

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA EL CONTROL DE POLUCIÓN EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA.

Tesis presentada por el Bachiller:
Mamani Revilla, Josué Abel

Para optar el Título Profesional de:
Ingeniero Mecánico

Asesor:
Ing. Donayre Cahua, Jesús.
Ing. Castro Valdivia, Jorge.

Arequipa – Perú

2019



Universidad Católica de Santa María

☎ (51 54) 382038 Fax: (51 54) 251213 ✉ ucsm@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe Apartado: 1350

AREQUIPA - PERÚ

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA**

INFORME DICTAMINATORIO

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO:

**“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE
UN PRECIPITADOR ELECTROSTATICO PARA EL CONTROL DE
POLUCION EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA”**

Presentado por el Bachiller:

MAMANI REVILLA JOSUE ABEL

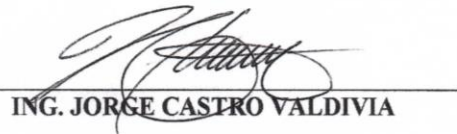
Nuestro **DICTAMEN** es:

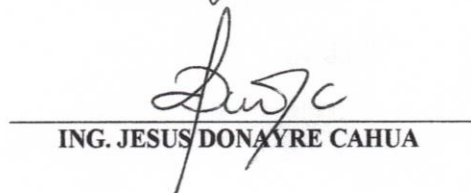
Para - a - Sustentación

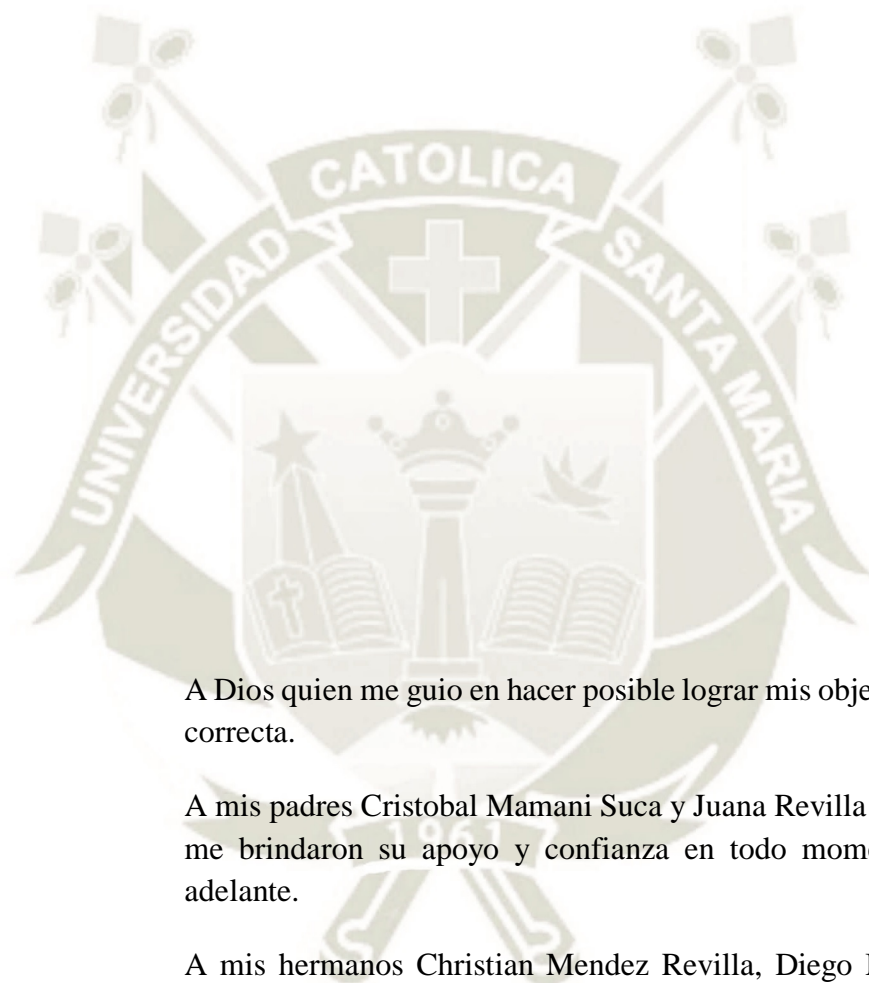
OBSERVACIONES: *A cuap la ni existi algunos error por*

*carregar, tracio lo comen esta concluido, la tesis esta
completa*

Arequipa, *12* *Julio* 201 *9*.


ING. JORGE CASTRO VALDIVIA


ING. JESUS DONAYRE CAHUA



A Dios quien me guio en hacer posible lograr mis objetivos de la forma correcta.

A mis padres Cristobal Mamani Suca y Juana Revilla Medina, quienes me brindaron su apoyo y confianza en todo momento para seguir adelante.

A mis hermanos Christian Mendez Revilla, Diego Mamani Revilla, Manuel Llerena Revilla, Carlos Llerena Revilla quienes me impulsaron a lograr el éxito profesional.

A nuestra madre tierra doña Gertrudes que nos ayuda, cuida y nos protege.

RESUMEN

En los últimos años los organismos ambientales y de salud han tomado de manera estricta el control de las emisiones de partículas que afectan al ambiente en general y al calentamiento global, emitidas por las industrias, ya sean de producción, extracción, manufactura, minería y agricultura.

En estos aspectos, el presente tema del diseño e implementación de un prototipo a escala de un precipitador electrostático para el control de polución en una industria cementera, esta es una solución para mitigar la emisión de material particulado en la carga, descarga y transferencia de material en las fajas transportadoras.

El presente tema no solo se enfoca en el control de la polución en una industria cementera sino también bajo el mismo principio y con una respectiva modificación, estudios, análisis y acondicionamiento del prototipo se logrará controlar la emisión de gases u/u otro material particulado producto de la combustión que son creadas por industrias manufactureras, acerías, carbón, sistemas generadores de energía eléctrica por combustión.

En el primer capítulo menciona la introducción de la presente tesis, la justificación de la investigación, limitaciones, objetivos generales y específicos.

En el segundo capítulo nos brinda el marco teórico de control de partículas, los tipos y sistemas recolectores de material particulado, bases teóricas del precipitador electrostático, ventajas con otros equipos, teoría de la precipitación electrostática, la teoría electrostática, parámetros del sistema y el diseño de un precipitador electrostático.

En el tercer capítulo menciona la descripción del supresor electrostático, el cual es el diseño del prototipo implementado e investigado en la presente tesis, el modo de operación, aplicación, datos técnicos, principio de precipitación, ventajas.

En el cuarto capítulo describe el detalle de la ingeniería de diseño del precipitador electrostático, memoria de cálculo, parámetros de diseño.

En el quinto capítulo se realiza la construcción del prototipo según los cálculos del cuarto capítulo, las dimensiones del equipo, el monitoreo y control el equipo.

En el sexto capítulo nos brinda el análisis, evaluaciones y puesta a prueba del equipo, simulaciones en software y las gráficas respectivas.

Finalmente se exhibe las conclusiones, recomendaciones, observaciones, planos, anexos y bibliografía de ayuda de la presente investigación realizada.

Palabras clave: Prototipo, precipitador electrostático, polución.



ABSTRACT

In recent years, environmental and health agencies have strictly taken control of the emissions of particles that affect the environment in general and global warming, issued by industries, whether production, extraction, manufacturing, mining and agriculture .

In these aspects, the present topic of the design and implementation of a prototype at the scale of an electrostatic precipitator for the control of pollution in a cement industry, this is a solution to mitigate the emission of particulate material in the loading, unloading and transfer of material in the conveyor belts.

The present issue not only focuses on the control of pollution in a cement industry but also under the same principle and with a respective modification, studies, analysis and conditioning of the prototype will control the emission of gases or other particulate material product of combustion that are created by manufacturing industries, steel mills, coal, systems that generate electric energy by combustion.

In the first chapter he mentions the introduction of the present thesis, the justification of the research, limitations, general and specific objectives.

In the second chapter it gives us the theoretical framework of particle control, the types and systems of particle collection, the theoretical basis of the electrostatic precipitator, advantages with other equipment, electrostatic precipitation theory, electrostatic theory, system parameters and design of an electrostatic precipitator.

In the third chapter he mentions the description of the electrostatic suppressor, which is the design of the prototype implemented and investigated in this thesis, the mode of operation, application, technical data, principle of precipitation, advantages.

In the fourth chapter describes the detail of the design engineering of the electrostatic precipitator, calculation memory, and design parameters.

In the fifth chapter the construction of the prototype is done according to the calculations of the fourth chapter, the dimensions of the equipment, the monitoring and control of the equipment.

In the sixth chapter, it provides us with the analysis, evaluations and testing of the equipment, software simulations and the respective graphs.

Finally, the conclusions, recommendations, observations, plans, annexes and help bibliography of the present investigation are displayed.

Keywords: Prototype, electrostatic precipitator, pollution.



ÍNDICE

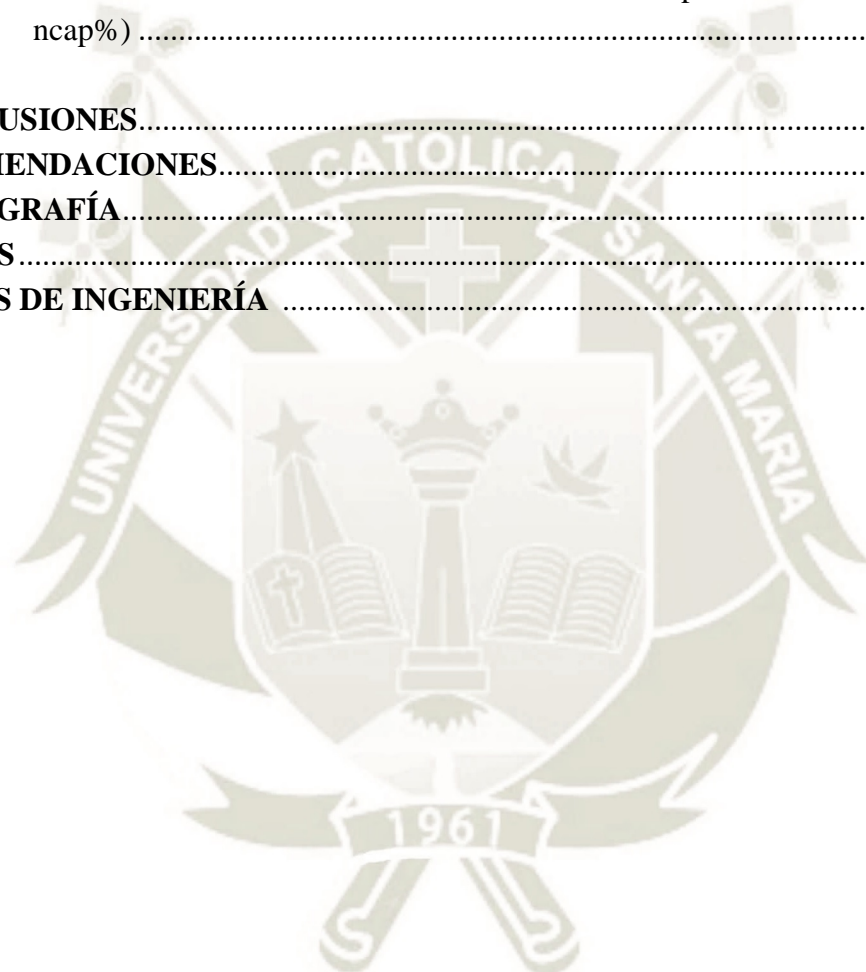
	Pág.
RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABLAS	xvi
LISTA DE ANEXOS	xvii
SIMBOLOGÍA	xviii
ABREVIATURAS	xxi
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2.1. Justificación Económica.....	2
1.2.2. Justificación Social.....	2
1.2.3. Justificación Tecnológica.....	3
1.2.4. Justificación Ecológica.....	3
1.3. LIMITACIONES.....	3
1.4. UBICACIÓN.....	3
1.5. OBJETIVOS.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
1.6. NORMAS TÉCNICAS Y ESPECIFICACIONES.....	6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. BASES TEÓRICAS DE CONTROL DE PARTÍCULAS.....	7
2.1.1. Control de Partículas.....	7
2.1.2. Material particulado.....	8
2.1.3. Calidad del aire y marco normativo.....	9
2.1.4. Material particulado emitido por industrias cementeras.....	11
2.1.4.1. Industria del cemento.....	11
2.1.4.2. Proceso de Manufactura del cemento.....	11
2.1.4.3. Polución en la industria del cemento.....	12
2.2. SISTEMAS Y TIPOS DE RECOLECTORES DE MATERIAL PARTICULADO.....	17
2.2.1. Ciclones.....	21
2.2.1.1. Descripción.....	21
2.2.1.2. Funcionamiento básico.....	22
2.2.1.3. Colección de emisiones alcanzadas.....	23
2.2.1.4. Ventajas.....	23
2.2.1.5. Desventajas.....	24

2.2.2. Colectores de mangas con limpieza mecánica.	24
2.2.2.1. Descripción.	24
2.2.2.2. Funcionamiento básico.	25
2.2.2.3. Colección de emisiones alcanzadas.	27
2.2.2.4. Ventajas.	27
2.2.2.5. Desventajas.	28
2.2.3. Colectores de mangas con limpieza tipo pulse-jet.....	28
2.2.3.1. Descripción.	28
2.2.3.2. Funcionamiento básico.	29
2.2.3.3. Colección de emisiones alcanzadas.	31
2.2.3.4. Ventajas.	31
2.2.3.5. Desventajas.	31
2.2.4. Precipitadores electrostáticos.	32
2.2.4.1. Descripción.	32
2.2.4.2. Funcionamiento básico.	33
2.2.4.3. Colección de emisiones alcanzadas.	34
2.2.4.4. Ventajas.	35
2.2.4.5. Desventajas.	36
2.3. COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.	36
2.4. PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.	38
2.4.1. Conceptos básicos.....	38
2.4.2. Tipos de precipitadores electrostáticos.....	41
2.4.2.1. Precipitador de placa-alambre.	41
2.4.2.2. Precipitador de placas paralelas.	43
2.4.2.3. Precipitador tubo-alambre.....	44
2.4.3. Sistema de acondicionamiento del gas entrante.	46
2.4.4. Sistemas y componentes del precipitador electrostático.	47
2.4.4.1. Estructura del precipitador.	47
2.4.4.2. Tolva.	47
2.4.4.3. Mecanismos de descarga.	48
2.4.4.4. Zona de tratamiento.	48
2.4.4.5. Electrodo de descarga.....	49
2.4.4.6. Electrodo de colección (colectores)	50
2.4.4.7. Aisladores.	51
2.4.4.8. Sacudidores y vibradores.	51
2.4.4.9. Transformador.	53
2.4.5. Teoría de la precipitación electrostática.	54
2.4.5.1. Ley de Coulomb y cargas eléctricas.	54
2.4.5.2. Campo eléctrico.	55
2.4.5.3. Movimiento de partículas cargadas en campos eléctricos.	57
2.4.5.4. Campo eléctrico de una varilla (electrodo).	58

2.4.5.5. Potencial eléctrico.....	59
2.4.5.6. Ionización y descarga de corona.....	61
2.4.5.7. Potencial eléctrico de varilla (electrodo)	61
2.4.5.8. Distribución del gas en el recorrido del precipitador.....	62
2.4.5.9. Ionización de las partículas.....	63
2.4.5.10.Recolección del polvo en los colectores tipo placa.	67
2.4.5.11.Descarga de partículas en las placas colectoras.....	69
2.4.5.12.Eficiencia del precipitador.....	69
2.4.5.13.Carga másica capturado en el precipitador electrostático.....	70
2.4.5.14.Área de recolección específica.	71
2.4.5.15.Mecanismos que afectan a la eficiencia de recolección.....	72
2.4.5.16.Efecto corona y corona inversa.....	75
2.4.5.17.Re-encauzamiento del polvo.....	77
2.4.5.18.Escabullimiento del polvo.	78
2.4.5.19.Curvas de voltaje-corriente.....	78
2.4.5.20.Distribución del flujo del material particulado.	79
2.4.5.21.Características del material particulado.....	79
2.4.5.22.Características de la corriente de Gas.	80
2.4.5.23.Tipo y selección de electrodo ionizante.....	80
2.4.6. Parámetros del sistema.	81
CAPITULO III: DISEÑO DEL SUPRESOR DE POLVO ELECTROSTÁTICO ...	84
3.1. CONDICIONES GENERALES.....	84
3.1.1. Descripción del supresor electrostático.....	84
3.1.2. Modo de operación.....	85
3.1.3. Aplicaciones de este sistema.	86
3.1.4. Datos técnicos.....	87
3.1.5. Principio de precipitación.....	87
3.1.6. Diseño de electrodos.....	88
3.1.7. Ventajas de este sistema de supresión de polvo.	89
3.1.8. Visión general de los factores de costo.	90
3.2. DISEÑO DEL SISTEMA.....	91
3.2.1. Volumen del aire – polvo.....	92
3.2.2. Cantidad de polvo a extraer.....	93
3.2.3. Eficiencia de captura.	95
3.2.4. Velocidad de captura del polvo.	96
3.2.5. Relación entre el campo eléctrico y la diferencia de potencial.	97
3.2.6. Carga eléctrica de la partícula.	100
3.2.7. Velocidad de migración de la partícula.	100
3.2.8. Tiempo de la partícula en recorrer hacia el colector.	101
3.2.9. Calculo del área del colector.	102

3.2.10. Cálculo de la longitud del precipitador.....	102
3.2.11. Características y rangos de los parámetros de diseño.....	105
CAPITULO IV: CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	106
4.1. CONSTRUCCIÓN DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.	106
4.1.1. Electrodo Ionizante.....	106
4.1.2. Placa colectora.....	108
4.1.3. Estructura.....	108
4.1.4. Soporte de la placa colectora.	110
4.1.5. Soporte de los electrodos ionizante.	111
4.1.6. Bastidor de faja transportadora y precipitador.	112
4.1.7. Pintado del equipo.	113
4.1.8. Montaje del equipo.....	114
4.2. CONTROL Y MONITOREO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.	115
4.2.1. Transformador Flyback.	115
4.2.2. Circuito eléctrico.	116
4.2.2.1. Circuito rectificador de corriente alterna (AC) a corriente directa (CD).	116
4.2.2.2. Circuito Regulador de Voltaje de entrada de corriente directa (DC). 117	117
4.2.2.3. Circuito elevador de frecuencia (Hz).....	118
4.2.2.4. Circuito general.....	120
4.2.3. Tablero eléctrico.	120
4.2.3.1. Construcción del circuito.....	121
4.2.4. Controlador digital.....	124
4.2.5. Cables.	126
4.2.6. Interruptores de encendido.	126
4.2.7. Circuito de control de alta diferencia de potencial CXDZ.	127
4.2.7.1. Usos de este suministro de energía.	128
4.2.7.2. Especificaciones del suministro de energía.	128
CAPITULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIONES	130
5.1. SIMULACIÓN DEL ELECTRODO.....	130
5.2. PUESTA A PRUEBA DEL PRECIPITADOR.	133
5.2.1. Prueba del PES con humo.	133
5.2.2. Prueba del PES con polvo de cemento.	133
5.3. ANÁLISIS.....	135
5.4. GRÁFICAS.....	137
5.4.1. Gráfica Distancia en cualquier punto entre el electrodo y el colector VS intensidad del campo eléctrico.....	137
5.4.2. Gráfica Diferencia de potencial VS Intensidad de campo eléctrico.....	138

5.4.3. Gráfica diferencia de potencial VS velocidad de migración hacia la placa colectora (V_{ab} VS W).....	139
5.4.4. Gráfica diferencia de potencial VS tiempo en migrar hacia la placa colectora (V_{ab} VS t).....	140
5.4.5. Gráfica diferencia de Potencial VS Flujo másico capturado en el PES (V_{ab} VS m_{cap}).....	141
5.4.6. Gráfica diferencia de Potencial VS Flujo másico en la salida del PES (V_{ab} VS m_{sa}).....	142
5.4.7. Gráfica diferencia de Potencial VS eficiencia de captación del PES (V_{ab} VS $n_{cap}\%$)	143
CONCLUSIONES	144
RECOMENDACIONES	145
BIBLIOGRAFÍA	146
ANEXOS	149
PLANOS DE INGENIERÍA	182



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa geográfico de la industria cementera Yura S.A.	4
Figura 2. Proceso productivo del cemento	12
Figura 3. Contaminantes atmosféricos en las industrias del cemento.	16
Figura 4. Tamaños y características de las partículas.....	19
Figura 5. Esquema de un dispositivo de control de emisión del aire.	21
Figura 6. Funcionamiento de un ciclón.	22
Figura 7. Funcionamiento de un colector de mangas con limpieza de sacudido mecánico. ...	26
Figura 8. Localización del ventilador según las características del material.	26
Figura 9. Funcionamiento de un colector de mangas con limpieza tipo pulse-jet	30
Figura 10. a) Limpieza del filtro del material particulado; Fuente: Fernández, 2008, pág. 36 b) Inyección de aire comprimido dentro del filtro. Fuente: AAF International, 2018.....	30
Figura 11. Funcionamiento básico de un precipitador electrostático.	34
Figura 12. Distribución del material particulado en un PES.....	35
Figura 13. Partes de un precipitador electrostático.	36
Figura 14. Sistema de un colector de polución.....	38
Figura 15. Funcionamiento básico de un precipitador electrostático.	41
Figura 16. Configuración placa-alambre.....	42
Figura 17. Configuración placa plana planas paralelas.	44
Figura 18. Configuración tubo-alambre.	45
Figura 19. Equipo auxiliar para el control de MP. (Referencia 10)	46
Figura 20. Componentes de un PES	48
Figura 21. Sistema del electrodo sin estabilización adecuada.....	49
Figura 22. Sistema del electrodo con marco rígido.....	50
Figura 23. Aisladores típicos	51
Figura 24. Vibradores para el sacudido	51
Figura 25. Mecanismo de sacudido	52
Figura 26. Interacción de cargas puntuales	55
Figura 27. Fuerza y campo eléctrico en una carga de prueba.....	56
Figura 28. Líneas de campo para diferentes distribuciones de carga.	57
Figura 29. Movimiento de la partícula cargada.....	57
Figura 30: Esquema de la varilla (electrodo).....	59
Figura 31. Potencial eléctrico en cargas positivas y negativas.	60
Figura 32. Campo eléctrico afuera de a) un alambre largo con carga positiva. b) un cilindro con carga positiva.....	61
Figura 33. Distribución del polvo y niveles de voltaje.....	62
Figura 34. Efecto corona	64
Figura 35. Líneas de campo eléctrico a) partícula descargada. b) partícula con carga de saturación	65

Figura 36. Efecto de la temperatura y el contenido de humedad sobre la resistividad aparente del polvo de cemento precipitado.	75
Figura 37. a) Formación de la capa de polvo de alta resistencia b) Efecto corona inversa, ruptura dieléctrica.	76
Figura 38. Relación de la ley de ohm en la capa de polvo.	77
Figura 39. Curvas Normales de Voltaje-Corriente del precipitador (V-I).	78
Figura 40. Curvas Anormales de V-I del precipitador.	79
Figura 41. Características tensión-corriente de diversos tipos de electrodos de descarga.	81
Figura 42. Supresor de polvo electrostático	85
Figura 43. Instalación del Supresor de polvo electrostático.....	86
Figura 44. Ionización de las partículas por el efecto electrostático.....	88
Figura 45. Tipos de Electrodos.....	89
Figura 46. Electrodo tipo S.....	89
Figura 47. Diseño del precipitador electrostático.....	92
Figura 48. Ionización de las partículas.	97
Figura 49. Dimensiones según tamaño de faja transportadora.....	98
Figura 50. Radios del Electrodo, colector y radio de intensidad de campo eléctrico.....	99
Figura 51. Dimensiones del colector.	103
Figura 52. Tubo del electrodo	107
Figura 53. Plancha de forma estrellada	107
Figura 54. Configuración de electrodo.....	107
Figura 55. Placa cilíndrica colectora	108
Figura 56. Bastidor de faja modelo	108
Figura 57. Estación de polines.....	109
Figura 58. Fabricación de polines	109
Figura 59. Estación de polines y bastidor.....	110
Figura 60. Soporte de placa colectora	110
Figura 61. Ensamble de estación de polines, bastidor e soporte de palca colectora	111
Figura 62. Soporte de electrodo.....	111
Figura 63. Aislante de electrodo Fuente: Propia, 2018	112
Figura 64. Estructura base del precipitador electrostático.....	112
Figura 65. Ensamble de estructura base del precipitador electrostático.....	113
Figura 66. Pintado de estructura base del precipitador electrostático	113
Figura 67. Montaje de precipitador electrostático.....	114
Figura 68. Flyback.....	115
Figura 69. Rectificador de AC a DC	117
Figura 70. Regulador de voltaje	118
Figura 71. Elevador de frecuencia.....	119
Figura 72. Circuito general.....	120
Figura 73. Tablero/Caja para circuito.....	120
Figura 74. Placa perforada para circuito.....	121
Figura 75. Construcción de circuito de AC a DC.....	121
Figura 76. Construcción de circuito regulador de voltaje	122
Figura 77. Construcción de circuito elevador de frecuencia	122

Figura 78. Circuito instalado en tablero	123
Figura 79. Circuito de control de PES.....	123
Figura 80. Cara exterior del tablero.....	124
Figura 81. Mini voltímetro digital	125
Figura 82. Tablero cara exterior	125
Figura 83. Cable de alta tensión.	126
Figura 84. Interruptores de encendido.....	127
Figura 85. Control de suministro de energía	129
Figura 86. Dibujo del electrodo en cad	130
Figura 87. Simulación del electrodo vista ISO.....	131
Figura 88. Simulación del electrodo vista lateral	131
Figura 89. Simulación del electrodo vista lateral y líneas de campo eléctrico.....	132
Figura 90. Puesta en marcha precipitador electrostático.	134
Figura 91. Ancho de faja	135
Figura 92. Distancia en cualquier punto entre el electrodo y el colector VS intensidad del campo eléctrico.	137
Figura 93. Diferencia de potencial VS Intensidad de campo eléctrico.	138
Figura 94. Diferencia de potencial VS velocidad de migración hacia la placa colectora (Vab VS W).	139
Figura 95. Diferencia de potencial VS tiempo en migrar hacia la placa colectora (Vab VS t)	140
Figura 96. Diferencia de Potencial VS Flujo másico capturado en el PES (Vab VS mcap).....	141
Figura 97. Diferencia de Potencial VS Flujo másico en la salida del PES (Vab VS msa)...	142
Figura 98. Diferencia de Potencial VS eficiencia de captación del PES (Vab VS ncap).....	143

