); fill(0); text("¡NO PONER NINGUN", 40, 220);
```



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



```
text("OBJETO SOBRE", 115, 320); text("LA BASCULA!", 170, 420);

delay(5000);

}

if(x == 1){

    textSize(80); fill(0); text("SISTEMA DE PESAJE", 40, 220);

    strokeWeight (5);

    line(30,230,750,230);

    text("PESO", 70, 370); text("ACTUAL", 40, 440); text(":", 290, 390); text("Kg",
540, 390);

    cont = cont+1;

    if(cont == 1){digito1 = val;}

    if(cont == 2){digito2 = val;}

    if(cont == 3){digito3 = val;}

    if(cont == 4){digito4 = val;}

    peso = ((digito1*1000)+(digito2*100)+(digito3*10)+digito4)/1000;

    Speso = str(peso);

    fill(0,0,255);

    text(Speso, 310, 390);

    println(peso);

}

if(val == 44){cont = 0; x = 1; delay(1000);} }delay(50);}
```



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Anexo B. Código Arduino

```
#include "HX711.h"

const int DOUT=A1;

const int CLK=A0;

int peso;

int digito1, digito2, digito3, digito4;

HX711 balanza;

void setup() {

    Serial.begin(9600);

    balanza.begin(DOUT, CLK);

    balanza.set_scale(439430.25);

    balanza.tare(20);

}

void loop() {

    Serial.write(",");

    peso = balanza.get_units(20)*1000;

    digito1 = peso/1000;

    Serial.write(digito1);
```



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