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1	Clasificación del material particulado.....8
Tabla 2	Tamaños típicos de emisiones atmosféricas9
Tabla 3	Límites máximos permisibles de emisiones gaseosas y de partículas para actividades de hidrocarburos..... 11
Tabla 4	Factores de emisión de polvo..... 13
Tabla 5	Niveles de emisión de polvos en las fábricas de cemento exigidos en la legislación extranjera..... 14
Tabla 6	Composición típica del polvo de cemento 15
Tabla 7	Factores a considerar en el diseño del MP 18
Tabla 8	Tabla de eficiencia según el tipo de ciclón 23
Tabla 9	Relaciones de aire/tela para diferentes colectores de polvo.....27
Tabla 10	Eficiencias de los colectores de MP.....37
Tabla 11	Valores típicos de un T/R en un precipitador electrostático53
Tabla 12	Valores típicos de velocidades de migración encontrados en la práctica industrial68
Tabla 13	SCAs pequeñas, medianas y grandes en varias unidades 72
Tabla 14	Costos de operación según otros equipos de supresión de polución.....91
Tabla 15	Caudal de aire extraído por equipo.93
Tabla 16	Concentración de polvo por equipo.94
Tabla 17	Rango de velocidades de captura.96
Tabla 18	Dimensiones del equipo según tamaño de ancho de banda.98
Tabla 19	Características del equipo Rangos y parámetros de diseño 105
Tabla 20	Datos de entrada para el diseño del PES 136
Tabla 21	Datos de salida del diseño del PES 136
Tabla 22	Distancia en cualquier punto entre el electrodo y el colector VS intensidad del campo eléctrico. 137
Tabla 23	Diferencia de potencial VS Intensidad de campo eléctrico. 138
Tabla 24	Diferencia de potencial VS velocidad de migración hacia la placa colectora (Vab VS W). 139
Tabla 25	Diferencia de potencial VS tiempo en migrar hacia la placa colectora (Vab VS t)..... 140
Tabla 26	Diferencia de Potencial VS Flujo másico capturado en el PES (Vab VS mcap)..... 141
Tabla 27	Diferencia de Potencial VS Flujo másico en la salida del PES (Vab VS msa)... 142
Tabla 28	Diferencia de Potencial VS eficiencia de captación del PES (Vab VS ncap)..... 143

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Estándares de Calidad Ambiental para Aire	150
Anexo 2: Límite permisible (LMP) para emisiones de los hornos de la industria cementera del Perú	151
Anexo 3: Límites máximos permisibles de emisiones gaseosas y de partículas en actividades o instalaciones de hidrocarburos nuevas	151
Anexo 4: Emisiones puntuales y dispersas dentro del proceso de fabricación de Clinker por las diferentes vías	152
Anexo 5: Procesos de una industria cementera.....	152
Anexo 6: Factores de emisión en la industria del cemento.....	153
Anexo 7: Características de las partículas según el tipo de colector.....	156
Anexo 8: Tamaño y área de placas recolectores.....	157
Anexo 9: Velocidad de flujo.....	163
Anexo 10: Cálculos de la caída de presión.....	164
Anexo 11: Diseño de la estructura de soporte del precipitador electrostático.....	165
Anexo 12: Unión por soldadura en la estructura.....	170
Anexo 13: Manual de la fuente de energía CX-300A.....	171
Anexo 14: Aislamiento entre el electrodo, placa colectora y estructura.....	175
Anexo 15: Modo de operación.....	176
Anexo 16: Precipitador Electrostatico	178

SIMBOLOGÍA

EPA	Environment Protection Agency (Agencia de protección Ambiental)
DS	Decreto supremo
MP	Material particulado
PM10	Material particulado con tamaño de 10 μm
PM2.5	Material particulado con tamaño de 2.5 μm
E	Emisión de contaminante estimado t/año.
FE	Factor de emisión (según tablas - anexo 2).
PA	Producción Anual declarada de la industria cementera t/año.
n_c	Eficiencia de colección.
MP_C	Razón de MP colectada.
MP_e	Razón de MP entrante.
m_i	Carga másica o concentración de MP a la entrada del dispositivo.
m_s	Carga másica o concentración de MP a la salida del dispositivo
PES	Precipitador electrostático
T/R	Transformador-Rectificador
CD	Corriente Directa
CA	Corriente Alterna
F	Magnitud de la fuerza de cada carga
q_1	Carga puntual uno
q_2	Carga puntual dos
k	Constante de proporcionalidad denominada constante eléctrica del vacío
r_q	Distancia de separación entre cargas puntuales
ϵ_0	Constante dieléctrica del medio
E	Intensidad de campo eléctrico
q_0	Carga de prueba
a	aceleración en dirección que la fuerza externa
m	masa del cuerpo
λ	Densidad lineal de carga
L	Longitud de la varilla
x	Distancia entre la varilla y el campo eléctrico en cualquier punto de las proximidades del objeto.

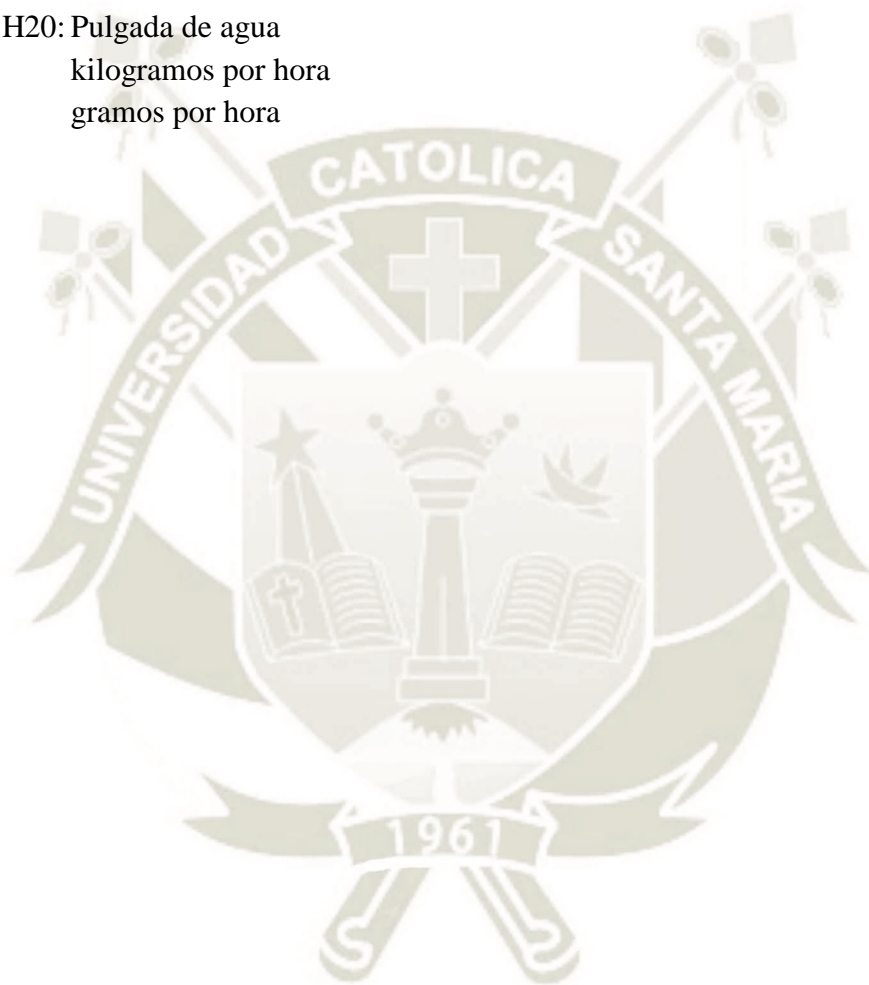
Π	Pi (3.1416)
V	Potencial que experimenta un cuerpo cargado
U	Energía.
q	Carga puntual
r	Distancia de la carga puntual
$V_a - V_b$	Diferencia de potencial entre los puntos a y b
r_b	Distancia radial más lejano
r_a	Distancia radial más cercano
$\ln()$	Logaritmo natural
d	Diámetro de la partícula
q_c	Carga por campo
q_d	Carga por difusión
T	Temperatura absoluta
q_e	Carga del electrón
K	Constante de boltzmann
Q_{total}	Carga total
W	Velocidad de migración
q_t	Carga total de la partícula
μ	Viscosidad dinámica del gas
A	Área de la placa de recolección efectiva del PES
Q	Razón de flujo de gas a través del PES
e	Base de logaritmo natural ≈ 2.718
m	Constante
SCA	Área de recolección específica en el SI
E_d	Campo eléctrico en la capa de polvo
ρ_d	Resistividad de la capa de polvo
i_d	Intensidad de corriente en la corona
E_{db}	Campo de ruptura de la capa de polvo
p	Inserción de diseño
S_N ,	Escabullimiento
RR	Reintroducción por golpeteo
MMD:	Distribución del tamaño del material
MMDi	Distribución del tamaño del material en la entrada
MMD _p	Distribución del tamaño del material por inserción

E_{bd}	Campo eléctrico al centellar
LF	Factor de pérdida
E_{avg}	Campo con o sin corono invertida
p_s	Inserción promedio
p_c	Inserción de la sección de recolección
ESCA	Área de recolección específica en unidades inglesas
v_{gas}	velocidad del gas
B	anchura de la entrada del PES
H	Altura de la entrada del PES
C_i	Concentración de material en la entrada
C_s	Concentración de material en la salida
C	Concentración de material (polvo)
m_{cap}	Razón de masa capturada
s	Distancia en recorrer la partícula
v_0	Velocidad inicial
v_f	Velocidad final
t	tiempo
Y	Longitud de la superficie colectora

ABREVIATURAS

µm:	micrómetros
mg/m ³ :	miligramos por metro cubico
g/m ³ :	Gramo por metro cubico
g/m ³ N:	Gramo por metro cubico en condición normal
kW:	kilowatt
HP:	Horse power
m ³ /h:	metros cúbicos por hora
kg:	kilogramos
°C:	Grados centígrados
m ² :	metro cuadrado
m ³ /s:	metro cúbico por segundo
m ³ /h:	metro cubico por hora
scfm:	pies cúbicos por minuto standard (pie ³ /min)
pie ³ /min:	pie cubico por minuto.
m/s:	metros por segundo
m/min:	metro por minuto
pie/s:	pie por segundo
m/s ² :	metro por segundo al cuadrado
ft/s:	pie por segundo
kPa:	kilo Pascal
psig:	Libras por pulgada cuadrada gravimétrico
s:	segundo(s)
pulg:	pulgada (s)
cm:	centímetro(s)
kV:	kilo Volt
VCA:	Volt en Corriente Alterna
CD:	Corriente Directa
kVCD:	kilo Volt en Corriente Directa
mm:	milímetros
m:	metros
mA:	miliamperio
N:	Newton
C:	Coulomb
Nm ² /C ² :	Newton metro cuadrado por coulomb cuadrado
C ² /Nm ² :	Coulomb cuadrado por Newton metro cuadrado
N/C:	Newton por Coulomb
V/m:	Volt por metro
J/C:	Joule por Coulomb
J:	Joule
K:	Kelvin
J/K:	Joule por Kelvin
Pa s:	Pascal segundo

s/m:	segundo por metro
s/pie:	segundo por pie
Pie ² /kacfm:	Pie cuadrado por kilo pie cubico por minuto
Ω cm:	Ohmio centímetro
cm ³ :	centímetro cubico
A/m ² :	Amperio por metro cuadrado
Ω /m:	ohmio por metro
kg/ms :	Kilogramo por metro segundo
Pa:	Pascal
Pulg. De H ₂ O:	Pulgada de agua
kg/h:	kilogramos por hora
g/h:	gramos por hora



CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES.

El control de las emisiones de material particulado de las industrias ha sido de mucha importancia a partir del siglo XX, por lo cual se ha llevado a controlar y a reducir dichas emisiones de partículas creando así colectores de partículas eficaces para que las emisiones sean reducidas a rangos mínimos dados por organismo mundiales ambientales y de salud, ya que este problema se ve afectado tanto al personal de trabajo, alrededores, visibilidad, campos abiertos, animales, vegetación, cultivos agrícolas, maquinas, infraestructura, ambientes de trabajo y al medio ambiente.

Debido a las nuevas tendencias que se presenta actualmente en salud, seguridad, control de procesos y a las nuevas legislaciones que se aprueban cada año para evitar un daño ocasionado tanto personal como ambiental, es por eso que las compañías se han comprometido a optar por nuevas tecnologías que permiten operar y mejorar la eficiencia de sus equipos, con el fin de reducir emisiones y al mismo tiempo optar por soluciones que favorezcan una relación de inversión/beneficio adecuado para evitar dichas emisiones.

En las industrias cementeras se ve en la actualidad que existe mucha demanda de emisiones de material particulado, ya que el cemento es un material inorgánico finamente molido y para obtener el producto final debe pasar por diferentes procesos y etapas donde se observa emisiones de material particulado (polvo) que esto se puede visualizar en las zonas de extracción, trituración del material, almacenamiento por derrame, transición de máquina a máquina, descarga y carga de material y producto de procesos.

Po lo tanto, es así que la presente tesis se optó por el diseño e implementación de un prototipo a escala de un precipitador electrostático para el control de polución en una industria cementera, lo cual busca una reducción a rangos estandarizados mínimos de material particulado.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

1.2.1. Justificación Económica.

Al implementar una maquina colector 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.

Para 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.

1.2.2. Justificación Social.

En primera instancia beneficiara 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 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.

1.2.3. Justificación Tecnológica.

Hoy en día se ve avances en nuevas tecnologías 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 polución en industrias, el cual esto tiende a incentivar y mejorar nuevos métodos de control de material particulado a futuro.

1.2.4. 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.

1.3. LIMITACIONES.

- La mayor limitación es la obtención de valores reales en la medición de la cantidad de polución en un determinado volumen.
- Como limitación de la investigación se tiene que no se podrá contar con dispositivos medidores de material particulado y compuestos que contiene el polvo de cemento, pero se hará lo posible para contar con uno de ellos.
- Otra limitación es la visibilidad del campo eléctrico generado entre el electrodo ionizante y las placas colectoras ya que estas líneas de campo son invisibles, pero por estudios de física electrostática y la matemática vectorial se logra ver como son las líneas de campo.

1.4. UBICACIÓN.

Departamento de Arequipa

Arequipa es la ciudad con mayor índice de desarrollo del Sur del Perú, cuenta con 1 316 000 habitantes según INEI en el año 2019, la superficie que ocupa es de 9862 km².

Datos Ambientales:

Temperatura promedio: 20 °C

Presión: 77 kPa (abs)

Humedad relativa: 32%

Viento: 10 km/h SUR

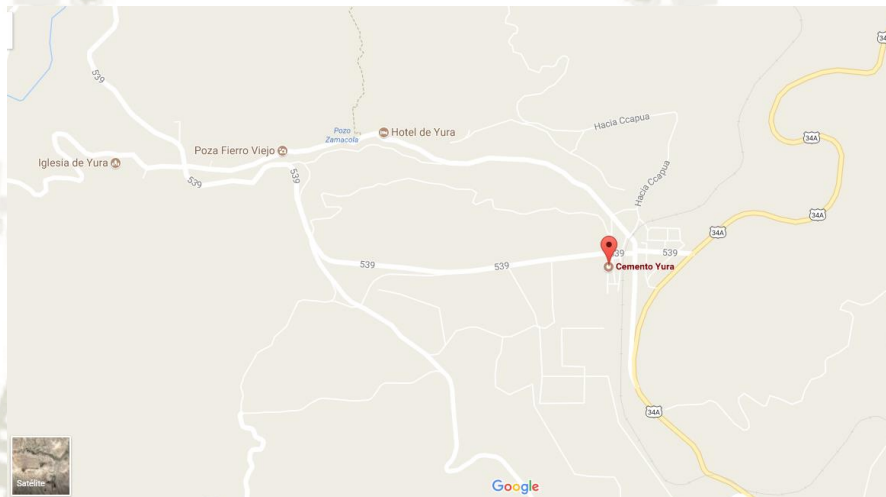


Figura 1. Mapa geográfico de la industria cementera Yura S.A.
Fuente: Google Maps

DATOS GEOGRÁFICOS:

La región de Arequipa se encuentra ubicada al Sur-Oeste del Perú, a una altura de 2335 m.s.n.m.

Latitud Sur: 14°36'006'' y 17°16'54''

Latitud Oeste: 70°50'24'' y 75°05'52''

El departamento de Arequipa limita por el Este con los departamentos de Puno y Moquegua, por el Norte con los departamentos de Ica, Ayacucho, Apurímac y Cusco, por el Sur y Oeste con el Océano Pacífico.

1.5. OBJETIVOS.

1.5.1. Objetivo General.

- Elaborar el diseño e implementación de un prototipo a escala de un precipitador electrostático para el control de polución en una industria cementera.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Revisar los principios de la física electrostática para su aplicación en los precipitadores electrostáticos.
- Evaluar qué tipo de precipitador electrostático es más eficiente según la aplicación a la cual se debe de aplicar.
- Seleccionar y estudiar fórmulas teóricas que expliquen el principio de funcionamiento básico de un precipitador electrostático.
- Diseñar el precipitador electrostático según los resultados teóricos obtenidos.
- Cumplir con la normativa vigente dadas por entidades ambientales según rangos permisibles de polución en industrias cementeras y aplicarlo en el diseño del precipitador.
- Construir el prototipo basado en los cálculos de ingeniería de diseño e implementarlos en el modelo físico del precipitador electrostático.
- Realizar ensayos que permitan analizar su funcionamiento y generar posibles cambios y/o recomendaciones.

1.6. NORMAS TÉCNICAS Y ESPECIFICACIONES.

- **DS N° 003-2017-MINAM**

Estándares de calidad ambiental (ECA) para aire y establecen disposiciones complementarias.

- **DS N° 009-2003-SA**

Reglamento de los niveles de estados de alerta nacionales para contaminantes del aire.

- **DS N° 074-2001-PCM**

Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire.

- **DS N° 003-2002-PRODUCE**

Límites máximos permisibles y valores referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel.

- **RM N° 315-96-EM/VMM**

Niveles máximos permisibles de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero-metalúrgicas.

- **DS N° 062-2010-EM**

Límites máximos permisibles para las emisiones gaseosas y de partículas de las actividades del sub sector hidrocarburos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. BASES TEÓRICAS DE CONTROL DE PARTÍCULAS.

En el presente capítulo se verá las bases teóricas sobre las emisiones de material particulado, las normas y los rangos permisibles emitidos por entidades ambientales, también se estudiará las características que emite la polución en las industrias cementeras, los diversos métodos y sistemas de captación de partículas, ya sean como los ciclones, colectores de mangas con limpieza mecánica, colectores de mangas con limpieza tipo pulse-jet y los precipitadores electrostáticos.

2.1.1. Control de Partículas.

El control de las emisiones de partículas contaminantes ha sido actualmente una tendencia a nivel mundial ya que, la contaminación del aire puede ser definida como gases dañinos o partículas en la atmósfera externa en concentraciones lo suficientemente altas para ser dañinas a la salud humana o al bienestar, a las plantas, a los animales o las cosas; o simplemente el causar la interferencia con el disfrute normal de la vida o propiedad (Fernandez, 2008).

Por lo tanto, para estudiar este caso se necesita una exhaustiva investigación ya sean en las características del contaminante, de las fuentes generadoras de estas partículas, los cambios que surgen al ser arrastrado por las corrientes de aire en ductos que son influidas por los cambios en las propiedades termodinámicas, la composición y reacciones químicas que se presenta. Sabiendo cómo se comporta de forma natural las emisiones de material particulado se logra realizar y seleccionar un correcto diseño para controlar estas partículas emitidas. Sin embargo las emisiones en el ambiente pueden provenir de fuentes naturales o causadas por el hombre, las naturales son aquellas provenientes de la misma tierra, por ejemplo los volcanes, los vientos que arrastran la tierra y forman polución ocasionando visibilidad en las ciudades cercanas.

Las fuentes ocasionadas por el hombre causan más impacto e incrementan el deterioro del planeta, ya que estos pueden ser gases de industrias altamente dañinos, el transporte

vehicular, material particulado formado en el proceso de extracción y el procesamiento de minerales en minerías e industrias (Sagástegui, 2012).

2.1.2. Material particulado.

El material particulado se considera que son sustancias solidas o liquidas diversas que están en suspensión combinadas con el aire, para organismos internacionales consideran que los tamaños con diámetros nominales de material particulado son PM10 y PM2.5, los cuales corresponde a tamaños de 10 μ m (MP gruesa) menores o iguales y 2.5 μ m (MP fina) menores o iguales.

Tabla 1

Clasificación del material particulado

Clasificación del material particulado	Diámetros de partículas (μ m)
Partículas suspendidas totales (PM) ó (PST)	100
PM 10	< 10
PM 2.5	< 2.5
PM 1	< 0.1

Fuente: Caldas, 2017, pág. 3

Cuanto menor sea una partícula, más tiempo permanecerá en suspensión y por consiguiente podrá ser transportada a mayores distancias, partículas muy pequeñas pueden, en la práctica, no sedimentar nunca en una atmósfera seca. Ya en atmósferas húmedas pueden actuar como núcleos de condensación de humedad y precipitar con la lluvia. Dependiendo de su composición química pueden llevar contaminación al suelo y a las aguas (Fernandez, 2008, págs. 3,4).

Los focos de estas emisiones y los tamaños de partículas son emitidas por industrias cementeras, minerías, industrias, el transporte vehicular en general, construcciones y extracciones de materiales.

Todas estas fuentes de emisión traen consigo composiciones químicas que afectan a los seres vivos y al medio ambiente. A continuación se mostrará en la tabla 2 tamaños típicos de emisiones atmosféricas.

Tabla 2

Tamaños típicos de emisiones atmosféricas

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

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 4

Al observar estas emisiones de partículas de diferentes fuentes causan enfermedades en los humanos, mucho de los casos causan males respiratorios y cardiovasculares, debido al tamaño de estas que pueden ingresar fácilmente al sistema respiratorio y así dañando a los pulmones y el resto del organismo.

2.1.3. Calidad del aire y marco normativo.

Los estándares y la calidad del aire están regulados por normas nacionales e internacionales. Las normas de calidad del aire ambiental son las *concentraciones* aceptables de contaminación en la atmosfera, mientras que las *tasas* de emisión son índices aceptables dentro de los cuales, las fuentes pueden liberar los agentes contaminantes (Masters & Wendell , 2008).

Las normativas y los estándares de la calidad del aire en Sudamérica están dados por el organismo internacional que es la Agencia para la Protección Ambiental (*Environment Protection Agency – EPA*) de los Estados Unidos.

Actualmente en el Perú el encargado de controlar y promover los efectos ambientales y las emisiones es el Ministerio de Ambiente, los cuales recopilan información, estandarizan y especifican límites máximos de otros reglamentos internacionales para reducir las emisiones a valores que estén dentro del rango dado.

Entidades nacionales que relacionan la calidad del aire:

- MINAM: Ministerio del Ambiente.
- DIGESA: Dirección General de Salud Ambiental.

- CONCYTEC: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Los gobiernos regionales y los Municipios encargados de fomentar conciencia ambiental.

Los reglamentos internos han creado decretos que promueven estándares de emisiones para el sector de industrias y minerías.

- DS N° 003-2017-MINAM: Estándares de calidad ambiental (ECA) para aire y establecen disposiciones complementarias (Anexo 1).
- DS N° 074-2001-PCM: Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire. Tiene como objetivo proteger la salud de las personas.
- DS N° 003-2002-PRODUCE: Límites máximos permisibles y valores referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel. Este decreto emite Límites Máximos Permisibles ambientales (Anexo 2).
- DS N° 009-2003-SA: Reglamento de los niveles de estados de alerta nacionales para contaminantes del aire.
- RM N° 315-96-EM/VMM: Niveles máximos permisibles de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero-metalúrgicas.
- DS N° 062-2010-EM: Límites máximos permisibles para las emisiones gaseosas y de partículas de las actividades del sub sector hidrocarburos (Anexo 3).

Para todas las plantas o unidades, las emisiones de PM (material particulado de todos los tamaños) no deben exceder 50 mg/Nm³. En la tabla 3. Se observa los límites máximos permisibles de emisiones gaseosas y de partículas para actividades de hidrocarburos, según el DS N°62 -2010-EM (Anexo 3).

Tabla 3

Límites máximos permisibles de emisiones gaseosas y de partículas para actividades de hidrocarburos

PARAMETRO REGULADO	ACTIVIDADES DE PROCESAMIENTO	
	Concentración en cualquier momento mg/m ³ En Curso	Concentración en cualquier momento mg/m ³ Nuevo
Material Particulado	150	50

Fuente: DS N°62-2010-EM

Leyenda:

mg/Nm³: miligramos/Normal metro cúbico (0°C y 1 atmosfera y base seca y 3% de exceso de oxígeno)

2.1.4. Material particulado emitido por industrias cementeras.

2.1.4.1. Industria del cemento.

La industria del cemento a nivel internacional está ligada al uso en obras públicas, construcción e infraestructura el cual contiene mucha demanda en su utilidad, el cual se considera dentro de una de las compañías más competitivas a nivel mundial.

2.1.4.2. Proceso de Manufactura del cemento

El cemento es un material inorgánico finamente molido durante el proceso de manufactura. El proceso de fabricación del cemento en general figura 2, consiste en la explotación, extracción, molienda del material, clinkerización y el embolsado.

Tomar materias primas como piedra caliza, esquistos o pizarra, arena, arcilla, mineral de hierro y cenizas volantes, pulverizarlas finamente y mezclarlas en tales proporciones, el cual son productos en material sólido finamente molidos que conforman que después de pasar por diferentes etapas de procesamiento llegan a determinar las características finales que tiene este material; por ejemplo, el tiempo de fraguado, la resistencia temprana y la resistencia final (Arcos, 2011). En la figura 2 nos muestra un esquema del proceso del cemento.

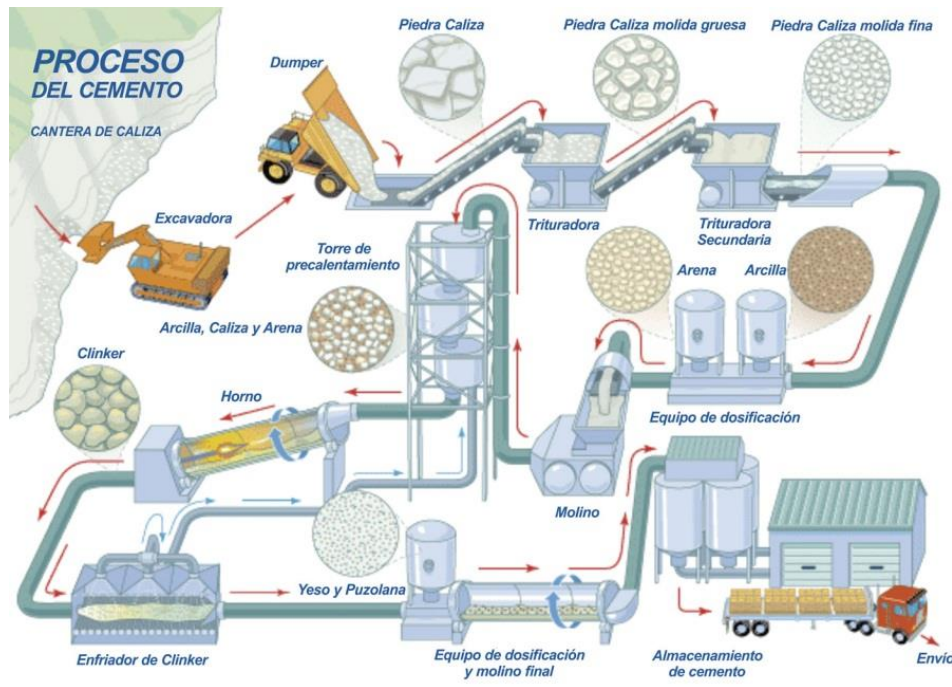


Figura 2. Proceso productivo del cemento
Fuente: Cementos Yura S.A.

El proceso del cemento puede ser por vía seca y por vía húmeda, la primera por vía seca la materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta, el sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno, este proceso de vía seca está probado como el más eficiente energéticamente, requiriendo hasta un 50% menos de energía que el proceso de vía húmeda (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2010, pág. 7).

Por otra parte en la segunda por vía húmeda este proceso es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en el extremo más elevado del horno de clínker (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2010, págs. 7,8). En el anexo 4 nos muestra un esquema de los procesos del cemento tanto de vía seca como de vía húmeda.

2.1.4.3. Polución en la industria del cemento.

Por otro lado la manufactura del cemento es una industria potencialmente polvorienta y que consumen mucha energía, ya que en la fabricación del cemento se producen

emisiones de polvo y gas, que en proporción muy diminuta en relación con el conjunto de emisiones, la emisión de polvo de una planta cementera son debidas a la explotación de yacimientos, el transporte y almacenamiento de materias primas y su molienda.

Las emisiones de polvo fugitivo dependen de la velocidad, la temperatura de los gases, así como el tamaño de las partículas arrastradas.

La captación del polvo arrastrado por los gases de salida del horno del clínker se hace normalmente con captadores de alta eficacia, debido al pequeño tamaño de las partículas, que en un 55 % son menores de 10 micras. Por esta razón, no es recomendable la utilización de multiciclones cuyo rendimiento es de sólo un 60 a un 87 %, si bien pueden combinarse con otros tipos de filtros (Enseñat, 1977, pág. 224).

Lo más corriente es que se utilicen precipitadores electrostáticos, que unen a su ventaja de tener una reducida pérdida de carga, el poseer un rendimiento elevado del orden del 96 al 97 %; además, su consumo de energía es relativamente bajo, calculándose que la potencia necesaria es de 0,25 kW para un caudal de gases de 1000 m³/h (Enseñat, 1977, pág. 224).

La EPA americana, después de haber estudiado cuidadosamente un buen número de plantas de cemento instaladas en Estados Unidos, ha determinado los siguientes factores de emisión de polvo medios (Enseñat, 1977, pág. 225).

Tabla 4

Factores de emisión de polvo.

KG DE POLVO POR TONELADA DE CEMENTO PRODUCIDO			
Proceso	Horno de clínker	Molinos	Total
Vía seca	122	48	170
Vía húmeda	114	16	130

Fuente: Enseñat, 1977, pág. 225

En la siguiente tabla 5. Se muestra rangos máximos de emisiones de polvo, según en fábricas cementeras en diferentes países del mundo.

Tabla 5

Niveles de emisión de polvos en las fábricas de cemento exigidos en la legislación extranjera.

	mg/m ³ N		
	Hornos	Enfriadores del clínker	Otros focos
Alemania Federal	120	75	75
Estados Unidos (en g/t de materia prima)	150	50	—
Francia	150	150	150
Gran Bretaña:			
≤ 1.500 t/día de clínker	460	230	230
1.500 a 3.000 t/día de clínker ...	230-460	230	230
> 3.000 t/día de clínker	230	230	230
Japón:			
• Normas generales			
< 40.000 m ³ /h	400	—	—
> 40.000 m ³ /h	200	—	—
• Zonas muy contaminadas			
< 40.000 m ³ /h	200	—	—
> 40.000 m ³ /h	100	—	—
Suecia	250 (1)	—	250
Suiza	155 (2)	155	155

(1) Instalaciones existentes: 500 mg/m³N
(2) Instalaciones existentes: 230 mg/m³N

Fuente: Alfonso Enseñat de Villalonca, pág.226

En una planta común la salida de polvo varía alrededor de las 150 a 250 toneladas/día/horno, dependiendo de la capacidad del horno. Hoy día, los lineamientos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), demandan esencialmente que se recolecte el 100% del polvo. Esto se realiza usualmente a través de precipitadores electrostáticos. Medioambiental y económicamente es sobremanera preferible reciclar este polvo nuevamente en el proceso, más que disponerlo usualmente como relleno (Arcos, 2011, pág. 29). En la tabla 6. Se observa la composición típica de los polvos de cemento.

Tabla 6

Composición típica del polvo de cemento

Composición típica del polvo de cemento	
Compuesto	Porcentaje
SiO ₂	14.70
Al ₂ O ₃	3.35
Fe ₂ O ₃	2.18
CaO	47.20
MgO	2.10
SO ₃	4.95
Na ₂ O ₃	0.90
K ₂ O	4.80
CO ₂	21.10

Fuente: José Luis Enrique Arcos Martínez, 2011 pág.30

En el AP-42 de EPA, hay factores de emisión utilizados y representan un promedio de una gran cantidad de mediciones de emisiones realizadas en hornos que utilizan los combustibles indicados, con una gran variedad de tecnologías de combustión. En el Anexo 6 se muestran tablas que corresponden a esta, y según la fórmula siguiente se estima la cantidad de polvo emitido (CONAMA, 2009).

$$E = \frac{FE * PA}{1000} \quad (2.1)$$

E: Emisión de contaminante estimado t/año.

FE: Factor de emisión (según tablas - anexo 6).

PA: Producción Anual declarada de la industria cementera t/año.

La emisión del polvo puede contener material particulado de tamaño PM10 y PM2.5 y los puntos localizados que desprenden estas emisiones en las plantas cementeras son las siguientes, en la siguiente figura muestra los diversos contaminantes atmosféricos en las industrias del cemento.

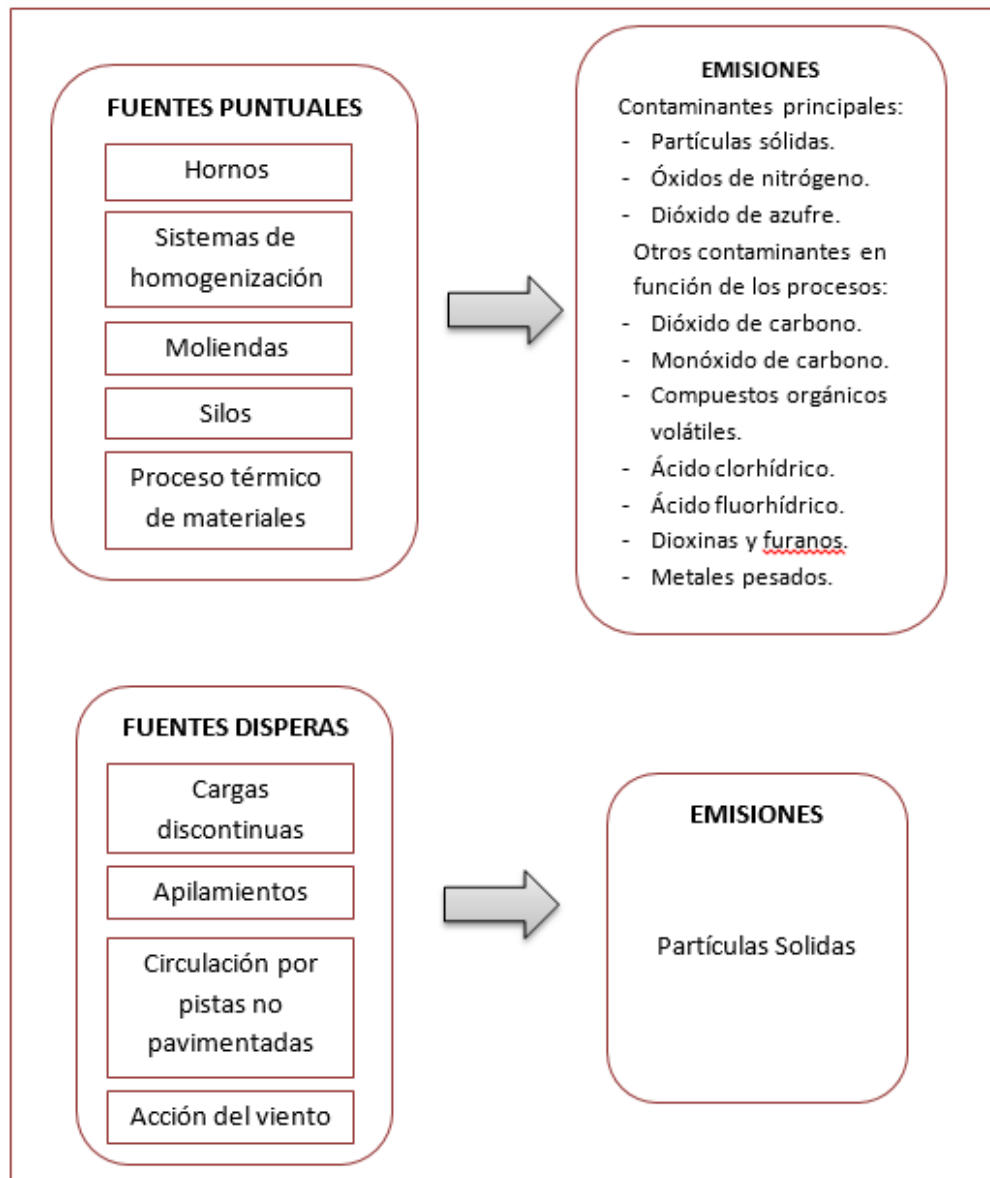


Figura 3. Contaminantes atmosféricos en las industrias del cemento.

Fuente: Fernández & Hernández, 2008, pág. 32

2.2. SISTEMAS Y TIPOS DE RECOLECTORES DE MATERIAL PARTICULADO

Para realizar la recolección de material particulado emitido en las industrias, se usan diferentes tecnologías para reducir las emisiones de zonas locales en la industria, lo cual se debe seleccionar estos dispositivos según las características que tengan el material y el tipo de equipo que trabajara en ella. Por eso, actualmente existen equipos que filtren estas partículas, los cuales son por ejemplo; los ciclones, colectores de mangas con limpieza mecánica, los colectores de mangas con sistema de limpieza pulse jet y los precipitadores electrostáticos. Existen más dispositivos que reduzcan las emisiones de material particulado, pero los más usados actualmente son los descritos anteriormente, ya que estos pueden captar partículas menores de PM_{2.5}.

La finalidad de los captadores de partículas es captar la mayor cantidad de MP (Material Particulado) que atraviesa en estos equipos, logrando así la disminución y el control de las emisiones que son expulsadas al medio ambiente y por ende obtener la mayor eficiencia de recolección.

En la industria del cemento se ve que el control de las emisiones de material particulado es más relevante, ya que son una de las industrias que causan mayor impacto en polución, por eso estas compañías cuenta con la mayor responsabilidad ambiental, dado que dichas partículas corresponde al mismo producto terminado o como materia prima. Los captadores de estas emisiones serán devueltas al proceso de producción de cemento o serán usados para otra forma de uso.

En las unidades de piroproceso las emisiones de material particulado son controladas por filtros y precipitadores electrostáticos cuya aplicabilidad está enfocada para los hornos, enfriadores de clínker y molinos de cemento (Fernández & Hernández, 2008, pág. 83). Por otra parte hablando de la operación de las maquinas se ve afectada por las fugas de polución que escapa del proceso el cual se convierte en un deterioro de los componentes mecánicos, eléctricos y así a la misma infraestructura de la industria.

A continuación se muestra una tabla según la información que se debe considerar al diseñar un equipo colector de partículas, la corriente de gas y otros.

Tabla 7

Factores a considerar en el diseño del MP

FACTOR	CONSIDERACIONES
General	Eficacia de captura. Limitaciones legales. Costo inicial Tiempo de vida y valor residual Costo de operación y mantenimiento Requisitos de potencia Peso y requisitos de espacio Material de construcción Fiabilidad Garantías del equipo y del fabricante
Gas Portador	Temperatura Presión Humedad Densidad Viscosidad Punto de rocío de materias condensables Corrosividad Inflamabilidad Toxicidad
Proceso	Caudal y velocidad del gas Concentración de contaminantes Variabilidad de caudales, temperatura, etc.
Contaminante (Gaseoso)	Corrosividad Inflamabilidad Toxicidad Reactividad
Contaminante (Particulado)	Distribución de tamaños de partícula Forma de las partículas Tendencia a la aglomeración Corrosividad Abrasividad Pegajosidad Inflamabilidad Toxicidad Resistividad eléctrica Reactividad
Contaminante (particulado)	Distribución de tamaños de partícula Forma de las partículas Tendencia a la aglomeración Corrosividad Abrasividad Pegajosidad Inflamabilidad Toxicidad Resistividad eléctrica Reactividad

Fuente: Carrillo, 2011, pág. 26

En la siguiente figura 4 se muestra los tamaños, características de las partículas y tipos de equipos de limpieza, el cual se encuentran colectores que trabajan mejor con un material particulado grueso que con un MP fino, hay casos en que puede haber dos equipos pueden trabajar para recolectar el mismo tamaño de partícula, pero se debe de

ver las características de la corriente de gas que son realmente diferentes, ya que en una de ellas puede ser afectada por la temperatura, humedad u otros factores.

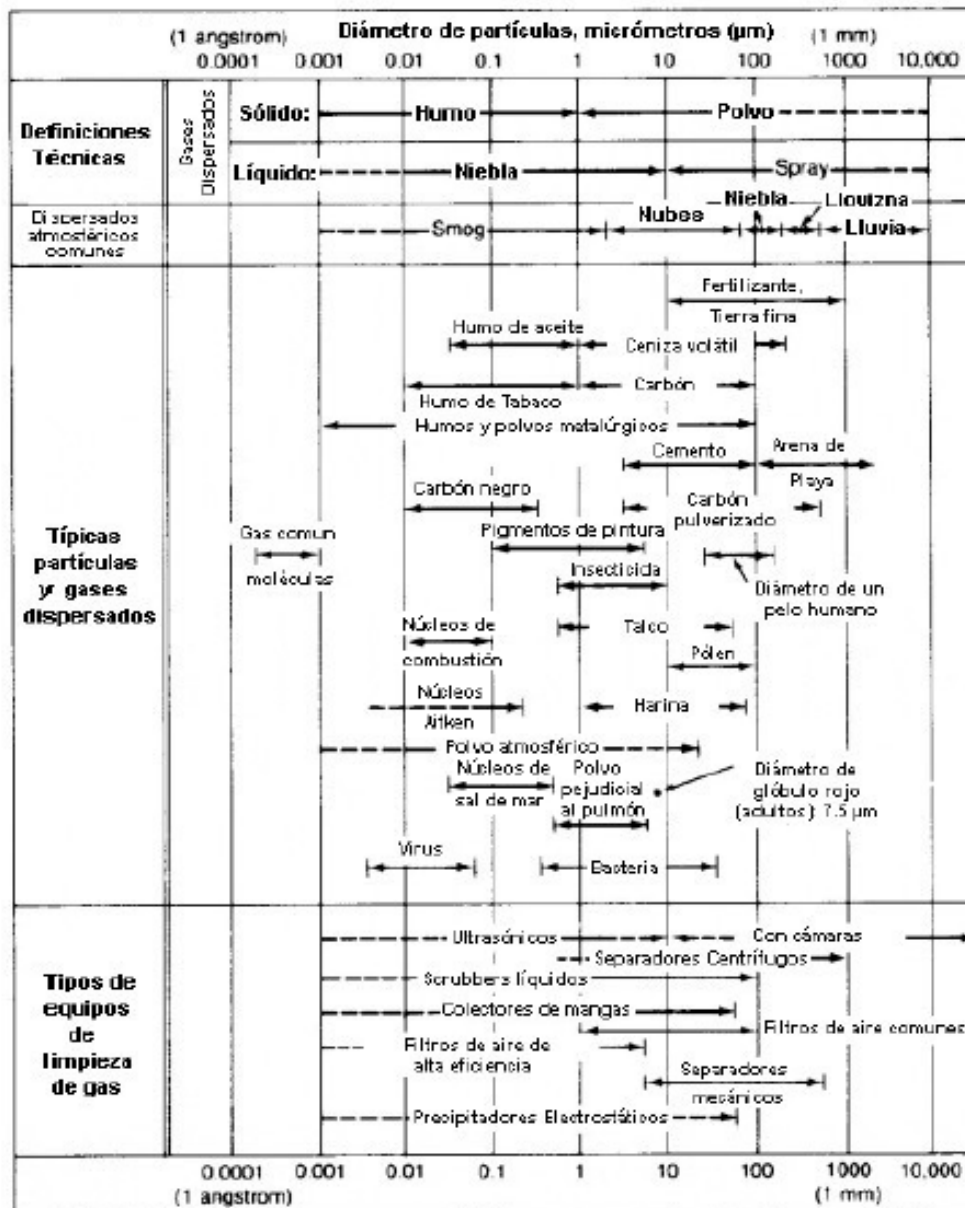


Figura 4. Tamaños y características de las partículas
Fuente: Fernández E. , 2008, pág. 8

Para determinar la eficiencia de colección de MP del equipo se debe saber cómo están distribuidas las partículas. Entonces, la eficiencia de colección se basa en el porcentaje de masa entrante de MP que es quitada de la corriente del gas. La eficiencia de colección se calcula como (Fernandez, 2008):

Eficiencia de colección:

$$n_c = \frac{MP_c}{MP_e} * 100\% \quad (2.2)$$

Dónde:

n_c : Eficiencia de colección. [%]

MP_c : Razón de MP colectada.

MP_e : Razón de MP entrante.

También puede calcularse según el flujo volumétrico del gas, ya que el flujo del gas es normalmente igual que en la entrada y la salida (Fernandez, 2008).

$$n_c = \frac{m_i - m_s}{m_i} * 100\% \quad (2.3)$$

Dónde:

n_c : Eficiencia de colección. [%]

m_i : Carga másica o concentración de MP a la entrada del dispositivo [g/m³].

m_s : Carga másica o concentración de MP a la salida del dispositivo [g/m³].

El control de contaminación, el principio es de que el flujo de gas mezclado con el material particulado ingresa al dispositivo que para luego colecta o retiene el material particulado, mientras que el gas aparentemente limpio sigue continuando y sale del dispositivo. En la siguiente figura muestra como sucede esto (Fernandez, 2008).

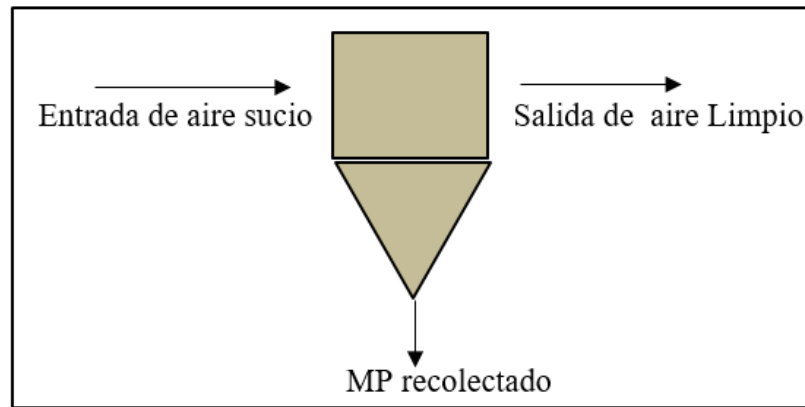


Figura 5. Esquema de un dispositivo de control de emisión del aire.

Fuente: Fernández E. , 2008, Pág. 9

A continuación se describirá los diferentes dispositivos de colección de MP, ciclones, colectores de mangas con limpieza mecánica, los colectores de mangas con sistema de limpieza pulse jet y los precipitadores electrostáticos.

2.2.1. Ciclones.

2.2.1.1. Descripción.

Los ciclones son equipos mecánicos estacionarios que recolectan y separan partículas sólidas de una corriente de gas o aire empleando la fuerza centrífuga, también puede emplearse para separar sólidos de líquidos.

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros (mayores a $5\mu\text{m}$) (Fernandez, 2008, pág. 10), dado que estos son mucho más eficientes a la hora de recolectar esos tamaños de partícula y al captar partículas más pequeñas (menores a $5\mu\text{m}$) su eficiencia baja debido a que estas partículas son tan pequeñas y son tan difíciles de recolectar que fugan con el aire limpio en la salida del ciclón, por el cual se verá más adelante como es el funcionamiento de estos.

Los colectores de polvo tipo ciclón son máquinas simples, ya que no porta partes móviles en su estructura y son de fácil mantenimiento, también se consideran que la implementación del ciclón es el método de bajo costo en la remoción de partículas, pero para el diseño debe realizarse con sumo criterio, ya que el parámetro más importante son los rangos de velocidad del gas o aire sucio en la entrada de estos para luego haiga mayor recolección de material particulado.

Los ciclones no son muy eficientes comparados con los colectores de mangas y los precipitadores electrostáticos ya que estos captan partículas mucho menores a $5\mu\text{m}$.

2.2.1.2. Funcionamiento básico.

El funcionamiento del ciclón como se había visto en la descripción se basa en el empleo de la fuerza centrífuga.

La operación del ciclón es en realidad muy simple, el aire entra al ciclón y obliga a las partículas de polvo a girar en forma circular, aquí el polvo viaja por la pared del ciclón y el aire continúa girando, separando el polvo fino y deslizándose hacia abajo para finalmente caer (Gómez, 2016, pág. 21).

En este tipo de ciclón, el gas entra en la cámara tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Los sólidos se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las paredes, y son recogidos en la parte inferior (Gómez, 2016, pág. 21). El funcionamiento del ciclo los podemos ver en la siguiente figura.

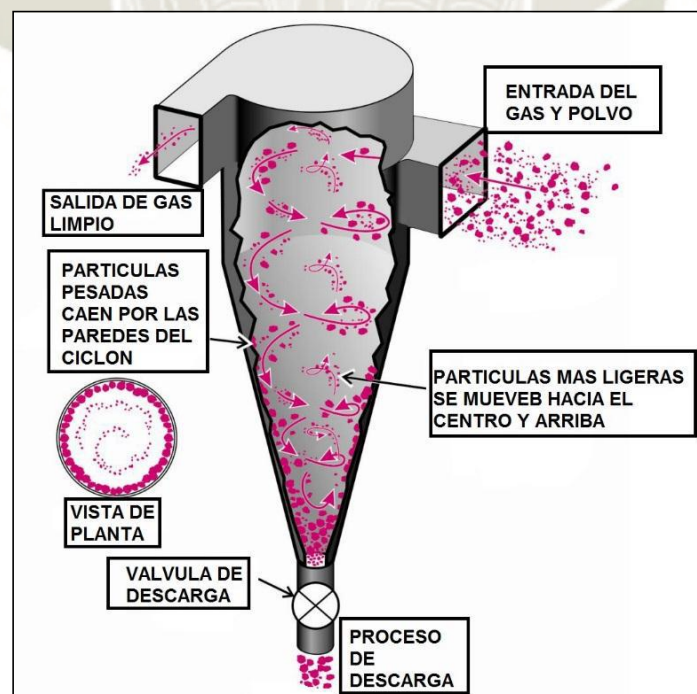


Figura 6. Funcionamiento de un ciclón.

Fuente: Gómez, 2016, pág. 22

2.2.1.3. Colección de emisiones alcanzadas.

La eficiencia de este equipo depende del tamaño de partícula que captura, ya que este equipo puede alcanzar eficiencias de hasta 95% si las partículas que capta son mayores a $5\mu\text{m}$ y de 60% a 75% si son para partículas menores o submicrométricas. Los rangos de flujo están entre 1 a $47\text{m}^3/\text{s}$ (1500 a 100 000 scfm) y la potencia del ciclón por lo general es de 0.75 a 2.61 kW (1 a 3.5 HP) por $28\text{m}^3/\text{min}$ (1000 pies³/min) (Fernandez, 2008, pág. 11).

En la siguiente tabla 8 se puede apreciar la eficiencia de los ciclones según el tamaño de material particulado.

Tabla 8

Tabla de eficiencia según el tipo de ciclón

Tamaño de Partícula	Eficiencia (%)		
	Convencional	Alta eficiencia	Alto rendimiento
PM	70-90	80-99	80-99
PM ₁₀	30-90	60-95	10-40
PM _{2.5}	0-40	20-70	0-10

De EPA hoja de datos

Fuente: Gómez, 2016, pág. 21

La eficiencia de los ciclones es mayor cuanto mayor sea la fuerza que actúe sobre las partículas. Esta fuerza depende de la masa de las partículas y de la velocidad del gas en el ciclón y es inversamente proporcional al diámetro del mismo (Orozco & Pérez, 2011, pág. 390).

En la aplicación de los ciclones muchas veces se instalan en zonas donde se mueven o descargan grandes cantidades de material particulado, es como una pre limpieza del aire circundante que para luego será introducido a un equipo que retire las partículas más pequeñas, ya sea un colector de mangas o un precipitador electrostático.

2.2.1.4. Ventajas.

- El costo de instalación es relativamente bajo.
- Bajos costos de operación.

- No se requiere de un mantenimiento exhaustivo.
- No posee muchas piezas en la fabricación y en el ensamble.
- La construcción de este es muy rápido.
- Su eficiencia de captación puede alcanzar hasta el 99% dependiendo del tamaño de las partículas
- No ocupan mucho espacio en la instalación.
- Logran separar o recolectar variedades de material particulado.
- Operan con gases en temperaturas elevadas.
- Su eficiencia es constante a lo largo de su vida útil.
- Perdida de carga siempre se mantiene constante.
- No requiere de equipos de pre tratamiento.