```
digito2 = (peso-digito1*1000) /100;  
Serial.write(digito2);  
digito3 = ((peso-digito1*1000) /10)-digito2*10;  
Serial.write(digito3);  
digito4 = peso-digito1*1000-digito2*100-digito3*10;  
Serial.write(digito4);  
Serial.write(peso);  
delay(100);  
}
```

Librería HX711: <https://github.com/bogde/HX711>



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

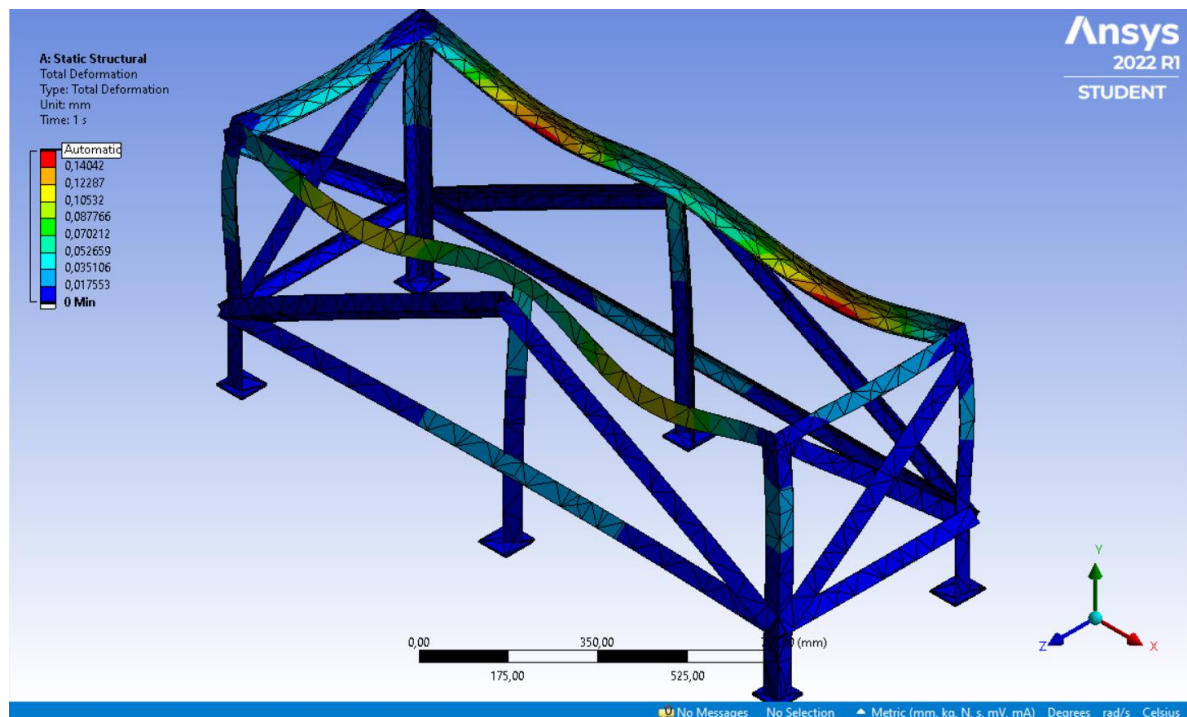
Anexo C. Simulación en ANSYS WORKBENCH

Para la validación de materiales aparte de analizar teóricamente su resistencias física y estructural se utilizó el programa ANSYS WORKBENCH versión estudiante el cual cuenta con características de análisis de deformación y análisis eléctrico.

Análisis de Deformación

Como se observa en la Figura 82, la deformación que ocurre en la base de soporte es mínima, llegando a su máxima deformación con aproximadamente una 1/10 parte de un milímetro como se observa en la Figura 83, constando así la excelente elección de este material como base de soporte para el sistema de precipitación