2.2.1.5. Desventajas.

- Son muy propensos a las abrasiones que con lleva el material al ser arrastrado por las paredes del ciclón.
- La eficiencia de colección de MP muy fino es relativamente baja para tamaños menores a $5\mu\text{m}$.
- Son propenso al ensuciamiento.

2.2.2. Colectores de mangas con limpieza mecánica.

2.2.2.1. Descripción.

Los colectores de mangas son dispositivos de colección de filtración seca, son los filtros usados en las industrias que permiten el control de las emisiones, ya que estas deben tener un correcto diseño para que se cumplan las normativas en cuanto a los niveles de emisiones, estas también se considera que tienen costos de instalación bajos que otros dispositivos de recolección de material particulado.

Los filtros de mangas son estructuras metálicas cerradas, ya que en el interior de este dispositivo utiliza unas bolsas o sacos de tela o mangas de forma tubular colgadas verticalmente y que son fabricadas de fibras textiles para que las partículas se retengan en las mangas, por el cual el aire sucio es forzado pasar a través de estos sacos, que sobre el cual se forma una capa de polvo que para luego será desprendido mediante mecanismos limpiadores.

Los filtros de mangas recolectan partículas de tamaños que van desde las submicras hasta varios cientos de micras de diámetro, con eficiencias generalmente en exceso al 99 o 99.9% (Fernandez, 2008, pág. 21). La capa de polvo o plasta recolectada sobre la tela es la razón principal de esta alta eficiencia, La mayor parte de la energía utilizada para operar el sistema aparece como caída de presión a través de las bolsas, y de las partes y conductos asociados. Los valores típicos de la caída de presión del sistema varían desde cerca de 1.25 hasta 5 kPa (130 a 500 milímetros de columna de H₂O) (Fernandez, 2008, pág. 21).

En estos dispositivos una de las principales limitaciones es la temperatura, corrosividad y la adhesividad tanto del material como del gas/aire sucio admitido, ya que estos pueden afectar al material de las mangas y por ende bajar la eficiencia en su recolección y aumentar los costos operativos.

2.2.2.2. Funcionamiento básico.

El funcionamiento de este dispositivo cuenta con dos compartimientos separados, en el cual, el primero es donde se encuentran las mangas y en donde se recolecta el material particulado, en el segundo compartimiento es donde se encuentra el aire limpio donde este deja la máquina.

Durante la operación, el aire/gas sucio ingresa por la parte inferior del equipo mezclado con material sólido, que a la vez ingresa a los colectores de mangas por la parte inferior de forma ascendente ya que este es forzado por las corrientes de flujo que son realizadas por el ventilador, una vez que el aire sucio está dentro de las mangas, el material particulado queda retenido en la superficie interior de la manga, debido a la estructura y la fabricación de las fibras textiles que están diseñadas para capturar el tamaño de partícula colectado, que para luego el aire limpio atraviesa las fibras y que es evacuado de estas mangas por la parte superior.

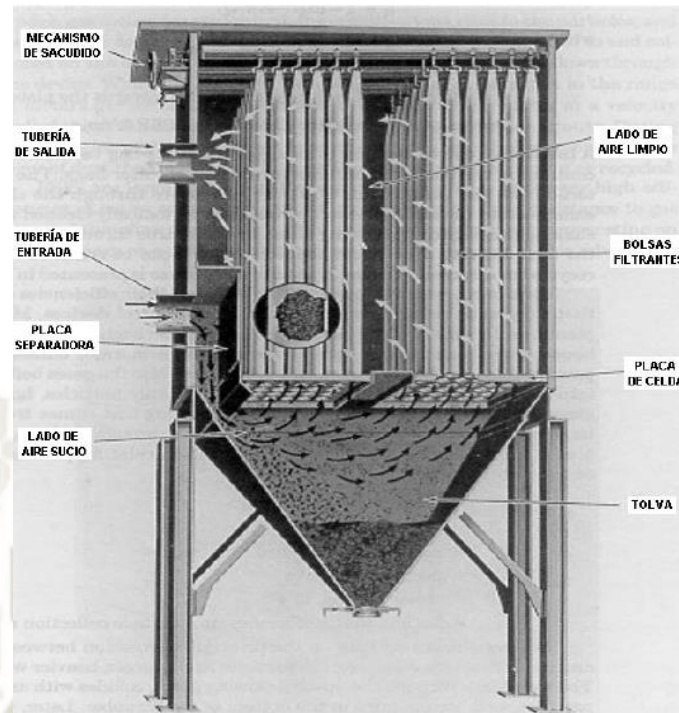


Figura 7. Funcionamiento de un colector de mangas con limpieza de sacudió mecánico.

Fuente: Gómez, 2016, pág. 24

El mecanismo de limpieza de estas es a través de sacudidos mecánicos que desprenden el material sólido que está en la superficie interna de las mangas, el cual este precipita en tolvas de colección. En la figura siguiente se muestra un colector de mangas.

A continuación se muestra unas imágenes de presión positiva y presión negativa.



Figura 8. Localización del ventilador según las características del material.

Fuente: Orrala, 2010, pág. 30,31

2.2.2.3. Colección de emisiones alcanzadas.

El parámetro de diseño más importante es la relación aire-tela (Tabla 9) o cantidad de gas en metros cúbicos por minuto (o pies cúbicos por minuto) que penetra un metro cuadrado (o un pie cuadrado de tela), y el parámetro de operación de interés por lo general es la caída de presión a través del sistema de filtro (Fernandez, 2008, pág. 21).

Tabla 9

Relaciones de aire/tela para diferentes colectores de polvo

TIPO DE LIMPIEZA DEL COLECTOR	Típico de AIRE/TELA En No-Normales m³/min/m²
Sacudido Mecánico	0.76 a 0.91
Aire inverso	0.61 a 0.76
Jet Pulse	1.52 a 1.83

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 21

Según la tabla anterior se diseñan los colectores de mangas que para luego tengan una eficiencia mayor.

Estos filtros pueden alcanzar eficacias superiores al 99% para partículas de diámetro superior a 0.5 μ m: incluso para partículas menores (diámetros en torno a 0,01 μ m) los rendimientos pueden ser elevados (Orozco & Pérez, 2011, pág. 395).

En una planta cementera, generalmente se encuentran en los puntos de transferencia de bandas transportadoras, elevadores, aerodeslizadores, ensacadoras, zarandas, etc. Dependiendo del lugar donde va a funcionar, hay que considerar la temperatura, el material que se va a filtrar, la humedad, ácidos y otros, para esta manera tener un buen criterio de diseño del filtro.

2.2.2.4. Ventajas.

- Al realizar mantenimiento a las mangas periódicamente aumenta la eficiencia de colección.
- Tiene una elevada eficiencia en filtración aproximadamente 99%.
- El material recolectado está en forma seca.

- Relativa baja caída de presión (de 1 a 1.5 kPa).

2.2.2.5. Desventajas.

- Para realizar la limpieza se tiene que parar la succión del colector.
- El sistema de golpeteo de las mangas necesita un alto mantenimiento.
- Demanda mucho espacio para su instalación.
- Baja confiabilidad en las mangas filtrantes debido al exceso de trabajo mecánico.
- El material de las mangas está limitado a altas temperaturas de material circundante.
- Necesidad de pre tratamiento de enfriamiento de gases calientes.
- No puede manejarse materiales húmedos o sustancias higroscópicas.
- Tecnología obsoleta.

2.2.3. Colectores de mangas con limpieza tipo pulse-jet.

2.2.3.1. Descripción.

Los colectores de mangas con limpieza tipo pulse-jet (chorro pulsante), es otro tipo de equipo de recolección de material particulado, el cual atrapa el material sólido en los filtros que contiene este equipo. Esta nueva tecnología de recolección es una mejora en relación con el colector de mangas de limpieza mecánica, ya que la limpieza se realiza con un chorro de aire a presión inyectada dentro de las mangas y por ende es más eficiente al momento de desprender las partículas que son retenidas en las mangas en comparación con la limpieza mecánica.

Estos dispositivos contienen en la parte interior bolsas o mangas que son montadas sobre jaulas o canastillas de alambre para prevenir su colapso, mientras el gas polvoriento fluye desde el exterior al interior de la bolsa durante la filtración. En vez de unir ambos extremos de la bolsa a la estructura del filtro, para el ensamble de bolsa y canastilla siempre va fijada sólo en la parte superior mediante abrazaderas. La parte inferior del ensamble tiende a moverse en el flujo del gas turbulento durante la

filtración y se pueden frotar con otras bolsas, lo cual acelera el desgaste (Gómez, 2016, pág. 26).

Este tipo de filtros, permite una mejor cantidad de aire con igual área en el colector, es decir mayor relación aire/tela. Este sistema funciona por lo general con relaciones de aire/tela aproximadamente entre 1.2-1.8 m³/min/m². Esto hace que la estructura general del filtro sea de menor tamaño lo que hace que los costos en instalación sean bajos en comparación a los colectores de mangas anteriores (Orrala, 2010, pág. 37).

El material de los filtros actualmente están diseñados para que soporten rangos de temperaturas limitados, pero aun así son muy sensibles a temperaturas mayores a 260 °C, ya que para coleccionar el material caliente este deberá pasar por un pre tratamiento de enfriado para así operar de la mejor manera (Fernandez, 2008, pág. 21).

2.2.3.2. Funcionamiento básico.

El funcionamiento de este equipo colector cuenta con dos compartimientos aislados separados, en el cual, el primero es donde se encuentran las mangas y en donde se recolecta el material particulado, en el segundo compartimiento es donde se encuentra el aire limpio donde este deja la máquina.

Durante la operación, el aire gas sucio ingresa por la parte inferior del equipo mezclado con el material sólido, que a la vez pasa a través a lo largo del área de las bolsas filtrantes. Las partículas son retenidas en las caras exteriores de los filtros, ya que la estructura y la fabricación de las fibras textiles que están diseñadas para capturar el tamaño de partícula colectado, por otro lado el gas limpio atraviesa los filtros de manera radial y este es evacuado hacia el exterior de manera forzada por la corriente de aire que es producida por el ventilador. Una vez que los filtros están topados de material particulado en las caras exteriores de los filtros se abre una válvula en la parte superior de los filtros que dispara un chorro de aire a alta presión aproximadamente de 414 a 689kPa (60 a 110 psig) que recorre por la parte interna del filtro a alta presión expandiéndola violentamente que hace que se desprenda el material particulado de los filtros.

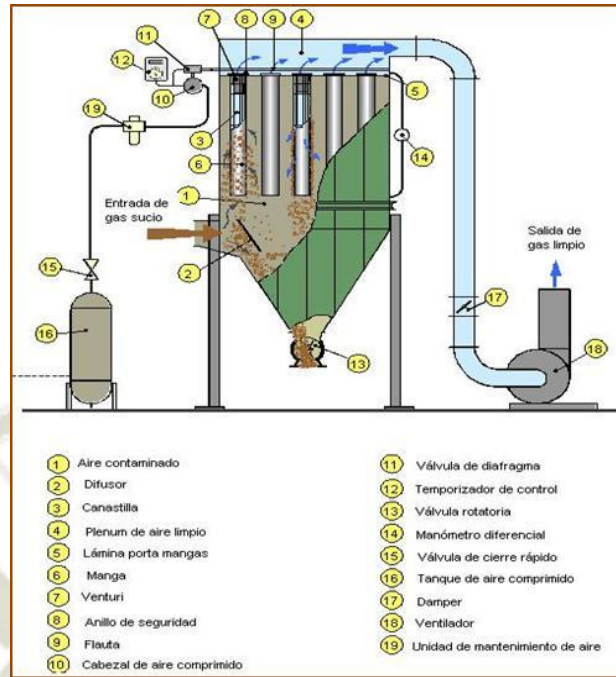


Figura 9. Funcionamiento de un colector de mangas con limpieza tipo pulse-jet

Fuente: Jiménez, 2015, pág. 16

La inyección del aire comprimido para limpiar los filtros se realiza a través de un tubo que tiene boquillas en forma de flauta que inyecta el aire a cada filtro por la parte superior de forma intermitente alternando periodos de limpieza interrumpiendo el flujo de aire durante únicamente unas pocas décimas de segundo (0.3 a 0.5 s) , y la secuencia de limpieza se realiza en intervalos 1 a 30 segundos, a continuación se muestra algunas figuras de estos mecanismos de limpieza.

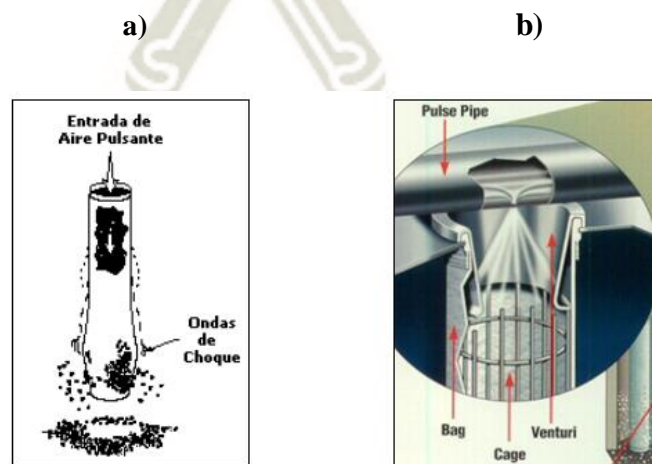


Figura 10. a) Limpieza del filtro del material particulado; Fuente: Fernández, 2008, pág. 36 b) Inyección de aire comprimido dentro del filtro. Fuente: AAF International, 2018

El venturi que está colocado en la boquilla superior del filtro se usa para aumentar la velocidad de chorro de aire creando un impulso suficientemente grande para que pueda desplazarse al largo de la manga y regresar al punto de origen.

2.2.3.3. Colección de emisiones alcanzadas.

Se obtienen eficacias por encima del 99% para partículas mayores de $10\mu\text{m}$., pudiendo superar el 99.99%. Para partículas de $0.5\mu\text{m}$. Alcanzan eficacias del 99% y se obtienen eficacias aceptables para partículas de hasta $0.01\mu\text{m}$ (Jiménez, 2015, págs. 15,16).

En una planta cementera, generalmente se encuentran en los puntos de transferencia de bandas transportadoras, elevadores, aerodeslizadores, ensacadoras, zarandas, etc. Dependiendo del lugar donde va a funcionar, hay que considerar la temperatura, el material que se va a filtrar, la humedad, ácidos y otros, para esta manera tener un buen criterio de diseño del filtro.

2.2.3.4. Ventajas.

- El sistema de funcionamiento de filtro de mangas pulse-jet es simple y eficiente.
- Funcionamiento fiable.
- Con respecto a la retención de partículas alcanza altas eficiencias.
- Elevada eficiencia de filtración (superior al 99%).
- Baja caída de presión (1 a 1.5 kPa.)
- El material es colectado de forma seca.
- Tamaño físico compacto.
- La limpieza es eficiente.

2.2.3.5. Desventajas.

- Requiere el cambio periódico de mangas.

- El material de las mangas está limitado a altas temperaturas de material circundante.
- Necesidad de pre tratamiento de enfriamiento de gases calientes.
- Requiere un consumo importante de aire comprimido.
- Elevado consumo de potencia en el motor del ventilador principal de aproximadamente dos veces mayor que para un precipitador.
- No puede manejarse materiales húmedos o sustancias higroscópicas.
- Mayores costos de mantenimiento (por el reemplazo de las mangas filtrantes) en comparación al cambio de placas de un precipitador electrostático.
- Alta generación de residuos sólidos debido a la elevada eficiencia de filtración.

2.2.4. Precipitadores electrostáticos.

2.2.4.1. Descripción.

Un precipitador electrostático es otro tipo de dispositivo de control de partículas que recolecta partículas de polvo, material particulado y gases contaminantes, mediante el uso de campos electrostáticos moviendo el material particulado de una corriente de gas sucia a unas placas recolectoras que a su vez este material sólido capturado es desprendido de las placas mediante un mecanismo mecánico de desprendimiento y que para luego son recolectadas en tolvas o depósitos.

Los precipitadores electrostáticos se usan donde se produzcan altos índices de emisiones de material particulado, ya sea como generadoras de electricidad, industrias cementeras, industria del acero, incineradores, productos químicos, industrias del papel, plantas mineras, plantas petroleras e industrias de manufactura. La eficiencia de recolección de estas máquinas varía dependiendo del tamaño de las partículas a recolectar y de las características de la corriente de gas, pero puede alcanzar niveles de reducción de emisiones en más del 99% (Saravia, 2008).

Como ya se mencionó anteriormente, los filtros de mangas son bastante eficientes. Aunque recolectan polvo de manera muy diferente a los precipitadores, la diferencia

más importante es que los PESs tienen una caída constante de presión y un funcionamiento variable, mientras que los filtros de mangas mantienen un funcionamiento constante y una caída de presión variable. (Fernandez, 2008, pág. 78)

La tendencia de implementar los precipitadores electrostáticos se debe a la alta eficiencia de remoción para material particulado. Los PES se emplean por lo general cuando se requieren: a.) eficiencias muy altas para la eliminación de polvos b.) El volumen de gas es alto y c.) Es necesario recuperar materiales valiosos sin modificaciones físicas (Fernández & Hernández, 2008, pág. 83).

2.2.4.2. Funcionamiento básico.

El funcionamiento de este equipo está basado principalmente en la generación de campos eléctricos intensos generados por fuentes de energía.

Durante la operación, el flujo de aire gas sucio ingresa a la máquina con una velocidad determinada, el cual pasa entre placas paralelas separadas a una distancia y en el medio de estas se encuentran unos electrodos que pueden ser de un hilo fino metálico (1.3mm – 3.8mm), cable enrollado o un tubo con púas.

Los electrodos se sitúan en el medio de las placas y que estos a la vez están conectadas al polo negativo y las placas al polo positivo de una fuente de energía de alto voltaje de aproximadamente (20-100kV), al aplicar una corriente continua de alto voltaje entre los electrodos y las placas se crean campos eléctricos intensos (Carrillo, 2011).

Al atravesar el aire sucio entre estos componentes, los electrodos crean un efecto corona intenso que imparten carga negativa (ioniza) a las partículas de la corriente de gas y por ende la satura de iones negativos a las partículas, que para luego por fuerzas eléctricas del campo eléctrico las hace migrar a la superficie de las placas recolectoras conectadas positivamente y que estas a su vez están conectadas a tierra para que las partículas precipitadas en estas placas disipen su carga negativa y es así como se neutralizan las partículas, que para luego este material particulado sea desprendido o desalojado fácilmente con la ayuda de mecanismos mecánicos(golpe) o vibradores en las placas y que el material desprendido sea depositado en recipientes o tolvas recolectoras de material sólido. En la figura siguiente se muestra un principio básico de funcionamiento.

En la figura 11 siguiente se muestra el principio básico del funcionamiento de un precipitador electrostático.

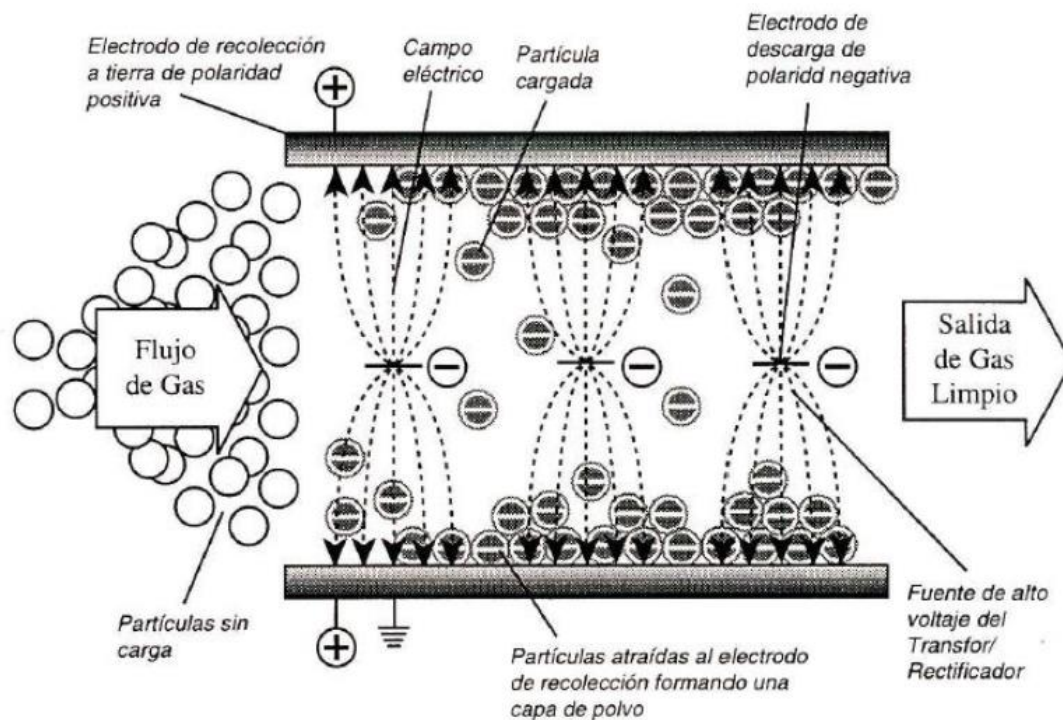


Figura 11. Funcionamiento básico de un precipitador electrostático.

Fuente: Gómez, 2016, pág. 32

2.2.4.3. Colección de emisiones alcanzadas.

Los precipitadores electrostáticos, como los colectores y filtros de magas son extremadamente eficientes, el grado de limpieza de los PEs es hasta el 99% o más para partículas menores de $5\mu\text{m}$ (Orrala, 2010, pág. 21).

Los precipitadores electrostático son equipos de captación de polvo eficientes en condiciones de trabajos estables, también depende de la cantidad de campos que el electrofiltro posea, si el electrofiltro posea 3 o 4 campos, el flujo de partículas permanecerá más tiempo al interior del precipitador electrostático y con esto aumentará la probabilidad de ionización, para que sea captado por las placas de recolección y por ende esto aumenta la eficiencia del equipo (Gómez, 2016, pág. 31).

En la figura 12 siguiente se muestra 3 campos, el campo 1 recolecta el 80% de las partículas ingresantes, el segundo campo re colecta el 70 % del resto que no fue

colectado en el primero y el tercer campo recolecta el 60% del resto que no fue colectado en el segundo y primer campo. (Gómez, 2016, pág. 34)

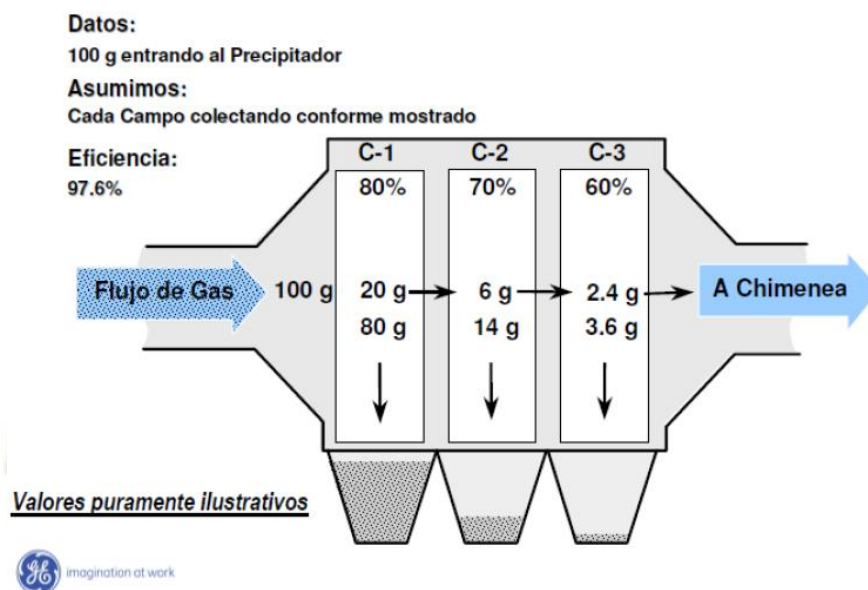


Figura 12. Distribución del material particulado en un PEs.

Fuente: Gómez, 2016, pág. 34

2.2.4.4. Ventajas.

- Los precipitadores pueden trabajar con temperaturas elevadas (hasta 700°C).
- Las caídas de presión son relativamente bajas (0.1 kPa).
- Muy baja resistencia al paso del gas.
- El consumo de energía del precipitador es relativamente fiable.
- Es versátil, ya que puede trabajar en todos los procesos industriales.
- Mantiene una alta eficiencia en recolección (generalmente mayor al 99.9% en partículas de todos los tamaños, incluyendo submicras).
- El polvo recolectado se mantiene en su estado original.
- El mantenimiento es normal durante paradas programadas.

- Su construcción asegura una larga vida bajo condiciones arduas, efectos de abrasión insignificantes ya que trabaja a bajas velocidades de operación.

2.2.4.5. Desventajas.

- Es sensible a condiciones variables durante el proceso.
- El costo de instalación es relativamente elevado, dependiendo de la capacidad del equipo.
- Se requiere espacios grandes.

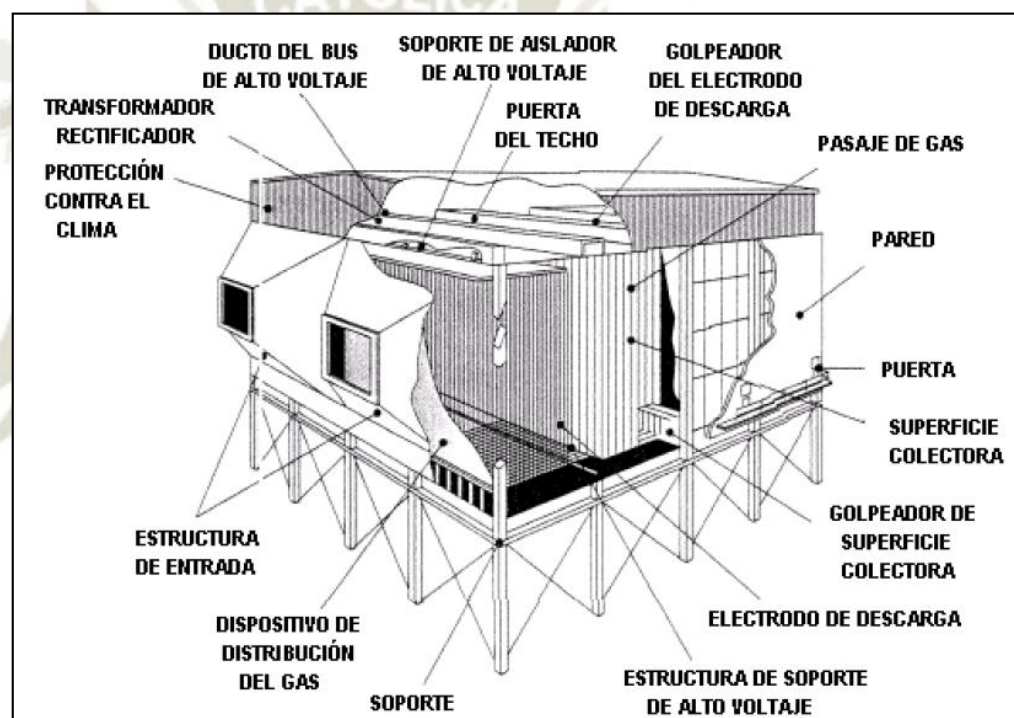


Figura 13. Partes de un precipitador electrostático.

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 79

2.3. COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.

En los subtítulos anteriores vimos los principales dispositivos y diferentes métodos para controlar el material particulado de emisiones contaminantes, ya sean los ciclones, los filtros de mangas con limpieza mecánica, los filtros de mangas-pulse jet y el precipitador electrostático, el cual se vio la descripción, el funcionamiento, los rangos de captura, eficiencia, ventajas y desventajas. Estos dispositivos son usados en industrias tanto de manufactura, minería y generación de energía.

A continuación se realizara una comparación de estos dispositivos de captación de polvo según la tesis planteada que es la reducción de material particulado (polvo) en una industria cementera.

Los tamaños de los polvos de cemento se encuentran entre $2.5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$, según. Entonces veremos en la tabla 10 las eficiencias de los tipos de colectores, según el tamaño de las partículas a capturar.

Tabla 10

Eficiencias de los colectores de MP

Tecnología	Tamaño de partícula aplicable (μm)	Eficiencia
Ciclón	> 10	80 % en partículas $<20 \mu\text{m}$
Filtro de mangas	> 0.5	95-99 % en partículas $<5 \mu\text{m}$
PES	> 0.001	80-99 %

Fuente: Gerard Kiel. Pág. 1012

Según la tabla 10, los filtros de mangas y los precipitadores electrostáticos (PES) trabajan a eficiencias altas para capturar material particulado, pero los PES logran capturar partículas mayores a $0.001 \mu\text{m}$, por el cual se ve que este es un equipo muy eficiente con respecto a los filtros de magas.

Ahora vemos que los precipitadores electrostáticos trabajan capturando material particulado a altas temperaturas (hasta 700°C), en cambio los filtros de mangas no soportan esos rangos de temperatura.

Los PES pueden capturar material húmedo, en cambio los filtros de mangas si logran capturar material húmedo, pero al momento de acumularse en las mangas se satura o se adhiere a la manga y esto es muy difícil de desprender que para luego baja la eficiencia de recolección.

Por otra parte, la caída de presión en los PES es relativamente baja en comparación con los filtros de mangas, ya que no presenta resistencia la corriente de aire, por lo que los ventiladores en los PES son de menor tamaño y potencia.

Los PES pueden trabajar en todas las zonas de la industria cementera, ya que este equipo se puede adaptar en todas las áreas, en comparación del filtro de mangas.

Los periodos de mantenimiento de los PES son más prolongados, ya que las partes principales de captación de este equipo son menos propensas al desgaste en comparación a los filtros de mangas.

Por lo tanto, La presente tesis seleccionará los *Precipitadores Electrostáticos* como uno de los equipos para disminuir las emisiones de material particulado en industrias cementeras, que a continuación se hará la descripción más a detalle de este equipo que actualmente es una tecnología de muy alto nivel y que este incentiva en más investigaciones de este tipo de dispositivo, hasta lograr una captación de más del 99% para cualquier tipo de tamaño de partícula.

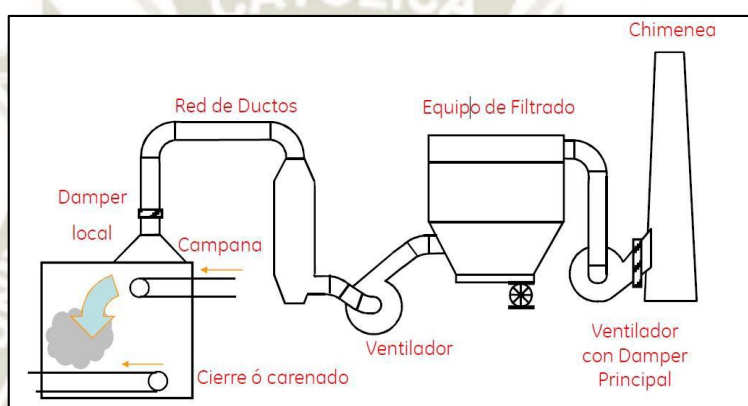


Figura 14. Sistema de un colector de polución.

Fuente: Gómez, 2016, pág. 28

2.4. PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.

2.4.1. Conceptos básicos.

El precipitador electrostático es un equipo de alta eficiencia aplicado a diversos procesos y distribución de partículas para control de polución que fue inventado hace más de 30 años para reducir las emisiones de material particulado en industrias. La tecnología principal que usa este dispositivo es la generación de un campo eléctrico mediante la aplicación de una fuente de energía muy alta que generan fuerzas electrostáticas intensas.

Este es un dispositivo de control de partículas que utiliza fuerzas eléctricas para mover partículas de una corriente sucia a una placa colectora. A las partículas se les da una carga eléctrica forzándolas a pasar a través de una corona, una región en la cual fluyen

iones gaseosos. El campo eléctrico que orienta a las partículas cargadas hacia las paredes (efecto corona), proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo (Fernandez, 2008, pág. 78).

Una vez que las partículas son recolectadas en las placas, estas deben desprenderse de las placas sin que se reintroduzcan en la corriente de aire, que para el cual se usa mecanismos que remueven el material permitiendo que las partículas se deslicen hacia tolvas o depósitos de recolección, estos mecanismos pueden ser mediante lavados con agua, mecanismo por golpe y vibradores.

Como ya se mencionó en los anteriores subtítulos acerca de los equipos de recolección de material particulado sobre la reducción de emisiones se realiza de una manera muy diferente, pero una diferencia muy importante con los filtros de mangas es que los precipitadores electrostáticos tiene una caída de presión constante y un funcionamiento variable, mientras que los filtros de mangas mantienen un funcionamiento constante y una caída de presión variable (Fernandez, 2008, pág. 78).

Hoy en día hay una tendencia en el uso de estos equipos en diversas industrias, ya que los organismos ambientales, salud y seguridad llevan a realizar una gestión más seria que en los anteriores años, esto es debido a los efectos que tiene al medio ambiente, y estos a la vez emiten rangos permisibles de emisiones que deben ser cumplidas en diferentes industrias hechas por el hombre que son el porcentaje mayor en contaminación ambiental que la contaminación natural.

El proceso de captación del precipitador electrostático consta de las siguientes etapas fundamentales:

- **Ionización:** cargado de iones hacia la partícula.
- **Migración:** movimiento de las partículas cargadas a la superficie.
- **Recolección:** precipitación de las partículas a las superficies colectoras.
- **Disipación de la carga eléctrica:** neutralización de las partículas en las superficies colectoras.

- **Desalojo:** desprendimiento de las partículas de los colectores hacia depósitos o tolvas acumuladoras.
- **Transporte:** de las partículas de la tolva acumuladora hacia el unto de desecho al exterior.

Durante la operación, el flujo de aire gas sucio ingresa a la máquina con una velocidad determinada, el cual pasa entre placas paralelas separadas a una distancia y en el medio de estas se encuentran unos electrodos que pueden ser de un hilo fino metálico (1.3mm – 3.8mm), cable enrollado o un tubo con púas.

Estos electrodos se sitúan en el medio de las placas y que estos a la vez están conectadas al polo negativo y las placas al polo positivo de una fuente de energía de alto voltaje de aproximadamente (20-100kV), al aplicar una corriente continua de alto voltaje entre los electrodos y las placas se crean campos eléctricos intensos (Carrillo, 2011).

Al atravesar el aire sucio entre estos componentes, los electrodos crean un efecto corona intenso que imparten carga negativa (ioniza) a las partículas de la corriente de gas y por ende la satura de iones negativos a las partículas, que para luego por fuerzas eléctricas del campo eléctrico las hace migrar a la superficie de las placas recolectoras conectadas positivamente y que estas a su vez están conectadas a tierra para que las partículas precipitadas en estas placas disipen su carga negativa para que se neutralicen las partículas, que para luego este material particulado sea desprendido o desalojado fácilmente con la ayuda de mecanismos mecánicos(golpe) o vibradores en las placas y que el material desprendido sea depositado en recipientes o tolvas recolectoras de material sólido, en los PES en seco el particulado es removido por martilleo o golpeteo los cuales hacen vibrar la palca colectora y en PES húmedos el desprendimiento se realiza con agua que lava las partículas de las placas colectoras.

En la figura siguiente se muestra un principio básico de funcionamiento:

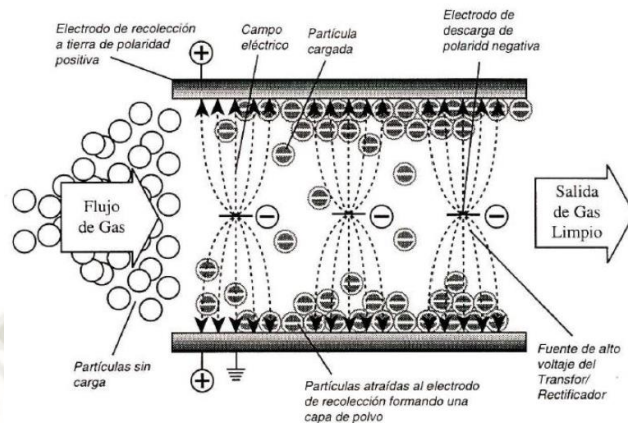


Figura 15. Funcionamiento básico de un precipitador electrostático.

Fuente: Gómez, 2016, pág. 32

2.4.2. Tipos de precipitadores electrostáticos.

En la aplicación de los precipitadores electrostáticos existen diferentes configuraciones en la zona de colección de material particulado, el cual han sido desarrolladas para que tengan una acción de control más eficaces y en otras ocasiones para mantener costos razonables el cual poseen estos equipos, a continuación serán descritos los tipos de precipitadores electrostáticos, (1) el precipitador de placa-alambre, (2) el precipitador placa plana, (3) el precipitador tubular, (4) el precipitador húmedo, el cual puede tener cualquiera de las configuraciones mecánicas anteriores; y (5) el precipitador de dos etapas.

2.4.2.1. Precipitador de placa-alambre.

Los PES de placa-alambre es el diseño más común hasta el momento de un PES. 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, también se emplean frecuentemente para controlar neblinas de ácido y pueden proporcionar un control incidental de compuestos orgánicos volátiles (Saravia, 2008).

En un PES de placa-alambre, el gas fluye entre placas paralelas de metal y electrodos a alto voltaje. Estos electrodos son alambres largos con pesas, que cuelgan entre las

placas o están soportados por estructuras tipo viguetas (armazones rígidas) (Fernandez, 2008).

El PES de placa-alambre permite que muchas líneas de flujo operen en paralelo y cada línea puede ser muy alta. Como resultado, este tipo de precipitador es adecuado para manejar grandes volúmenes de gas.

La necesidad de golpetear las placas para desprender el material recolectado, ha ocasionado que la placa sea dividida en secciones, en ocasiones tres o cuatro en serie una con otra, las cuales pueden ser golpeadas independientemente. Con frecuencia, las fuentes de energía son seccionadas de la misma manera para obtener mayores voltajes de operación y puede emplearse un seccionamiento eléctrico adicional para incrementar la seguridad de funcionamiento.

El polvo también se deposita en el alambre electrodo de descarga y debe ser removido periódicamente en forma similar a la placa de recolección (Fernandez, 2008).

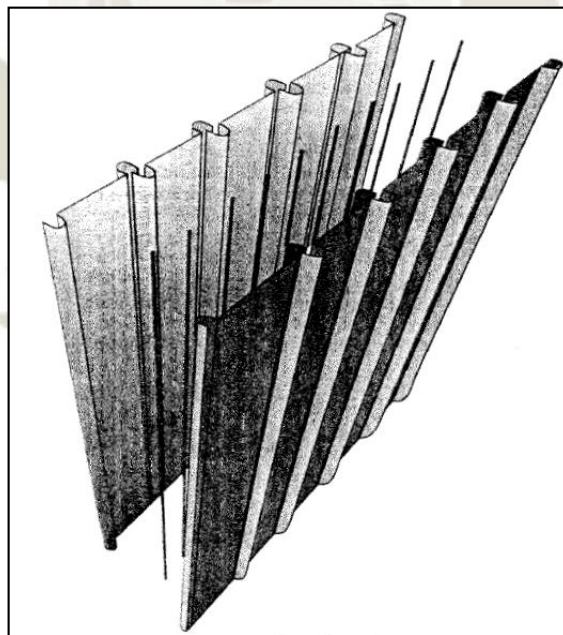


Figura 16. Configuración placa-alambre.

Fuente: Fernández, 2008, pág. 80

El voltaje aplicado a los electrodos causa que el aire entre los electrodos se rompa eléctricamente, una acción conocida como una “corona”. Usualmente, a los electrodos se les da una polaridad negativa porque una corona negativa soporta un voltaje mayor

que una corona positiva antes de que ocurran chispas. Los iones generados en la corona siguen las líneas del campo eléctrico desde los alambres hasta las placas recolectoras. Por lo tanto, cada alambre establece una zona de carga a través de la cual las partículas deben pasar (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2002).

Los PES de placa-alambre pueden ser diseñados para lavado en seco o en húmedo. La mayoría de los PES grandes de placa-alambre, los cuales son construidos en el sitio, son en seco.

Los precipitadores de placa-alambre tienen una amplia variedad de aplicaciones industriales, tales como industrias cementeras, hornos, incineradores, chimeneas, hornos de arco eléctrico, hornos de refinación de petróleo.

2.4.2.2. Precipitador de placas paralelas.

Estos utilizan placas planas en vez de los electrodos. Estas placas planas, incrementan el campo eléctrico promedio que puede ser usado para recolectar las partículas y proporcionan un área superficial aumentada para la recolección de las partículas. Las coronas no pueden generarse sobre las placas planas por sí mismas, por lo que se colocan electrodos generadores de coronas por delante, y a veces por detrás de las zonas de recolección de las placas planas (Fernandez, 2008).

Estos electrodos pueden ser agujas puntiagudas adheridas a los bordes de las placas o alambres de corona independientes. A diferencia de los PESs de placa-alambre 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 (Fernandez, 2008).

Un PES de placa plana opera con poca o ninguna corriente de corona fluyendo a través del polvo recolectado, excepto directamente bajo las agujas o alambres de la corona. Esto tiene dos consecuencias. La primera es que la unidad es algo menos susceptible a la corona invertida que lo que son las unidades convencionales, porque no se genera corona invertida en el polvo recolectado y las partículas cargadas con ambas polaridades de iones tienen gran superficie de recolección disponible. La segunda consecuencia es que la falta de corriente en la capa recolectada causa una fuerza

eléctrica que tiende a remover la capa de la superficie de recolección; esto puede conducir a grandes pérdidas por golpeteo (Fernandez, 2008).

Los PESs de placa plana parecen tener amplia aplicación para partículas de alta resistividad con diámetros másicos medio (*DMMs*) pequeños (de 1 a 2 μm). Estas aplicaciones enfatizan especialmente las fortalezas del diseño porque las fuerzas eléctricas desprendedoras son más débiles para las partículas pequeñas que para las grandes. Las cenizas de carbón han sido recolectadas satisfactoriamente con este tipo de PES, pero una baja velocidad de flujo parece ser crítica para evitar pérdidas altas por golpeteo (Fernandez, 2008).

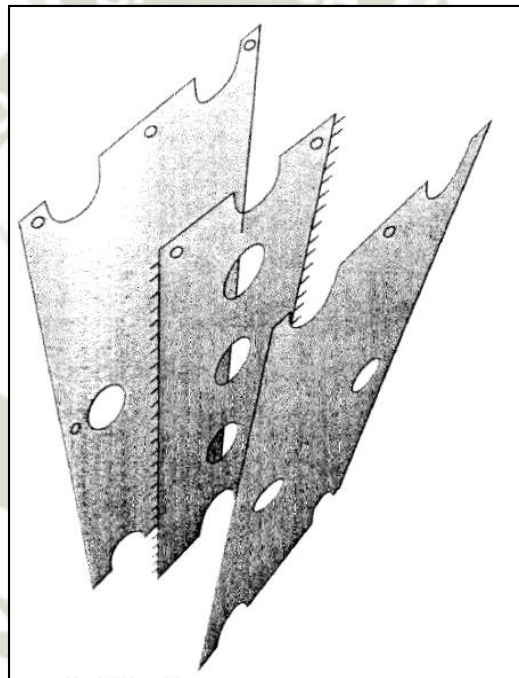


Figura 17. Configuración placa plana planas paralelas.

Fuente: Fernández, 2008, pág. 80

2.4.2.3. Precipitador tubo-alambre.

Los precipitadores originales eran tubulares, en un PES de tubo-alambre, un alambre que trabaja como electrodo de descarga atraviesa a lo largo de un tubo hueco, el cual sirve como superficie colectora. Estos alambres están suspendidos en pesas o en marcos rígidos para evitar que se desplacen a las proximidades del tubo hueco.

Las configuraciones de los tubos pueden ser cuadradas, cilíndricas o hexagonales. De manera que los tubos se montan en forma de panel, por lo tanto los tubos cilíndricos desperdician superficie superficial, que para los tubos cuadrados y hexagonales pueden juntarse con mayor proximidad entre sí, de manera que la parte interior de un tubo es la parte exterior del otro.

Los recolectores de tubo-alambre son muy efectivos para las velocidades bajas de flujo de gas y para recolectar neblinas (eliminador de neblinas). Pueden utilizar métodos de limpieza en seco o en húmedo, pero la mayoría son lavados por un enjuague líquido. Tal como con los recolectores de placa-alambre, el mecanismo de limpieza en un PES de tubo-alambre se localiza por encima de los electrodos.

Estos tubos son por lo general de 6 a 12 pulgadas de diámetro y de 6 a 15 pies de longitud (Kenneth, 1998, págs. 5.2-7).

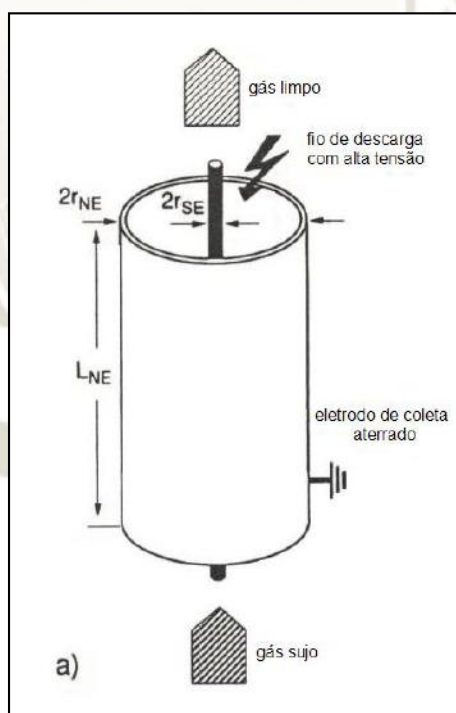


Figura 18. Configuración tubo-alambre.
Fuente: De Meira, 2008, pág. 18

2.4.3. Sistema de acondicionamiento del gas entrante.

Algunos precipitadores electrostáticos trabajan junto con un equipo auxiliar para tener un mejor control del material particulado, el cual en la siguiente figura podemos observar a los diferentes dispositivos.

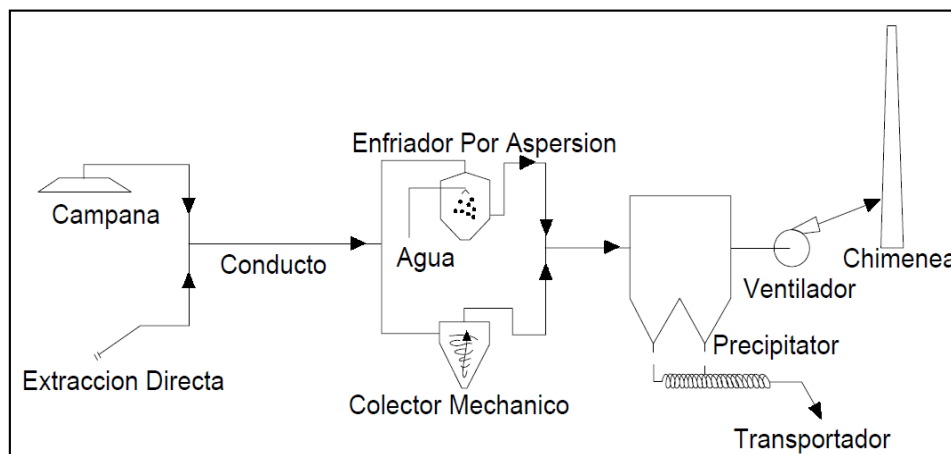


Figura 19. Equipo auxiliar para el control de MP. (Referencia 10)

Fuente: Saravia, 2008, pág. 19

En la figura 19, se muestra una de las configuraciones para tratar de forma eficaz el material particulado, el cual se encuentran campanas extractoras, ductos, zona de tratamiento los cuales pueden ser, colectores mecánicos(ciclones), enfriadores por aspersión, equipo precipitador electrostático, remoción del polvo (bandas transportadoras), ventiladores. Usualmente para extraer el polvo en los lugares de origen del polvo se usan campanas extractoras que estas llevan el gas sucio por ductos o conductos, estos ductos están diseñados según la característica de la corriente de gas. En algunas ocasiones donde el material particulado es muy complicado de ser capturado y también estos gases vienen con temperaturas altas aproximadamente de 700°C hacia los precipitadores electrostáticos se suele usar acondicionamientos del gas, los cuales pueden ser ciclones y enfriadores.

Los ventiladores son equipos que impulsan la corriente de gas a través de todos los equipos, el cual tiene que estar con un correcto diseño, estos pueden instalarse antes o después del Precipitador electrostático esto depende de las características que tenga las características de la corriente que arrastran contaminantes.

2.4.4. Sistemas y componentes del precipitador electrostático.

2.4.4.1. Estructura del precipitador.

La estructura del precipitador incluye todos los componentes de acero, planchas de recubrimiento, los marcos donde están soportadas los electrodos y los colectores, mecanismo de desprendimiento, tolvas de recolección, los ductos y soportes de toda la carcasa. La estructura es una parte principal de todo el equipo, ya que tiene que trabajar en todas las condiciones de operatividad, así como la variedad de uniones que deben utilizarse.

Los componentes en el cual atraviesa las corrientes de polvo deben estar totalmente herméticos para evitar la fuga del polvo fugitivo, por el cual estas zonas deben construirse de la forma adecuada. En algunas industrias donde la corriente de gas entra con alta temperatura aproximadamente 700°C las partes internas deben diseñarse o seleccionarse con materiales que resistan estas temperaturas y también que estos materiales soporten la corrosión.

2.4.4.2. Tolva.

Las tolvas se usan para guardar temporalmente el polvo recolectado antes de desalojarlo. Generalmente están diseñadas con una inclinación de 60° para permitir la caída libre del polvo. Algunos fabricantes añaden aparatos para facilitar y agilizar la descarga. Los diseños generalmente incluyen puertas de acceso que facilitan la limpieza, inspección y mantenimiento de las tolvas (Fernandez, 2008).

El polvo recolectado en las tolvas puede crear problemas especiales si no se remueve rápida o 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 éste toca la parte inferior de los electrodos de descarga, se puede crear un cortocircuito en todo un campo eléctrico. Se pueden usar placas de golpeo, orificios para introducir varas, vibradores, sacudidores y bocinas acústicas. También es muy importante saber que a altas temperaturas el polvo se vuelve fluido (Fernandez, 2008).

2.4.4.3. Mecanismos de descarga.

Los componentes de descarga son usados para evacuar el material sólido acumulado en las tolvas, los cuales pueden ser compuertas, válvulas de descarga tipo rotatorias, bandas transportadoras, transportadores tipo tornillo. Los más usados en precipitadores de dimensiones medianas son las válvulas rotatorias que es una rueda con aspas montadas en un eje movidas por un motor eléctrico, el cual estas aspas permiten la descarga del material hacia lugares de almacenamiento. Para precipitadores de dimensiones grandes se usa bandas transportadoras (feeders) o también transportadores tipo tornillo.

2.4.4.4. Zona de tratamiento.

La zona de tratamiento es donde la corriente de gas está dentro del precipitador, donde el flujo de gas se distribuye en los ductos e ingresa a las secciones donde se encuentran los electrodos y las placas colectoras. Estas zonas se divide en secciones dependiendo del volumen del gas y del tamaño del equipo.

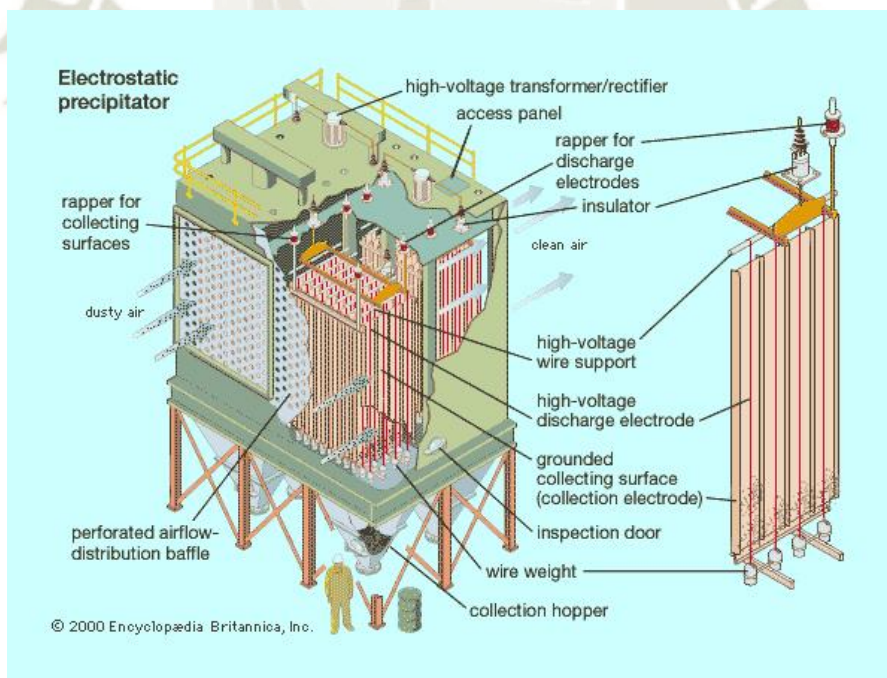


Figura 20. Componentes de un PES
Fuente: WESCO Environmental, Inc, 2010

2.4.4.5. Electrodo de descarga.

Los electrodos es uno de los componentes más principales del PES, el cual este crea una corona ionizante, en donde el paso de las partículas en las cercanías de los electrodos se ionizan o inducen cierta carga que hace que los electrodos emitan un campo eléctrico y una fuerza electrostática de una intensidad muy alta que para luego por efectos de las leyes de la electrostática estas partículas son repelidas a las placas colectoras y otras son adheridas a los electrodos, estos fenómenos se explicará más a detalle en los siguientes subtítulos.