Figura 82 Simulación Deformación Total de la Base de Soporte



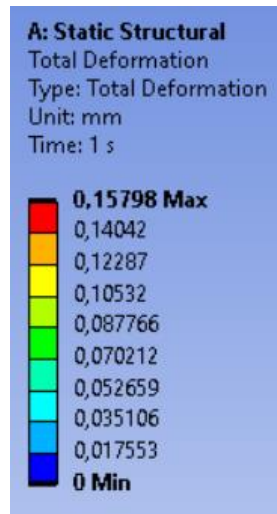
Fuente: Autor



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



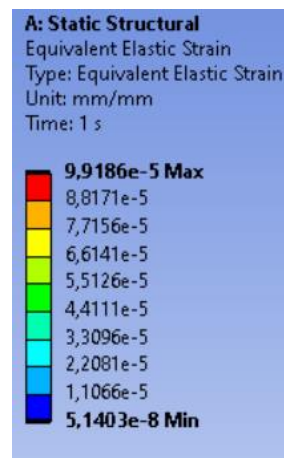
Figura 83 Resultado del Análisis de Deformación



Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 85, para enfatizar en la deformación de este realizó un análisis equivalente estático (Von-Misses) donde se detalla que la base de soporte con el peso del sistema precipitador no llega a a superar el máximo de tensión siendo así que bajo condiciones ideales este no presentará deformidad

Figura 84 Resultado del Análisis Equivalente Estático (Von-Mises)



Fuente: Autor



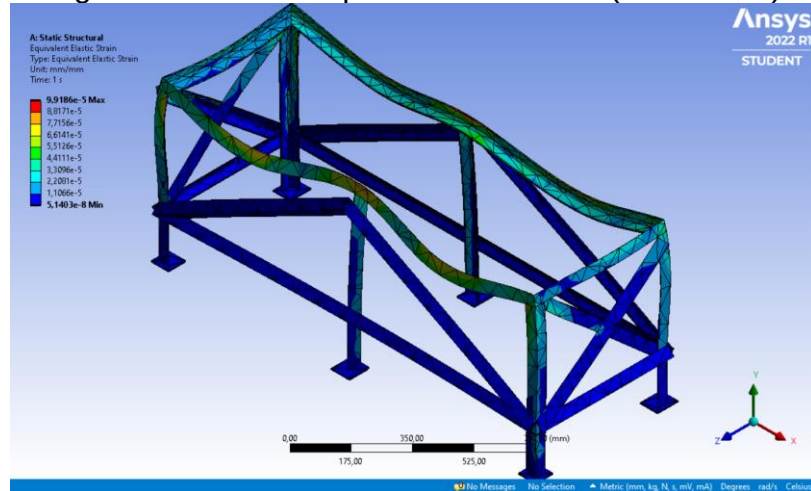
SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

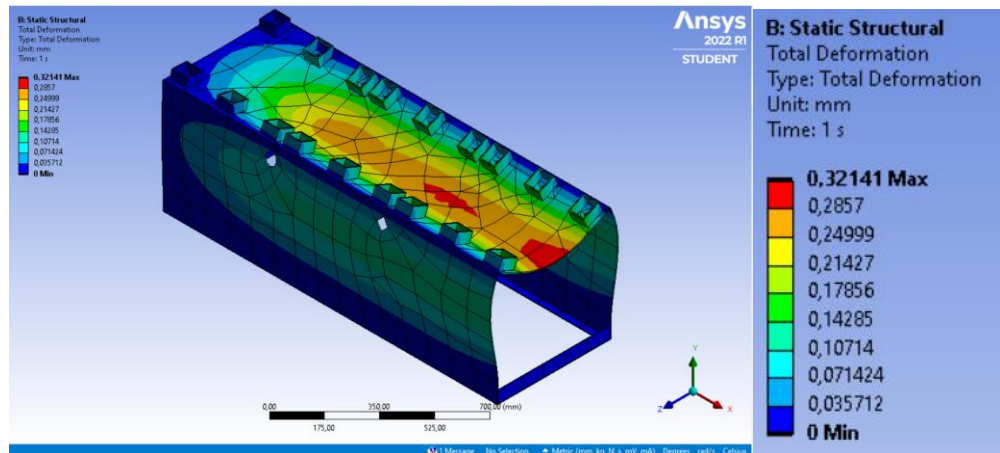
Figura 85 Análisis Equivalente Estático (Von-Mises)



Fuente: Autor

De la misma manera se realizaron análisis de deformación para la carcasa debido a que esta es la encargada de soportar todo el peso del sistema colector y los electrodos de descarga obteniendo una máxima deformación de 0.32mm aproximadamente