El electrodo de descarga es el componente que genera la descarga de corona en el precipitador. Generalmente, los electrodos de descarga son cables delgados, redondos de 0.13 a 0.38 cm (0.05 a 0.15 pulg.) de diámetro, y los hay disponibles en una variedad de estilos. El tamaño y forma de los electrodos depende de los requerimientos mecánicos del sistema, el fabricante y tipo de proceso (Fernandez, 2008, pág. 84).

Los electrodos generalmente están suspendidos verticalmente entre las placas colectoras, el cual estos electrodos están soportados en el extremo superior del marco del PES y el extremo inferior esta soportado por pesas que tiene una suficiente masa que evitan que estas oscilen y debido a las fuerzas aerodinámicas del flujo de los gases hace que los electrodos oscilen y para solucionar esto se colocó marcos rígidos tanto como en el extremo superior e inferior.

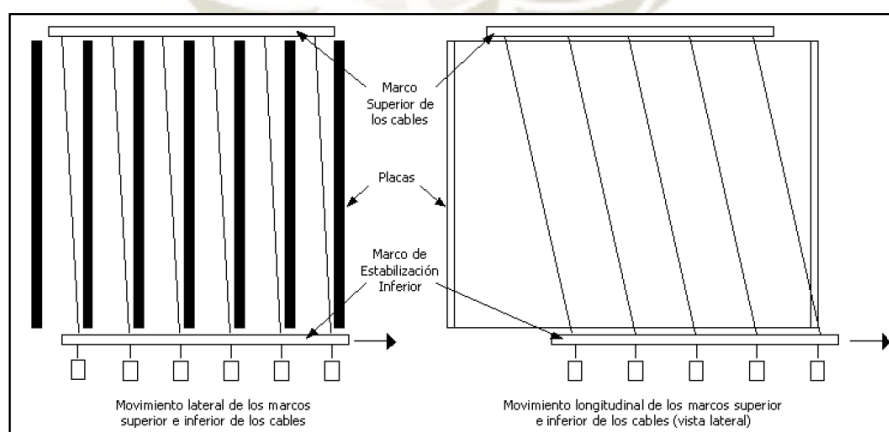


Figura 21. Sistema del electrodo sin estabilización adecuada

Fuente: Fernández, 2008, pág. 86

En la siguiente figura 22 se observa un sistema de marco rígido para los electrodos, el cual es un sistema europeo, en donde este sistema es más estable, rígido y más resistente. El propósito del marco rígido es para eliminar las posibles oscilaciones de los electrodos de descarga.

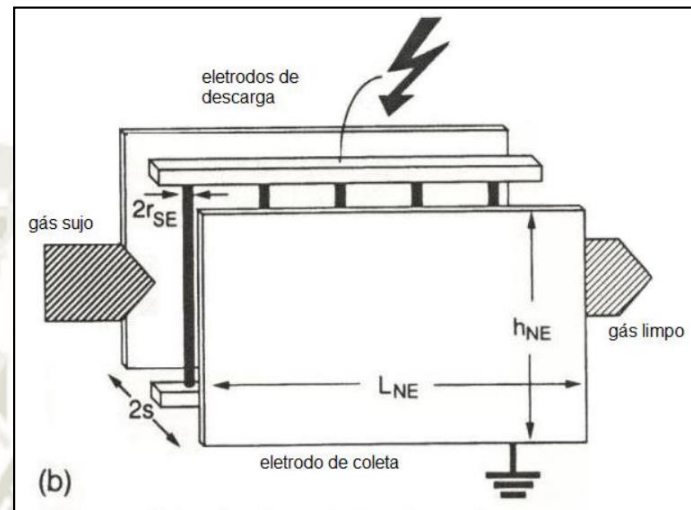


Figura 22. Sistema del electrodo con marco rígido.

Fuente: De Meira, 2008, pág. 18

2.4.4.6. Electrodos de colección (colectores)

Estos también son uno de los componentes principales de un precipitador electrostático, el cual tiene la función de que el material particulado cargado por los electrodos migre hacia los colectores donde se precipitan y se retienen.

El diseño de estas placas es por lo general planas, porque es un método más eficiente y en costos. Las placas generalmente se forman de acero al carbón y están diseñadas para soportar expansión térmica (y contracción) de más o menos 6.35 mm durante su operación. Para condiciones de gases especiales, las placas se pueden hacer de acero inoxidable o aleaciones (Fernandez, 2008). Algunas placas son diseñadas para que se no reintroduzca el polvo a la corriente de gas, esto es debido a los golpes de martillo en el desprendimiento de la placa.

En los siguientes temas se hablara a más detalle la selección y sus características que deben tener los diferentes tipos e placa de colección.

2.4.4.7. Aisladores.

Las líneas de alto voltaje que acarre la corriente del transformador/rectificador al precipitador están aisladas por medio de aisladores eléctricos, estos están hechos de cerámica o plásticos no conductivos. Estos tiene la función de sostener a los conductores en las estructuras bajo condiciones de viento y contaminación ambiental; a la vez como su nombre lo indica aísla el conductor de las estructuras y evitan el efecto corona; los aisladores son fabricados en porcelana, vidrio y en polimérica, ya que brinda gran resistencia a las condiciones ambientales, estos a su vez aíslan de la tierra.



Figura 23. Aisladores típicos

Fuente: Transmisión de energía eléctrica II “Unidad V Aislamiento”, 2017

2.4.4.8. Sacudidores y vibradores.

El material acumulado en las placas colectoras y en los electrodos tiene que ser evacuados y limpiados hacia las tolvas de acumulación, estos mecanismos existen diferentes tipos tanto mecánico como eléctrico. Estos sacudidores y vibradores pueden trabajar en distintos grados de intensidad dependiendo de las condiciones de trabajo.



Figura 24. Vibradores para el sacudido

Fuente: Direct Industry, 2019

2.4.4.8.1. Mecanismo tipo martillo/yunque.

Este es un sistema antiguo en la limpieza, el cual usa un diseño tipo martillo en un eje rotatorio, el cual cuando el eje gira, los martillos caen por gravedad y golpean al yunque que este va unido a los marcos de las placas o el marco de los electrodos. Este mecanismo puede montarse en la parte superior o en las partes laterales de las placas.

La intensidad de sacudido está controlada por el peso de los martillos y longitud del brazo de montaje de martillos (Fernandez, 2008).

La frecuencia de sacudido se puede cambiar ajustando la velocidad del eje rotatorio y el periodo de descanso entre operaciones. Así la intensidad y frecuencia de sacudido se pueden ajustar para condiciones variables. El ajuste de la intensidad no es fácil de efectuarse ya que requiere el cambio de los martillos. Este sistema de sacudido está sujeto a desgaste por abrasión debido a que el mecanismo de rotación está en un ambiente muy hostil.

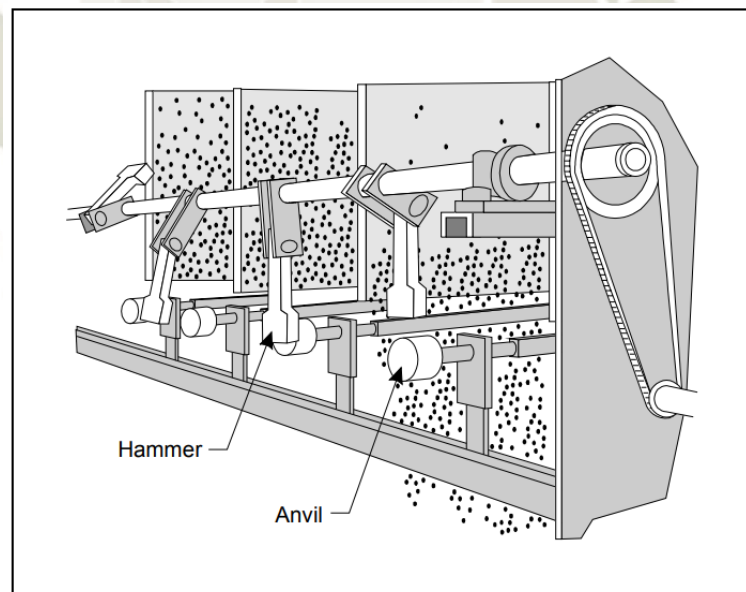


Figura 25. Mecanismo de sacudido

Fuente: pfernandezdiez.es, pág. 12

2.4.4.8.2. Vibradores.

Estos componentes suelen utilizarse en los electrodos ionizantes, el cual necesita que el polvo acumulado sea limpiado para evitar que se interfiera la generación de

corona. Los vibradores se montan externamente sobre el techo del precipitador y se conectan por medio de barras a los marcos de alta tensión que soportan los electrodos de descarga. Un aislador, localizado por encima de la barra, aísla eléctricamente los sacudidores mientras que mecánicamente transmite la fuerza de sacudido. Para los electrodos de descarga de estilo rígido, se pueden utilizar sacudidores de impulso magnético.

2.4.4.9. Transformador.

El Transformador / Rectificador es una combinación de un transformador y un rectificador de onda completa. El transformador aumenta 480 VCA de entrada a 45 y 60 kVCD promedio. El rectificador convierte la corriente alterna de salida del secundario del transformador a una onda completa rectificadas de CD. Un T/R típico usado en el precipitador está lleno de aceite para enfriamiento y aislamiento. Sus valores típicos se muestran en la tabla 11 (Fernandez, 2008, págs. 92,93).

Tabla 11

Valores típicos de un T/R en un precipitador electrostático

Voltaje primario RMS:	400VCA
Corriente primaria RMS:	240 A
Voltaje promedio secundario:	45000 VCD prom
Corriente promedio secundaria:	1500 mA
Razón de vueltas del transformador:	1:135

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 93

En la mayoría de los precipitadores, se conecta un T/R a una o dos secciones, y éste, está conectado a los electrodos de descarga por una línea de bus. La línea de bus es un conductor que lleva el alto voltaje del T/R a los electrodos de descarga. El conductor puede ser un cable aislado o tubería de acero. Está cubierto por un ducto que protege la línea del ambiente y evita riesgos de seguridad. Las líneas del bus de alto voltaje están aisladas del marco y estructura del precipitador por medio de un plástico no-conductor o con material de cerámica (Fernandez, 2008, pág. 93).

2.4.5. Teoría de la precipitación electrostática.

En este inciso veremos más a detalle la teoría de la precipitación electrostática, el cual se verá el funcionamiento y las leyes electrostáticas que influyen en el diseño de este equipo, así como las características las corrientes de material particulado que ingresan a esta máquina, las partes más importantes como son los electrodos y las placas colectoras del precipitador que son componentes que determinan la eficiencia del equipos así como otras partes que también están influenciadas.

2.4.5.1. Ley de Coulomb y cargas eléctricas.

La ley de Coulomb, el cual se estudió la interacción entre cargas eléctricas y las fuerzas que actúan sobre ellas. De este modo Coulomb estableció la que ahora se llama la ley de Coulomb “La magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa” (Young & Sears, 2009). La expresión completa de la magnitud de la fuerza entre dos cargas puntuales es, por lo tanto:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r_q^2} \quad (2.4)$$

Dónde:

F: Magnitud de la fuerza de cada carga [N]

q_1 : Carga puntual uno [C]

q_2 : Carga puntual dos [C]

r_q : Distancia de separación entre cargas puntuales [m]

k: Constante de proporcionalidad denominada constante eléctrica del vacío, $8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 = 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \quad , \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r_q^2} \quad (2.5)$$

De la anterior expresión por principios de la electrostática, es decir entre cargas eléctricas se ve que, “dos cargas positivas se repelen entre sí, al igual que dos cargas negativas. Una carga positiva y una negativa se atraen” (Young & Sears, 2009). En la siguiente figura 26 se muestra la interacción de cargas y la ley de coulomb representada.

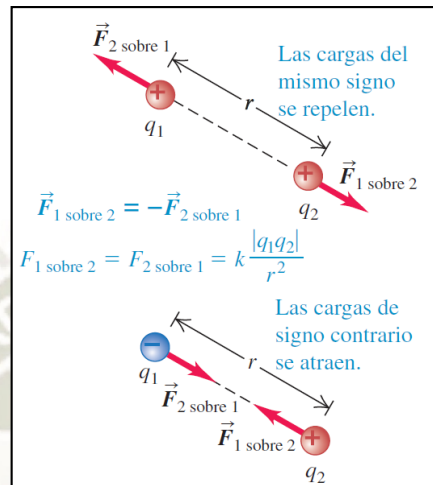


Figura 26. Interacción de cargas puntuales

Fuente: Young & Sears, 2009, pág. 716

2.4.5.2. Campo eléctrico.

La interacción eléctrica entre partículas cargadas se puede volver a formular utilizando el concepto del campo eléctrico. Ahora bien, el campo eléctrico es una propiedad física creada por toda partícula cargada en su alrededor, que al colocar cualquier otro cuerpo dotado de carga eléctrica en sus proximidades experimenta una fuerza eléctrica. El campo eléctrico tiene valor en cada punto del espacio que rodea a la carga, a dicho valor se le denomina intensidad de campo eléctrico.

Entonces el campo eléctrico \vec{E} en un punto como la fuerza eléctrica \vec{F}_0 que experimenta una carga de prueba q_0 en dicho punto, dividida entre la carga q_0 . Es decir, el campo eléctrico en cierto punto es igual a la fuerza eléctrica por unidad de carga que una carga experimenta en ese punto (Young & Sears, 2009, pág. 722).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \text{ecuac (6)} \quad (2.6)$$

Dónde:

E: Intensidad de campo eléctrico [N/C]

F: Fuerza creada por la carga puntual Q [N]

q_0 : Carga de prueba [C]

Si se conoce el campo eléctrico \vec{E} en cierto punto, la ecuación (2.6) se reacomoda y da la fuerza \vec{F}_0 experimentada por una carga puntual q_0 colocada en ese punto. Esta fuerza es igual al campo eléctrico \vec{E} producido en ese punto por cargas distintas de q_0 , multiplicado por la carga q_0 (Young & Sears, 2009, pág. 722).

$$\vec{F} = q_0 \vec{E} \quad (2.7)$$

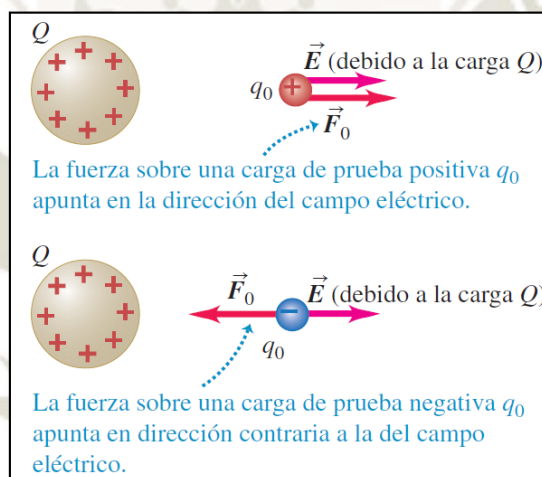


Figura 27. Fuerza y campo eléctrico en una carga de prueba

Fuente: Young & Sears, 2009, pág. 716

Para luego reemplazando la ecuación (2.5) en la ecuación (2.6), y cambiando a q_2 por q_0 se tiene que el campo eléctrico creado por la carga puntual q_1 está dado por.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{r} \quad (2.8)$$

A continuación se muestra como son las líneas de campo eléctrico entre cargas con el signo correspondiente.

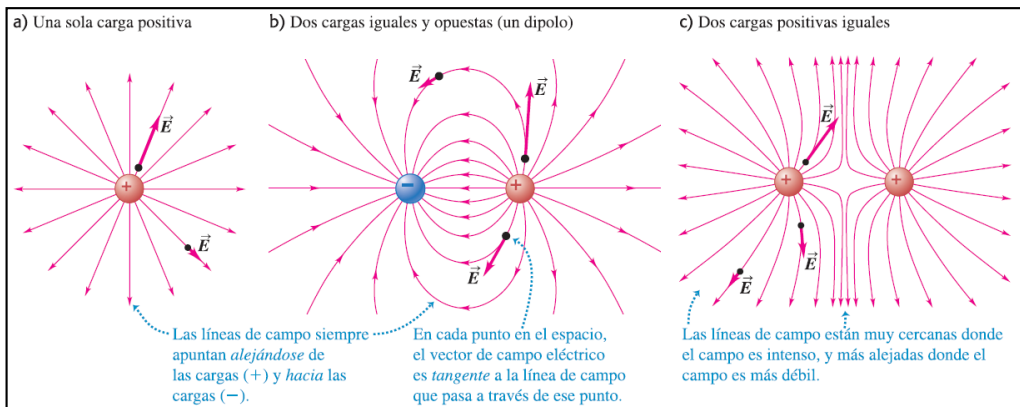


Figura 28. Líneas de campo para diferentes distribuciones de carga.

Fuente: Young & Sears, 2009, pág. 736

2.4.5.3. Movimiento de partículas cargadas en campos eléctricos.

En una región de un campo eléctrico al colocarse una carga testigo o una partícula cargada “q” positiva en esta región, entonces el campo eléctrico ejerce una fuerza F sobre la carga en la misma dirección del campo eléctrico (por ser positiva la carga) como se ve en la figura 29, luego la partícula se moverá a lo largo de línea de fuerza, constituyéndose ésta en la trayectoria (Portugal, 2012).

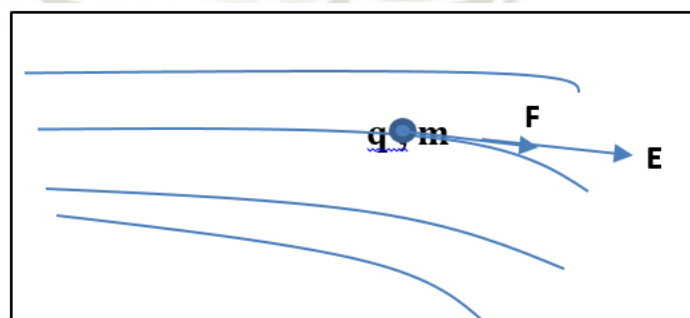


Figura 29. Movimiento de la partícula cargada.

Fuente: Portugal, 2012, pág. 19

Como la partícula cargada tiene también masa “m”, entonces de acuerdo a la segunda ley de Newton la fuerza es,

$$F = ma \quad (2.9)$$

Dónde:

F: Fuerza externa neta sobre un cuerpo [N]

a: aceleración en dirección que la fuerza externa [m/s²]

m: masa del cuerpo [kg]

Entonces igualando las ecuaciones (2.7) y (2.9) se deduce que la aceleración de la partícula cargada dentro de un campo eléctrico cualesquiera está dada por,

$$\mathbf{a} = \frac{q}{m} \mathbf{E} \quad (2.10)$$

Según un campo eléctrico uniforme en dirección como muestra la figura 29 si se coloca una partícula positiva la fuerza eléctrica tendrá el mismo sentido que el campo y si la carga es negativa, entonces la fuerza será en sentido opuesto a las líneas de campo (Portugal, 2012).

2.4.5.4. Campo eléctrico de una varilla (electrodo).

En un precipitador electrostático los electrodos son varillas cargadas con carga negativa, entonces el campo eléctrico creado en los alrededores de esta varilla está dado por la siguiente expresión.

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 x} \quad \text{ecuac(11)} \quad (2.11)$$

Dónde:

E: Intensidad de campo eléctrico de una varilla[N/C]

x: Distancia entre la varilla y el campo eléctrico en cualquier punto de las proximidades del objeto[m]

ϵ_0 : $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

λ : Densidad lineal de carga (cantidad de carga contenida en la unidad de longitud) $\lambda = \frac{q}{L}$ [C/m]

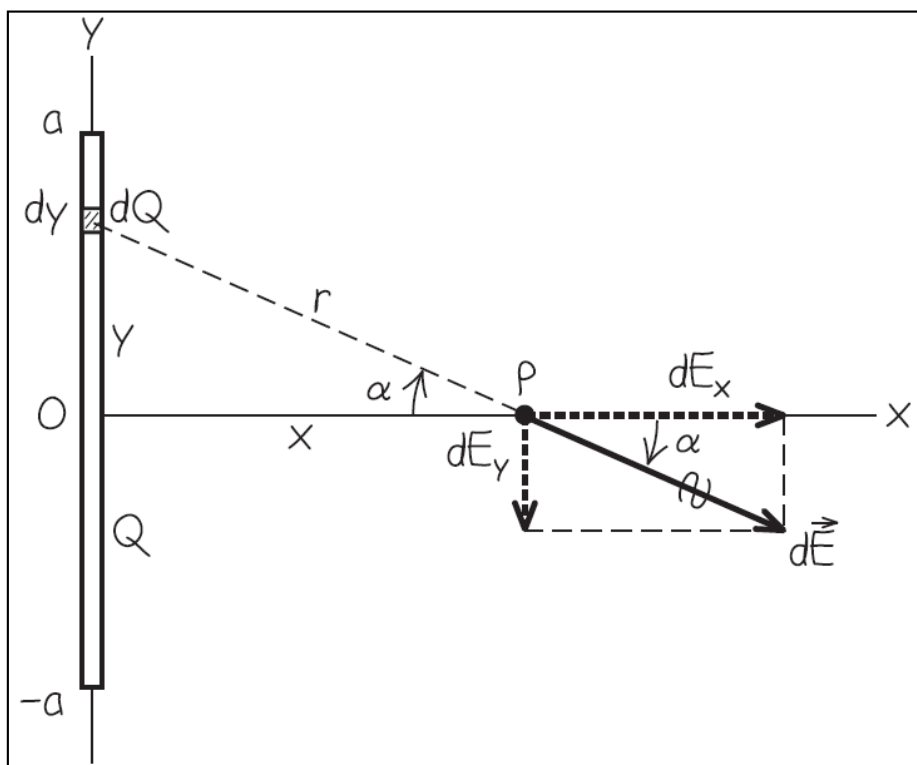


Figura 30: Esquema de la varilla (electrodo)

Fuente: Young & Sears, 2009, pág. 722

2.4.5.5. Potencial eléctrico.

El potencial es la energía potencial por unidad de carga. Se define el potencial V en cualquier punto en el campo eléctrico como la energía potencial U por unidad de carga asociada con una carga de prueba q_0 en ese punto (Young & Sears, 2009, pág. 787).

$$V = \frac{U}{q_0} \quad (2.12)$$

Dónde:

V : Potencial que experimenta un cuerpo cargado [V] o [J/C]

U : Energía potencial del cuerpo cargado [J]

q_0 : carga de prueba a cierta distancia que experimenta el cuerpo cargado [C]

Potencial debido a una carga puntual, dividimos la ecuación (2.12) entre q_0 (Young & Sears, 2009, pág. 788).

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (2.13)$$

Dónde:

q : Carga puntual [C]

r : Distancia de la carga puntual [m]

Obtención del potencial eléctrico a partir del campo eléctrico (Young & Sears, 2009, pág. 789):

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} d\vec{l} = \int_a^b E \cos\phi dl \quad (2.14)$$

Dónde:

$V_a - V_b$: Diferencia de potencial entre los puntos a y b [V]

E : Campo eléctrico de un cuerpo cargado [C] [V/m]

dl : Diferencia de distancia para para trasladar un cuerpo

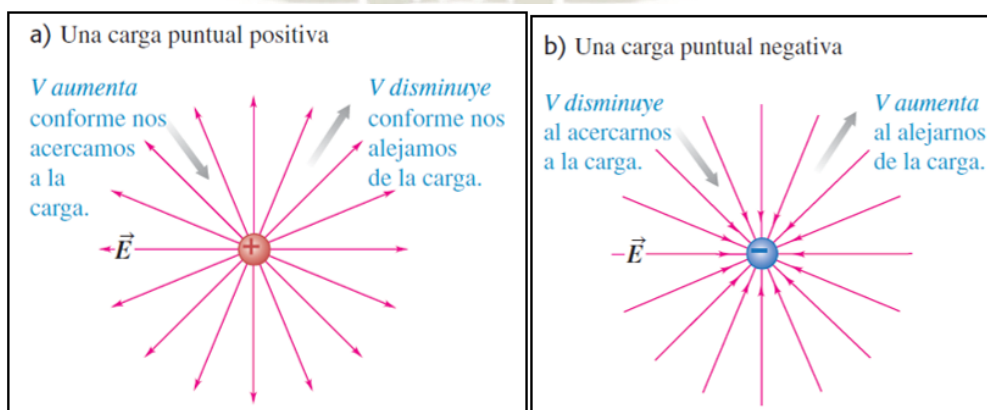


Figura 31. Potencial eléctrico en cargas positivas y negativas.

Fuente: Young & Sears, 2009, pág. 789

2.4.5.6. Ionización y descarga de corona.

El potencial está limitado porque las moléculas de aire se ionizan y el aire se convierte en un conductor, a una magnitud de campo eléctrico cerca de 3×10^6 V/m (Young & Sears, 2009, pág. 795).

2.4.5.7. Potencial eléctrico de varilla (electrodo)

El potencial eléctrico de una varilla la podemos obtener de la ecuación (2.11) reemplazando en la ecuación (2.14).

$$V_a - V_b = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (2.15)$$

Dónde:

$V_a - V_b$: Diferencia de potencial entre los puntos a y b [V]

r_b : Distancia radial más lejano [m]

r_a : Distancia radial más cercano [m]

λ : Densidad lineal de carga (cantidad de carga contenida en la unidad de longitud) $\lambda = \frac{q}{L}$ [C/m]

El campo eléctrico en cualquier punto entre un filamento y un cilindro exterior.

$$E = \frac{V_{ab}}{\ln \left(\frac{r_b}{r_a} \right)} \frac{1}{r} \quad (2.16)$$

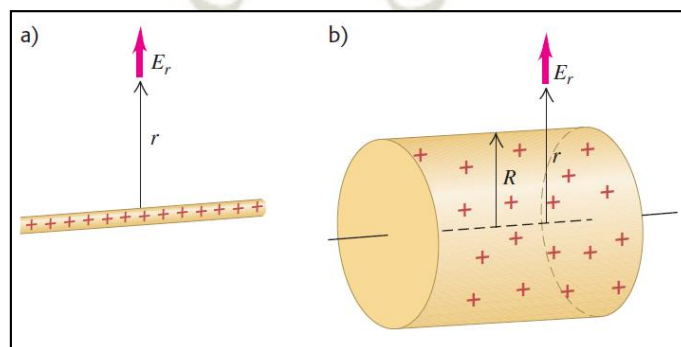


Figura 32. Campo eléctrico afuera de a) un alambre largo con carga positiva. b) un cilindro con carga positiva

Fuente: Young & Sears, 2009, pág. 797

2.4.5.8. Distribución del gas en el recorrido del precipitador.

En algunos equipos los campos están seccionados, esto quiere decir que hay fuentes de poder y controles de forma independiente que ajustan las variaciones de las condiciones del gas dentro de la unidad, entonces las “secciones” representa un conjunto de placas y electrodos en la dirección del flujo, y cada sección tiene una intensidad de campo diferente, ya que al poseer más secciones la eficiencia de recolección aumenta.

La necesidad de tener campos separados surge principalmente porque los requerimientos de entrada de potencia varían en distintas localidades dentro del precipitador. La concentración de masa de partículas es generalmente alta en las secciones de entrada del precipitador como resultado de la alta concentración de polvo que suprime la corriente de corona. En los campos siguientes, la carga de polvo es menos concentrada. Consecuentemente, la corriente fluye más libremente. La carga de partículas estará limitada por chispeo en los campos de entrada más que en los de la salida. La potencia a las secciones de salida debe ser alta para poder recolectar las partículas pequeñas (Fernandez, 2008, pág. 101).

En la figura 33 siguiente nos muestra cómo se distribuye la corriente de gas en el seccionamiento del equipo, según dirección de flujo de la corriente de gas.

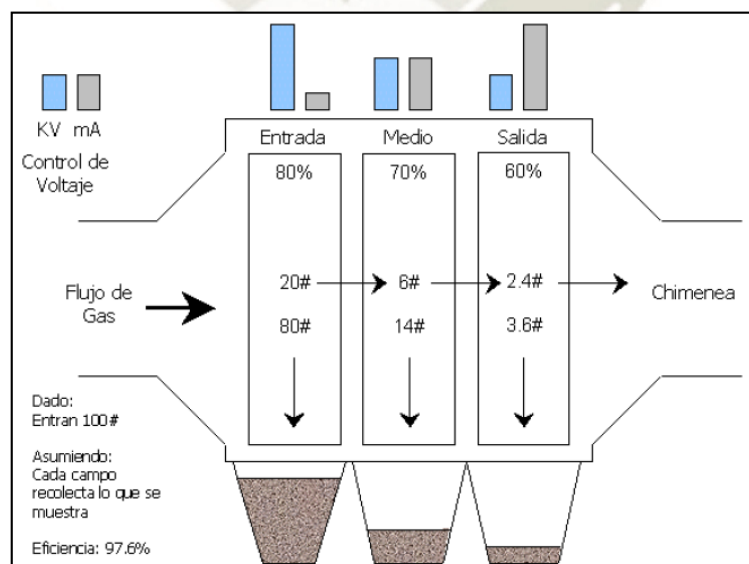


Figura 33. Distribución del polvo y niveles de voltaje.

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 101

Otras razones por las cuales se configura así un precipitador electrostático, es que cada campo actúa como un precipitador independiente precedido o seguido por otro precipitador independiente, entonces cada sección tiene su propio campo con su fuente de energía y controles independientes, esto permite mayor flexibilidad a la energización del campo individual para condiciones variables dentro del precipitador. Se ha visto que para tener eficiencias del 99% se debe diseñar con tres o más campos (Fernandez, 2008, pág. 102).

Otra razón importante para tener múltiples campos en un precipitador es la posibilidad de fallas eléctricas en uno o varios campos. Las fallas eléctricas pueden ocurrir como resultado de varios eventos como tolvas muy llenas, rompimiento de cables o falla de la fuente de poder. Los precipitadores con mayor número de campos dependen menos de la operación de los otros campos para obtener una alta eficiencia de recolección (Fernandez, 2008, pág. 102).

2.4.5.9. Ionización de las partículas.

Una descarga de corona en los electrodos es el más común para ionizar la corriente de gas que arrastra el material particulado, este gas está formado normalmente por moléculas neutras. Una descarga de corona ocurre entre dos electrodos energizados a una alta diferencia de potencial, en donde un campo eléctrico a alta intensidad es necesario para la producción de una gran cantidad de iones en fase gaseosa.

El voltaje aplicado a los electrodos causa que el aire entre ellos se rompa eléctricamente, una acción conocida como una “corona”. Usualmente, a los electrodos se les da una polaridad negativa porque una corona negativa soporta un voltaje mayor que una corona positiva antes de que ocurran chispas (Fernandez, 2008, pág. 104).

Al aumentar el voltaje en los electrodos la intensidad del campo eléctrico en las proximidades del emisor aumenta hasta el punto que los iones y los electrones sean acelerados pudiendo provocar la ionización de otras partículas neutras por impacto entre ellas, este fenómeno se conoce con el nombre de avalancha, y se repite con una determina frecuencia.

A medida que estas cargas eléctricas se aproximan a las partículas de polvo eléctricamente neutras, un dipolo inducido se establece en la materia del particulado

mediante la separación de la carga dentro de las partículas. Como un dipolo, la partícula en sí permanece neutral mientras que las cargas positivas y negativas dentro de las partículas se concentran dentro de áreas separadas. Las cargas positivas dentro de la partícula se atraen hacia el área de la partícula más cercana al ion negativo que se aproxima. A medida que un ion negativo hace contacto con el material particulado, las cargas positivas inducidas retendrán alguna carga eléctrica del ion. Esto resulta en una carga negativa neta sobre el particulado previamente neutral. Es requerida la presencia de una carga eléctrica para que el campo eléctrico ejerza una fuerza sobre la partícula y remueva el particulado de la corriente de gas (Kenneth, 1998).

La creación de la corona en el electrodo emisor se encuentra dos zonas la cuales son la zona activa donde se encuentran los iones positivos, iones negativos, electrones libres, y en la zona pasiva donde se produce la carga de las partículas figura 34.

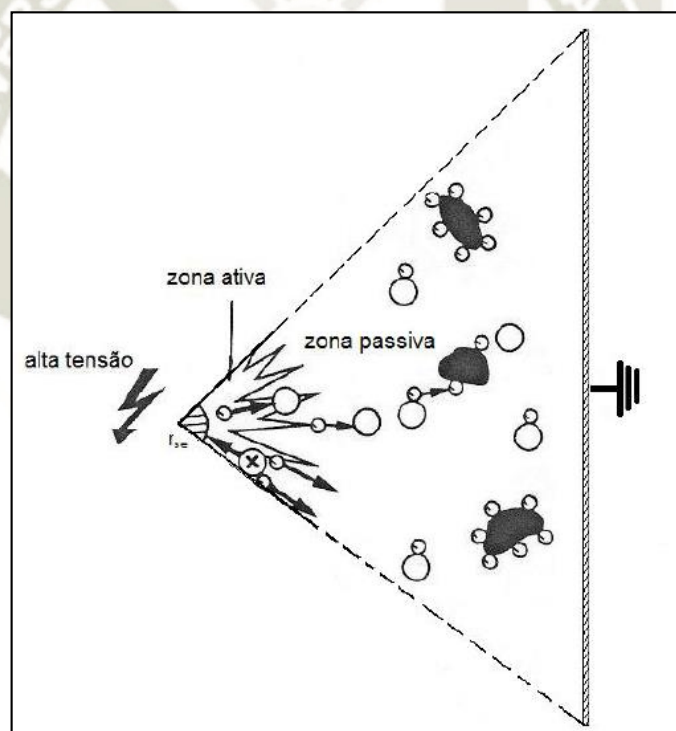


Figura 34. Efecto corona

Fuente: De Meira, 2008, pág. 20

Hay dos mecanismos en los cuales las partículas se cargan al atravesar la zona principal del precipitador electrostático, el cual estos dos mecanismos se explicarán a continuación.

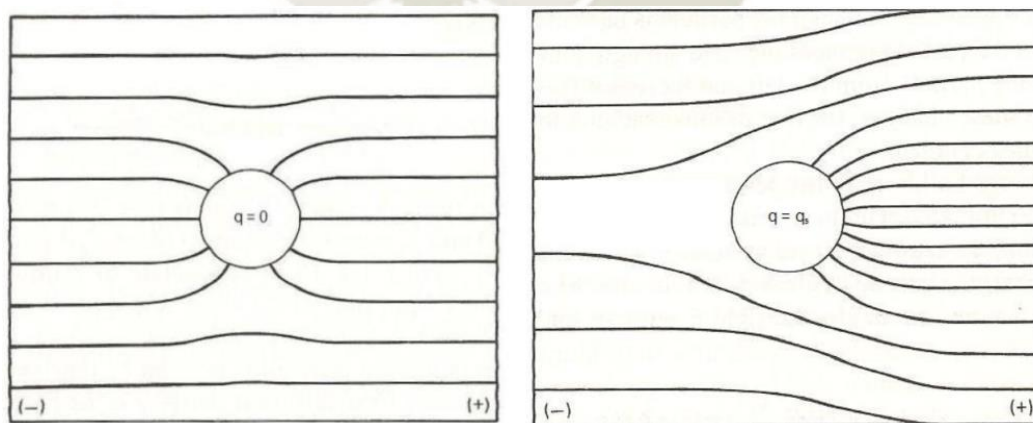
2.4.5.9.1. Carga por Campo Eléctrico.

Los dos mecanismos a cargar una partícula es la del efecto del campo y la carga por difusión, la diferencia estos dos mecanismos varían según el tamaño de partícula. La carga por campo ocurre cuando los iones negativos generados por la corona del electrodo siguen las líneas de campo que para luego estas terminan impregnadas sobre la partícula.

La carga por campo domina para partículas de tamaño mayor a $1\mu\text{m}$ (Fernandez, 2008, pág. 105). Al ingresar las partículas al campo eléctrico, los iones negativos que siguen las líneas de campo chocan con las partículas suspendidas cargándolas inmediatamente.

Los iones continúan chocando hasta que la carga sea suficiente para desviar las líneas eléctricas. Esto evita que nuevos iones choquen con partículas de polvo ya cargadas. Cuando una partícula ya no recibe carga de iones, se dice que se ha saturado. Las partículas cargadas saturadas emigran al electrodo de recolección (Fernandez, 2008).

A continuación se muestra una figura de la forma como se carga una partícula al entrar en un campo eléctrico.



a)

b)

Figura 35. Líneas de campo eléctrico a) partícula descargada. b) partícula con carga de saturación

Fuente: De Meira, 2008, pág. 21

La carga por campo está dada según referencia (Nevers, 2000, pág. 242).

$$q_c = \left(\frac{3k}{k+2} \right) \pi \epsilon_0 d^2 E \quad (2.17)$$

Dónde:

q_c :	Carga por campo	[C]
ϵ_0 :	Permitividad del espacio vacío	[C ² /Nm ²]
d :	Diámetro de la partícula	[m]
E :	Intensidad de Campo eléctrico	[V/m] [N/C]
k :	Constante dieléctrica de la partícula	[adimensional]
	$k=1.0$ (vacío-aire) y $4 < k < 8$ (partículas sólidas-aire)	

2.4.5.9.2. Carga por Difusión.

El otro mecanismo para cargar las partículas en la corriente de gas que atraviesa el precipitador es la carga por difusión, el cual este mecanismo está asociado con el movimiento browniano al azar de los iones negativos del gas.

Este movimiento de los iones está relacionado con la velocidad debido al efecto térmico, que a mayor temperatura, mayor movimiento, este es un mecanismo dominante de cargar partículas (menores 0.2 micras).

Los iones negativos chocan con las partículas debido a su movimiento térmico al azar y se cargan. Ya que las partículas son muy pequeñas, no hacen que el campo eléctrico se desvíe como en la carga de partículas.

Estas partículas pequeñas dependen del movimiento al azar de los iones negativos para que las carguen negativamente. Las partículas cargadas emigran al electrodo de recolección (Fernandez, 2008).

La carga por difusión está dada según referencia (Parker & Plaks, 2004, págs. 2-3)

$$q_d = \frac{1}{2} \frac{dKT}{q_e^2} \quad (2.18)$$

Dónde:

q_d :	Carga por difusión	[C]
d :	Diámetro de la partícula	[m]
K :	Constante de boltzmann	[J/K]
	$K \approx 1.38 \times 10^{-23}$	
T :	Temperatura absoluta	[K]
q_e :	Carga del electrón	[C]
	$q_e \approx 1.67 \times 10^{-19}$	

El polvo procede de procesos industriales, el cual contiene partículas en un rango de tamaños en el que ambos procesos son importantes. Por lo que ambos mecanismos de carga afectan al conjunto de partículas.

$$q_t = q_c + q_d \quad (2.19)$$

2.4.5.10. Recolección del polvo en los colectores tipo placa.

Una vez que las partículas fueron cargadas o ionizadas por el efecto corona que es creado por electrodo de descarga, estas partículas migran hacia los colectores tipo placa de carga opuesta que sostiene a las partículas en su lugar hasta que el colector sea limpiado, el movimiento de las partículas hacia los colectores es debido a la fuerza electrostáticas del campo eléctrico que ocurre en el precipitador, el cual hace que migre a las placas colectoras, en los puntos 2.4.5.1. hasta 2.4.5.7 se desarrolló los principios básicos electrostáticos que ocurre en el precipitador electrostático.

El movimiento de las partículas (mayores de 10 a 20 μ m) seguirá más o menos una trayectoria determinada por la velocidad promedio del gas y la velocidad eléctrica promedio de las partículas. La trayectoria para las partículas más pequeñas (<10 micras) será menos directa, puesto que los efectos inerciales del flujo turbulento del gas predominan por encima de la velocidad eléctrica inducida por la carga eléctrica relativamente menor. El movimiento en general de las partículas más pequeñas, sin embargo, será hacia el electrodo recolector (Kenneth, 1998, págs. 5.2-4, 5.2-5).

El movimiento de las partículas está influenciado por el campo eléctrico al cual se le opone la viscosidad del gas, el cual la velocidad de migración de las partículas está dada por (Theodore, 2008, pág. 407).

$$W = \frac{q_t E}{3\pi\mu d} \quad (2.20)$$

Dónde:

W:	Velocidad de migración	[m/s]
d:	Diámetro de la partícula	[m]
E:	Intensidad de campo eléctrico	[V/m] [N/C]
μ :	Viscosidad dinámica del gas	[Pa s]
q_t :	Carga total de la partícula	[C]

En la siguiente tabla 12. Se observa algunas velocidades típicas de migración aplicado a diferentes partículas.

Tabla 12

Valores típicos de velocidades de migración encontrados en la práctica industrial

Aplicación	Velocidad de migración de la partícula (W)
	ft/s
Carbón pulverizado (ceniza volátil)	0.33-0.44
Fábricas de papel	0.25
Horno de hogar abierto	0.19
Alto horno secundario (80% de fundición gris)	0.41
Yeso	0.52-0.64
Fósforo caliente	0.09
Niebla acida (H ₂ SO ₄)	0.19-0.25
Niebla acida (TiO ₂)	0.19-0.25
Calcinador instantáneo	0.25
Calcinador de hogar múltiple	0.26
Fabricación de cemento portland (proceso húmedo)	0.33-0.37
Fabricación de cemento portland (proceso seco)	0.19-0.23
Partículas de catalizador	0.25
Cubilote de hierro gris (relación hierro-coque =10)	0.10-0.12

Fuente: Theodore, 2008, pág. 407

2.4.5.11. Descarga de partículas en las placas colectoras.

Al momento en que las partículas llegan a las placas colectoras, están llegando ionizadas con carga negativa o positiva en donde estas descargan su carga de forma parcial, ya que la placa colectora está conectada a tierra y la carga se transfiere lentamente a la placa de recolección a tierra. Una porción de la carga se realinea y contribuye a las fuerzas intermoleculares de cohesión y adhesión que fijan las partículas a las placas. Las partículas se mantienen en las placas por fuerza de adhesión. Las partículas nuevas se adhieren a las partículas recolectadas por fuerzas de cohesión. La capa de polvo se acumula en la placa a un grosor de 0.08 a 1.27 cm cuando se inicia el ciclo de sacudido (Fernandez, 2008, pág. 109).

2.4.5.12. Eficiencia del precipitador.

Los precipitadores electrostáticos cuentan con la capacidad de recolectar más del 99% en la mayoría de tamaños de material particulado, por ende la eficiencia de este equipo depende de varios factores, ya sea como la resistividad del material, la temperatura de los gases, la composición química, y la distribución del tamaño de las partículas.

La mejor forma de conocer la eficiencia de un PES, es estudiar la relación conocida como la ecuación de *Deutsch-Anderson*. (Fernandez, 2008). Esta ecuación se ha usado por varios años para el diseño, análisis y comparación de los precipitadores electrostáticos, el cual se escribe a continuación:

$$n_c = 1 - e^{-\left(\frac{WA}{Q}\right)} \quad (2.21)$$

Dónde:

- n_c : Eficiencia de recolección del PES
- W : Velocidad de migración [m/s]
- A : Área de la placa de recolección efectiva del PES [m²]
- Q : Razón de flujo de gas a través del PES. [m³/s]
- e : Base de logaritmo natural ≈ 2.718

Desafortunadamente, aunque la ecuación es válida, no considera tres variables significativas en el proceso.

1. Ignora la reintroducción del polvo que pueda ocurrir en el proceso de sacudido (Theodore, 2008, pág. 408).
2. Asume que el tamaño de las partículas y su velocidad de migración son uniformes para todo el flujo de gas. Esto no es cierto, las partículas mayores generalmente tienen una mayor velocidad de migración que las más pequeñas (Theodore, 2008, pág. 408).
3. Asume que el flujo de gas es uniforme a lo largo del precipitador y que no hay fuga de partículas por las tolvas en vez de por las cámaras del precipitador, evitando ser recolectadas por no estar sujetas al campo eléctrico (Theodore, 2008, pág. 408).

La ecuación (2.21) se usa para estimar la eficiencia de colección del precipitador electrostático. Entonces para esto hay varias modificaciones de esta ecuación, el cual afecta varios parámetros el cual se describirán en los siguientes puntos, se refiere a la ecuación de *Matts-Ohnfeldt*, el cual añade una constante “m” que proporciona una predicción más precisa del rendimiento del PES, en donde “m” está entre rangos típicos de (0.4 y 0.7), siendo 0.5 como la norma (Theodore, 2008).

$$n_c = 1 - e^{-\left(\frac{WA}{Q}\right)^m} \quad (2.22)$$

Dónde:

m: constante entre (0.4 y 0.7)

2.4.5.13. Carga másica capturado en el precipitador electrostático.

En este punto se calcula el flujo másico en la salida del precipitador electrostático, según los parámetros electrostáticos, cantidad de polvo en el ingreso, y las dimensiones del equipo.

- De la ecuación (2.3) tenemos:

$$n_c = \frac{m_i - m_s}{m_i} \times 100\% \quad (2.3)$$

- De la ecuación (2.21) tenemos:

$$n_c = 1 - e^{-\left(\frac{WA}{Q}\right)} \quad (2.21)$$

- Igualando las expresiones (2.3) y (2.21) de eficiencia de colección (n_c), entonces tenemos la relación de flujo másico en la salida del precipitador:

$$m_s = m_i * e^{-\left(\frac{WA}{Q}\right)} \quad (2.23)$$

Dónde:

m_i : Carga másica o concentración de MP a la entrada del dispositivo [g/m³].

m_s : Carga másica o concentración de MP a la salida del dispositivo [g/m³].

W : Velocidad de migración [m/s]

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

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

e : Base de logaritmo natural ≈ 2.718

2.4.5.14. Área de recolección específica.

El área de recolección específica (SCA) está definida como la relación entre el área superficial de recolección con la razón de flujo del gas en el colector. Este término representa la relación de A/Q en la ecuación de *Deutsch-Anderson* (Fernandez, 2008, pág. 112).

$$SCA = \frac{A}{Q} \quad (2.24)$$

Dónde:

SCA: Área de recolección específica [s/m]

A: Área total de la superficie de recolección [m²]

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

Este parámetro utilizado nos sirve para comparar el uso de precipitadores electrostáticos y analizar la eficiencia en la recolección de las partículas. Este parámetro es uno de los factores importantes para diseñar el PES, el cual influye en los costos, mantenimiento y la disposición del polvo. A continuación se muestra una tabla 13 en la cual se proporciona SCAs equivalentes en las diferentes unidades, según el tamaño del equipo.

Tabla 13

SCAs pequeñas, medianas y grandes en varias unidades

Unidades	Pequeñas	Medianas	Grandes
Pie ² /kacfm ^a	100	400	900
s/m	19.7	78.8	177
s/pie	6	24	54

^a 5.080 pie² /kacfm =1 (m/s)

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 113

El número total de placas (tamaño) y el volumen total del gas, tienen un efecto directo en la eficiencia del precipitador. Si el precipitador fuera el doble de su tamaño, la eficiencia aumentaría porque el SCA aumentaría. Sin embargo, es extremadamente costoso aumentar el área de las placas en el precipitador. Esto implicaría añadir campos de recolección o aumentar la altura del precipitador para tener más área. Si se reduce el volumen del gas, aumenta el SCA. Esto a su vez aumentará la eficiencia. Pero el reducir el volumen del gas, disminuye la producción lo que implica que la solución es también bastante costosa (Fernandez, 2008, pág. 113).

2.4.5.15. Mecanismos que afectan a la eficiencia de recolección.

Existen varias condiciones que afectan a la eficiencia del precipitador, por ejemplo la resistividad del material, la reintroducción del material a la corriente principal, la

temperatura, el efecto corona, a continuación se describirá algunos mecanismos que afectan al rendimiento del PES.

2.4.5.15.1. Resistividad del polvo.

La resistividad de las partículas es un factor que afecta a la eficiencia de recolección del precipitador electrostático, la resistividad es la resistencia eléctrica que puede describir como la resistencia a la transferencia de carga del polvo. La resistividad es la resistencia eléctrica 1cm^3 de polvo expresado en $\Omega\text{ cm}$.

La eficiencia de un PES está limitada por la fuerza del campo eléctrico que puede generar, la cual a su vez depende del voltaje aplicado a los electrodos de descarga. El voltaje máximo que puede ser aplicado se determina por el voltaje de chispa. A este voltaje, un camino entre los electrodos de descarga y de recolección es ionizado y se produce la chispa. Los polvos altamente resistivos aumentan la producción de chispas, lo cual hace forzar al PES a operar a voltajes más bajos. La efectividad de un PES disminuye como resultado del voltaje de operación reducido (Kenneth, 1998, págs. 5.2-18).

Las partículas que tiene una resistividad muy baja, ya que estos son muy difíciles de colectar por que pierden sus carga rápidamente al llegar a las placas colectoras, que para luego estas partículas asumen rápidamente la carga del electrodo de recolección y estas pueden repelerse y volverse a reintroducir en la corriente de gas, para ayudar a esto se puede utilizar deflectores para ayudar a eliminar este fenómeno.

Las partículas que tiene una resistividad media-normal no pierden rápidamente su carga al momento de llegar a las placas colectoras. Estas partículas transfieren su carga lentamente a tierra y se mantienen adheridas en las placas mediante fuerzas adhesivas intermoleculares y fuerzas cohesivas. Esto permita que se construya una capa de partículas, que para luego mediante el desprendimiento por golpeo sea desprendido hacia las tolvas.

Los polvos de alta resistividad mantiene su carga por un periodo relativamente largo, en donde renuncia difícilmente su carga negativa al llegar a las placas colectoras , formándose una capa de polvo en la placa colectoras, la capa y el

electrodo forman un campo eléctrico de alto potencial. La superficie de la capa de polvo esta carga negativamente, el interior es neutro, y el electrodo de recolección está conectado a tierra. Esto causa una condición conocida como corona de espalda (corona invertida) y que esto afecta en la eficiencia del PES, por el cual al aglomerarse el polvo en el colector hace que sea difícil desprender el material de la placa recolectora, por el cual la magnitud de golpeo de desprendimiento de be aumentar, ya que al aumenta puede dañar el PES y causar un reencauzamiento severo, por ende se reduzca la eficiencia del PES (Kenneth, 1998, págs. 5.2-18).

Los valores de resistividad del polvo se pueden clasificar aproximadamente en tres grupos: (Theodore, 2008)

1. Baja resistividad entre 10^4 y $10^7 \Omega \text{ cm}$.
2. Resistividad media entre 10^7 y $10^{10} \Omega \text{ cm}$.
3. Resistividad alta encima $10^{10} \Omega \text{ cm}$.

La alta resistividad puede reducirse generalmente ajustando la temperatura y el contenido de humedad de la corriente de gas. La resistividad de las partículas disminuye tanto para temperaturas altas como bajas (ver Figura 36). El contenido de humedad de la corriente de gas también afecta a la resistividad de las partículas (Theodore, 2008).

Aumentar el contenido de humedad de la corriente de gas disminuye la resistividad. Esto puede lograrse pulverizando agua o inyectando vapor en el conducto que precede a la ESP. Tanto en el ajuste de la temperatura como en el acondicionamiento de la humedad, se deben mantener las condiciones de gas por encima del punto de rocío para evitar problemas de corrosión (Theodore, 2008).

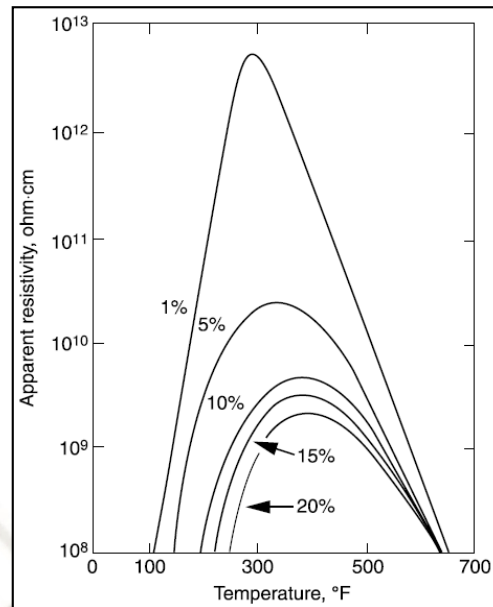


Figura 36. Efecto de la temperatura y el contenido de humedad sobre la resistividad aparente del polvo de cemento precipitado.