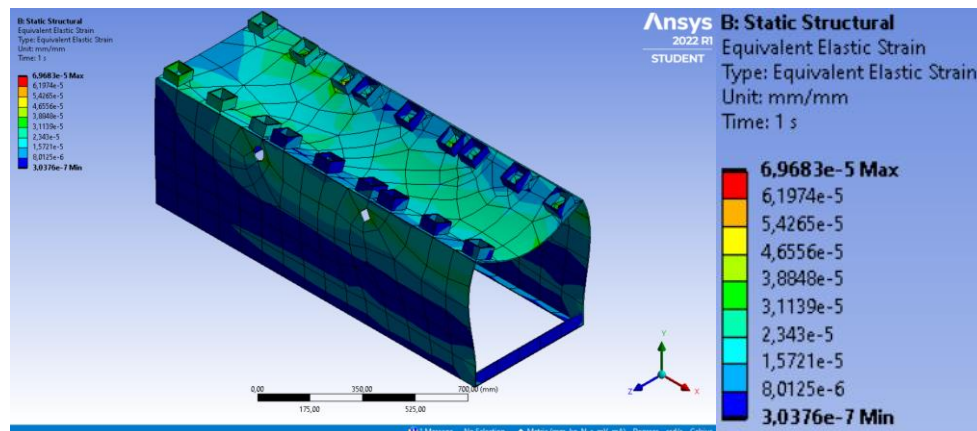
Figura 86 Análisis de Deformación de la Carcasa



Fuente: Autor

Dando así que para el caso de la carcasa la deformación máxima no se presenta porque este en su espacio de soporte no se supera su tensión elástica como se observa en la Figura 87.

Figura 87 Análisis Equivalente Estático (Von-Mises)

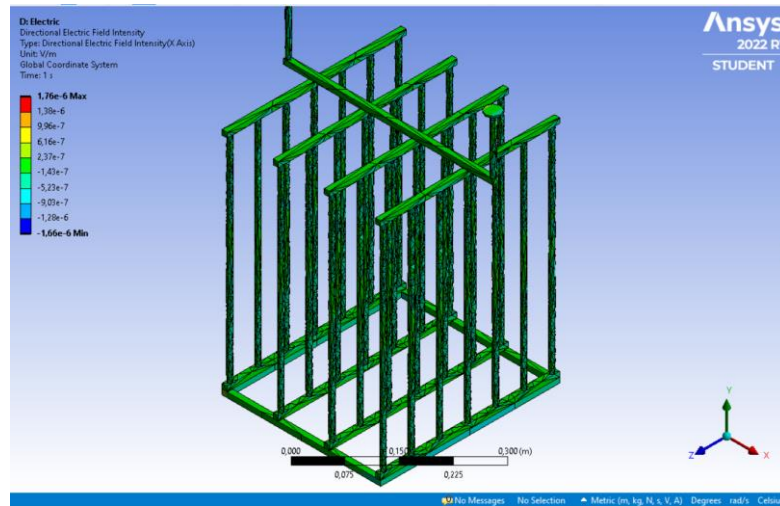


Fuente: Autor

Análisis Eléctrico

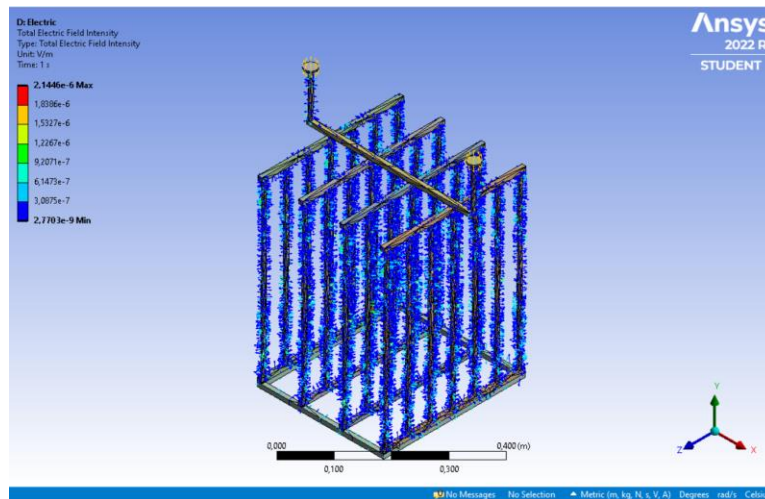
Con el análisis eléctrico se logró no solamente obtener la dirección en la cual se genera el campo eléctrico como se observa en la Figura 88, sino que además obtener la forma y la cantidad de intensidad con la que esta cuenta

Figura 88 Análisis de Intensidad del Campo Eléctrico



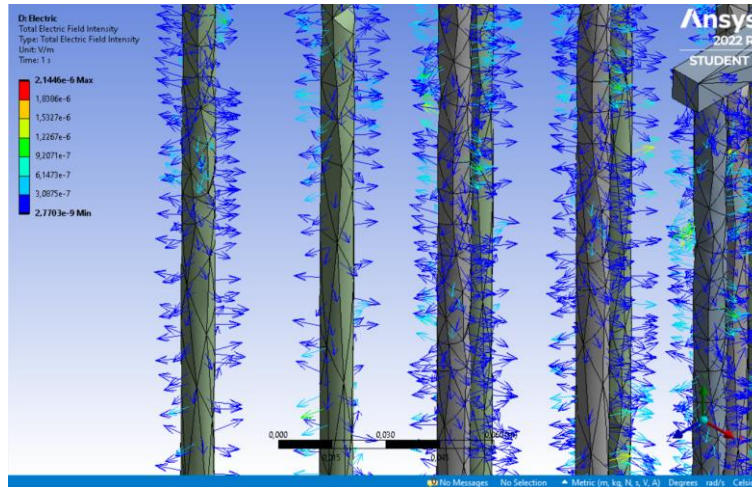
Fuente: Autor

Figura 89 Análisis de Generación de Líneas de Campo



Fuente: Autor

Figura 90 Análisis de Formación del Campo Eléctrico Perpendicular a él Electrodo de Descarga



Fuente: Autor