Fuente: Theodore, 2008, págs. 411

2.4.5.16. Efecto corona y corona inversa

Como se vio en el punto anterior acerca de la resistividad de las partículas cuando la resistividad es alta y estas migran hacia los electrodos colectores, por ende estos no transfieren su carga rápidamente hacia tierra, por el cual se forma una capa aglomerada de partículas que en la superficie de la capa de polvo se acumula iones negativos el cual atraviesan la capa del polvo para alcanzar a la placa colectora, el cual produce un campo eléctrico en la capa del polvo. Cuando este campo es lo suficientemente grande, causa un colapso total o se produzca ruptura dieléctrica, pues nuevos iones positivos entran en el espacio entre el alambre y la placa colectora, donde se reduce la carga sobre las partículas y producen chispas, a esta condición se le denomina “*Corona inversa*”, el cual estos iones positivos tienden a moverse al electrodo alambre, y estos iones positivos a la vez chocan contra los iones negativos que se están moviéndose a la placa colectora, y por ende reducen la fuerza del campo en general del PES (Gelis, Guerrero, & Narvaez, 2014, págs. 9,10).

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 (Gelis, Guerrero, & Narvaez, 2014, pág. 10).

El fenómeno de retro-corona se presenta cuando la resistividad aparente ρ_d es mayor o igual que $5 \times 10^8 \Omega/m$. Dentro de la capa de material particulado en el alambre, se establece un campo eléctrico debido a la corriente de corona (Kenneth, 1998).

$$E_d = \rho_d i_d \leq E_{db} \quad (2.25)$$

Dónde:

E_d : Campo eléctrico en la capa de polvo [V/m]

ρ_d : Resistividad de la capa de polvo [Ω/m]

i_d : Intensidad de corriente en la corona [A/m^2]

E_{db} : Campo de ruptura de la capa de polvo [V/m]

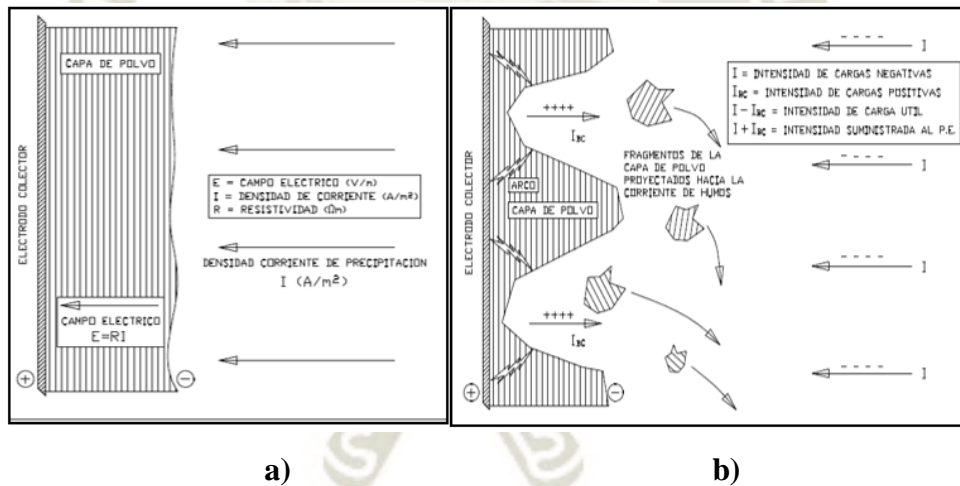


Figura 37. a) Formación de la capa de polvo de alta resistencia b) Efecto corona inversa, ruptura dieléctrica.

Fuente: Prieto, 2000, pág. 24,25

En la figura 37 se muestra la relación de la ley de ohm presente en la capa de polvo en la placa colectora, donde la corriente de corona fluye hacia tierra del electrodo de alto voltaje después de pasar por la acumulación de polvo en las placas de recolección. Esta placa a tierra tiene potencial nulo, mientras que la superficie de la capa de polvo (más cercana al cable) aún a través de 6.35 mm (1/4 pulg.) puede crear una caída de voltaje (Fernandez, 2008, pág. 115).

La caída de voltaje es proporcional a la magnitud de la corriente de corona y a la resistencia eléctrica de la capa de polvo. La caída máxima de voltaje que una capa de polvo puede soportar sin rompimiento se define por la fuerza dieléctrica del polvo, y es típicamente de 15 a 20 kV. Si se excede este valor, ocurre el rompimiento de la capa de polvo, resultando la formación de corona invertida o la propagación de chispas a través del espacio entre electrodos (Fernandez, 2008, pág. 116).

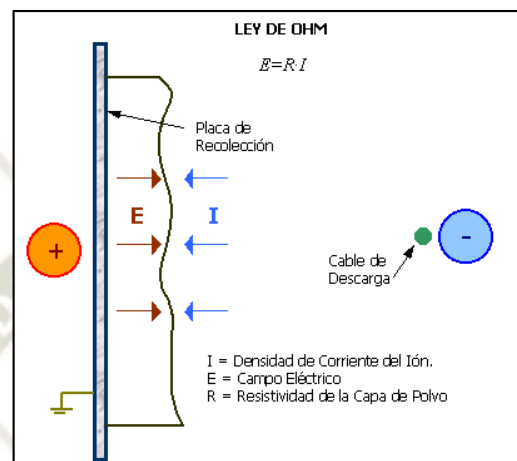


Figura 38. Relación de la ley de ohm en la capa de polvo.

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 115

2.4.5.17. Re-encauzamiento del polvo.

Otro aspecto que afecta en la eficiencia de colección es el re-encauzamiento del polvo o la reintroducción del material en la corriente del gas desprendido de las placas colectoras, producto de los martilleos al momento en que la capa de polvo comienza a caer a la tolva, otra forma de re-encauzamiento es que cuando el material cae a la tolva se forma nubes de polvo, por lo que la corriente circulante del gas recoge porciones de esta nube de polvo.

La erosión directa del polvo recolectado proveniente del electrodo recolector puede ocurrir cuando las velocidades del gas superan los 10 pie/s. La mayoría de los PES poseen velocidades de gas menores de 8 pie/s, mientras que las instalaciones más nuevas poseen velocidades menores de 4 pie/s (Kenneth, 1998, págs. 5.2-5).

Otras causas de reencauzamiento en un precipitador electrostático son la producción de chispas, la fuga de aire a través de la tolva y el re-encauzamiento eléctrico asociado a la resistividad del material, tanto como de baja resistividad y de alta resistividad.

2.4.5.18. Escabullimiento del polvo.

La construcción de un PES es tal que existen regiones no electrificadas en la parte superior del PES donde se localizan la distribución eléctrica, el soporte de las placas y los sistemas de martilleo. De manera similar, ciertas porciones de la tolva recolectora y el fondo del sistema de electrodos contienen regiones no electrificadas. Las corrientes cargadas de partículas que fluyen a través de estas regiones no estarán sujetas a las fuerzas de recolección y tienden a pasar a través del PES sin ser recolectadas. La cantidad de escabullimiento de gas y desviación a través de las regiones no electrificadas establecerán un límite superior sobre la eficiencia de recolección de un PES (Kenneth, 1998, págs. 5.2-6).

Este aspecto puede equivaler del 5 al 10 % del flujo total. Usualmente se colocan deflectores anti-escabullimiento para forzar al flujo que se escabulle a que se mezcle con la corriente principal del gas para ser recolectada en secciones posteriores. Pero, de nuevo, el flujo que se escabulle alrededor de la última sección no tiene oportunidad de ser recolectado (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2002).

2.4.5.19. Curvas de voltaje-corriente.

En la figura 39 se muestra curvas normales de voltaje – corriente de un precipitador electrostático, que al observar que la corriente del precipitador no empieza a fluir hasta se aplique un voltaje inicial de corona.

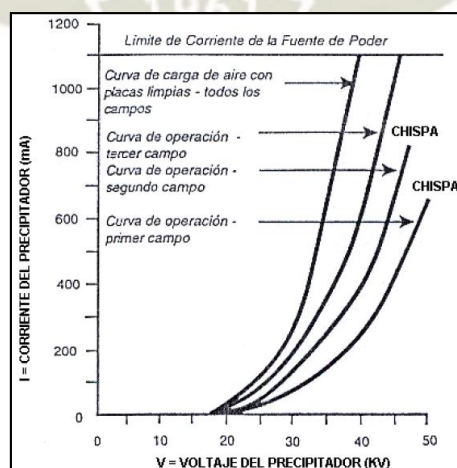


Figura 39. Curvas Normales de Voltaje-Corriente del precipitador (V-I).

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 117

Cuando se encuentra problemas en el precipitador electrostático la siguiente figura 40 puede ayudar a encontrar soluciones.

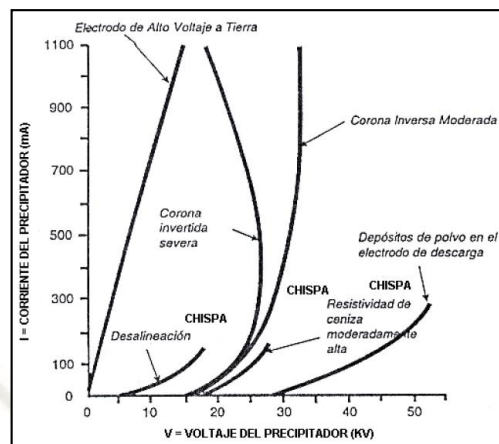


Figura 40. Curvas Anormales de V-I del precipitador.

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 118

2.4.5.20. Distribución del flujo del material particulado.

El flujo de gas a través del precipitador debe ser lento y estar distribuido uniformemente. Las velocidades del gas en el ducto de entrada al precipitador generalmente son de 6 a 24 m/s. La velocidad del gas que entra al precipitador debe reducirse para una recolección adecuada de partículas. Esto se logra usando una expansión del pleno de entrada (Fernandez, 2008, pág. 119).

El pleno de entrada contiene placas difusoras perforadas con orificios distribuidos de manera uniforme para distribuir el flujo de gas. Las velocidades típicas del gas en la cámara del precipitador varían de 0.75 a 1.8 m/s. Con relaciones de orientación de 1.06, la velocidad óptima del gas es de 1.37 y 1.8 m/s (Fernandez, 2008, pág. 119).

2.4.5.21. Características del material particulado.

Características del Polvo. La distribución del tamaño de las partículas, la adhesividad y la resistividad son características del polvo que afectan los costos de los PES. La distribución del tamaño del polvo influye a la eficiencia de recolección general de los PES, ya que la resistividad de la partícula está en función de la temperatura y la humedad relativa ver figura 36.

Como el presente tesis es acerca de las industrias cementeras, la resistencia eléctrica de la mayoría de los polvos que se originan en las fábricas de cementos está situado entro los límites:

- **Resistividad de los polvos de cemento 10^4 y $10^{11} \Omega \text{ cm}$.**

La resistividad del polvo influye los costos, ya que las partículas altamente resistivas requerirán los gastos de operación adicionales por el acondicionamiento del gas de escape o el uso de los PES en húmedo.

2.4.5.22. Características de la corriente de Gas.

Características de la Corriente de Gas. Las características importantes de la corriente de gas son la temperatura, la humedad y la composición química. La temperatura de la corriente de gas afecta la resistividad de las partículas y, consecuentemente, la eficiencia y el costo de los PES. Las corrientes muy húmedas y las neblinas por lo general requieren el uso de los PES en húmedo.

La composición química de la corriente de gas podría restringir los materiales de construcción apropiados para los PES. La mayoría de los PES están construidas con hierro de carbón, esto es dependiendo de las características de gas que puede usarse otros materiales (Kenneth, 1998).

2.4.5.23. Tipo y selección de electrodo ionizante.

Los electrodos emisores que crean la corona intensa, existen de varios tipos de electrodos, esto es de acuerdo a las características dimensionales que posee, es evidente que a menor diámetro del electrodo la resistencia disminuye al paso de la corriente eléctrica y es así donde puede usarse tensiones criticas bajas, a continuación en la figura 41 se muestra la curva V-I según el tipo de electrodo a usarse.

Cuando el polvo a separar es demasiado fino, el diseño más adecuado de electrodos a estas partículas se suele recurrir a los electrodos de picos, con lo que se consigue niveles de corriente superiores y bajos niveles de tensión critica inicial, el cual son los alambre tipo espino.

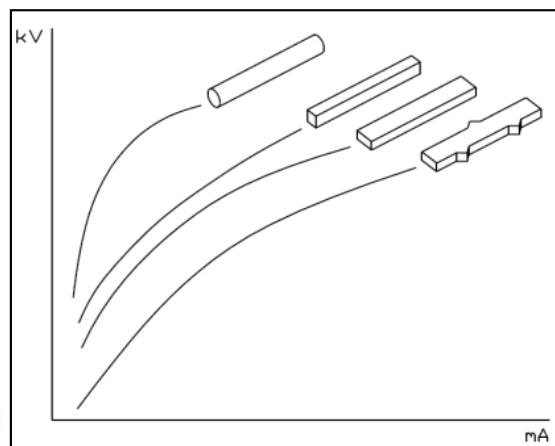


Figura 41. Características tensión-corriente de diversos tipos de electrodos de descarga.

Fuente: Prieto, 2000, pág. 55

La experiencia demuestra que para que un PES presente una buena estabilidad es indispensable que la separación entre la tensión que produce el efecto corona y la que produce el arco, sea lo mayor posible, lo que conduce a los constructores de PES a no sobrepasar en los electrodos de emisión cilíndricos el diámetro de 2,5 mm.

2.4.6. Parámetros del sistema.

- **SCA (El área de recolección específica (SCA)).** Este parámetro utilizado nos sirve para comparar el uso de los precipitadores electrostáticos y analizar la eficiencia en la recolección de las partículas. También se estima el tamaño del equipo a diseñar.
- **V/I voltaje – corriente.** De un precipitador electrostático, el cual se necesita aplicar una diferencia de potencial para crear la intensidad de campo eléctrico.
- **Resistividad de las partículas.** Es un factor que afecta a la eficiencia de recolección del precipitador electrostático, la resistividad es la resistencia eléctrica que puede describir como la resistencia a la transferencia de carga del polvo.
- **Acumulación de MP en las placas.** Al acumularse material particulado en la placa colectora hace que las demás partículas que migren hacia la placa colectora no puedan ceder su carga o descargarse para poderse desprender fácilmente mediante el mecanismo de sacudido.
- **Velocidad de las partículas.** Al ingresar a la cámara la mezcla aire-material particulado con una velocidad muy alta fuera del requerido por el diseño, no llegará

a ionizarse las partículas para el cual no se podrá ser recolectado. Debe seleccionarse para mantener bajas las velocidades del gas y para acomodar los requerimientos eléctricos (el espaciamiento alambre-placa).

- **Tamaño de la partícula.** El tamaño de la partícula tiene mucha influencia en el precipitador electrostático, ya que las partículas el cual está diseñado en este equipo se verá muy influenciado en la carga por ionización y se será muy complicado la colección de este.
- **Aislamiento eléctrico.** Es un parámetro muy importante ya que el equipo tendrá que estar aislado, es decir el electrodo será aislado y la placa colectora será también aislado.
- **Distancia entre el electrodo y el colector.** La distancia entre el electrodo y la placa colectora estará afecta en el funcionamiento del equipo y la creación de la corona eléctrica, ya que el diseño tendrá ser el eficiente para crear una atmosfera de ionización requerida para cargar las partículas y un efecto corona optimo antes de que se produzca la chispa.
- **Forma geométrica del electrodo.** La geometría del electrodo influye en la generación del efecto corona, el cual es donde se forma la corona de iones y la dispersión de corona eficiente para luego ionizar las partículas y coleccionarlas en la placa colectora.
- **Dimensiones del equipo.** Las dimensiones del equipo es un factor de diseño según la cantidad de polvo extraer y el flujo de mezcla aire y material particulado a coleccionar.
- **Diferencia de potencial suministrado.** Un parámetro de sumo interés ya que este es el que interviene en el funcionamiento del equipo y la aplicación de la intensidad de campo eléctrico entre electrodo y la placa colectora, incluye la eficiencia del PES.
- **Intensidad de campo eléctrico.** Parámetro de sumo interés en el trabajo del equipo, influye en la colección del material particulado, incluye la eficiencia del PES.

- **Flujo másico de entrada y salida.** Parámetro de sumo interés en la cantidad de material particulado a extraer y la cantidad de material particulado recolectado, influye mucho en la eficiencia del equipo.
- **Masa capturada.** La cantidad de MP capturado en la placa colectora y la reducción del material particulado en la salida del colector.
- **Flujo de aire-polvo.** Parámetro que afecta a la eficiencia del equipo según la una determinada cantidad de flujo de aire y mezcla que ingresa al equipo, según dimensiones del PES.
- **Tamaño del equipo que causa la emisión del MP.** Parámetro de la cantidad de polvo que crea el material particulado, según a esto se diseña el precipitador electrostático.
- **Eficiencia del equipo.** Parámetro que indica que tan eficaz trabaja en la recolección del material particulado que ingresa al precipitador electrostático
- **Tipo de material a recolectar.** Indica los diferentes tipos de material particulado a colectar, estos es según el tipo de material a transportar, ya sea en diferentes industrias de aplicación.

CAPITULO III: DISEÑO DEL SUPRESOR DE POLVO ELECTROSTÁTICO

3.1. CONDICIONES GENERALES.

3.1.1. Descripción del supresor electrostático.

Como se vio en los capítulos anteriores se hablo acerca de los tipos de colectores de material particulado usados en la industria del cemento, estos están ubicados en zonas estratégicas para la supresión del polvo, el cual 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 de placas presenta muchos desventajas en comparación al equipo que se tratara a continuación.

Este supresor electrostático descrito y diseñado a continuación es un sistema nuevo de supresión de polvo basado en ionización, el cual la colección del polvo se realizara en los puntos de carga, descarga y transferencia de las fajas transportadoras en donde se originan el material particulado, este basa únicamente en el uso de fuerzas electrostáticas, el cual se describió en la teoría del capítulo 2, el cual este equipo electrostático está basado en las teorías electrostáticas.

Su principio de funcionamiento equivale al de un filtro electrostático y se basa en el principio físico de separación por ionización, siendo una construcción modular que se instala directamente sobre la cinta transportadora en el punto de carga o descarga. Especialmente indicado para los puntos de descarga del material sobre las cintas transportadoras fijas y móviles de los siguientes tipos de industrias: piedras y tierra, minería, industria del acero, industria del cemento, industria del vidrio, fundiciones, papeleras etc. Entre sus ventajas destacan la supresión garantizada del polvo hasta en un 90%, gastos mínimos de explotación, escaso mantenimiento y bajo consumo.

Este equipo está diseñado para diferentes tamaños de faja transportadora, también para la cantidad de polvo a extraer, también se puede usar con otros sistemas de transporte de materiales a granel.

En la presente tesis se diseñó un prototipo a escala del supresor de polvo en fajas transportadoras, el cual se observara el principio electrostático y el funcionamiento de este equipo en aplicaciones de procesos industriales.

3.1.2. Modo de operación.

El sistema de supresión de polvo electrostático se instala en la carga y descarga de las fajas transportadoras, el polvo se conduce dentro de la cubierta del supresor. Donde las partículas de polvo se ionizan por medio del electrodo, que para luego estos migran hacia la cubierta colectora que está hecha de acero inoxidable, en donde las partículas de polvo se acumulan en la superficie interior de la cubierta. De forma intermitente un vibrador en la parte exterior superior de la cubierta sacude la carcasa y el polvo acumulado en las paredes cae y vuelve al material en proceso de la cinta transportadora. Este equipo logra coleccionar partículas de polvo de tamaño de $0.01 \mu\text{m}$ a $> 300 \mu\text{m}$ ($300\mu\text{m} = 0.3\text{mm}$).

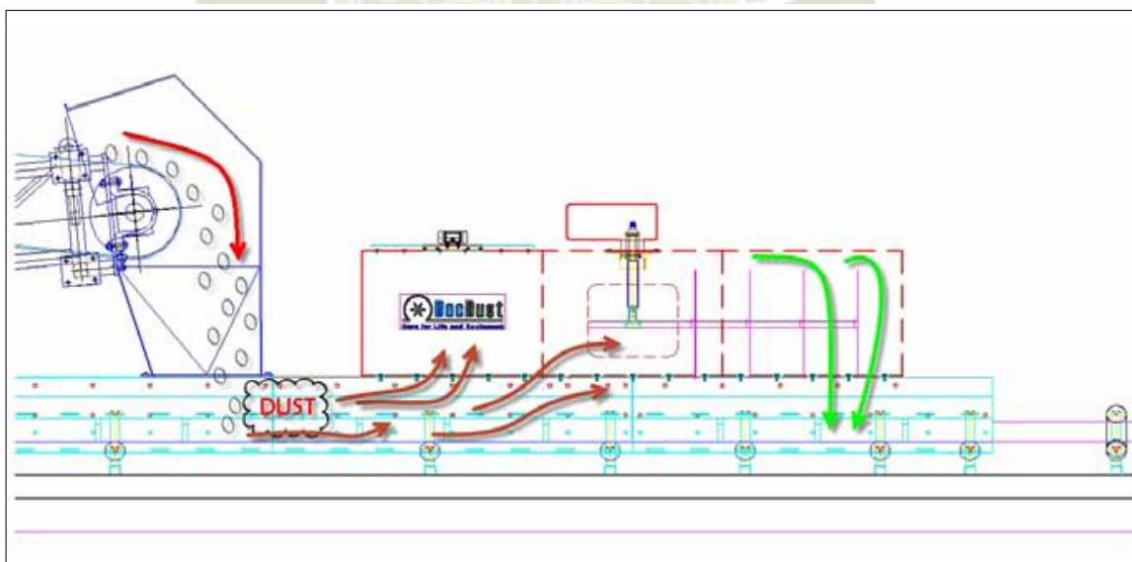


Figura 42. Supresor de polvo electrostático

Fuente: DocDust AY-500, 2014, pág. 5

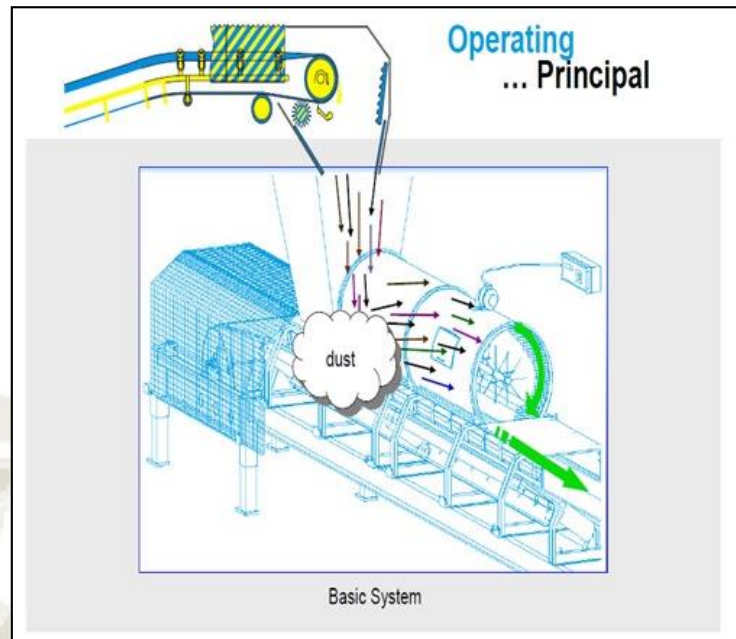


Figura 43. Instalación del Supresor de polvo electrostático

Fuente: GOLDCORP HX 410 Dust Suppression Unit, pág. 19

3.1.3. Aplicaciones de este sistema.

Este equipo nuevo está diseñado para diferentes aplicaciones a granel. Tiene principales áreas de aplicación en puntos de transferencia en las siguientes industrias y materiales principales:

- Minería: todo tipo de materiales.
- Cantera: Todo tipo de materiales.
- Acero: Sinterizado, piedra caliza, aditivos, cenizas volantes.
- Cemento: Piedra caliza.
- Fertilizante: Potasio.
- Fundiciones: Sílice y cuarzo.
- Papelera: Procesos de papel.
- Vidrio: partículas de vidrio.
- Arena y grava: Sílice y cuarzo (Sandvik, 2009).

Este supresor también se puede adaptar a la descarga de las zarandas, máquinas de trituración en canteras, minas, minas de tajo abierto y subterráneo.

Este supresor de polvo “no deben usarse en materiales de polvo explosivos o inflamables”

3.1.4. Datos técnicos.

El supresor electrostático trabaja con un voltaje alto, pero la corriente es muy baja. Esto debido a que el equipo necesita de esa cantidad de voltaje, el cual es el principal parámetro que usa el equipo para reducir el polvo.

- Alimentación de entrada 110 – 230 VAC; 50 – 60 Hz
- Salida de alto voltaje 35 – 60 kV/DC
- Corriente que consume 0,5 – 5mA
- Señal de control Interruptor normalmente abierto.
- Tierra 16mm² conductor de alto voltaje.
- Consumo de energía 0.2 – 500W
- Longitud 1000 – 8000 mm (módulos de 1000mm).
- Ancho 800 – 1400 mm (según ancho de cinta transportadora) (Sandvik, 2009).

3.1.5. Principio de precipitación.

Como se vio en el capítulo II acerca de la teoría de la precipitación electrostática, este equipo usa el mismo principio electrostático ya que es un precipitador electrostático tipo tubo - alambre, el cual el tubo será reemplazado por la carcasa o cubierta de forma cilíndrica y el electrodo que es el alambre será reemplazado por una configuración diferente que este vendrá a ser un electrodo de tipo S.

El principio de operación está basado en el principio de la precipitación electrostática, los cuales son:

- **Ionización:** cargado de iones hacia la partícula (se generan electrones libres).
- **Migración:** movimiento de las partículas cargadas a la superficie colector.
- **Recolección:** precipitación de las partículas a las superficies colectoras.
- **Disipación de la carga:** neutralización de las partículas en las superficies colectoras.
- **Desalojo:** desprendimiento de las partículas mediante vibradores de la placa colector hacia el material en proceso de la cinta transportadora.

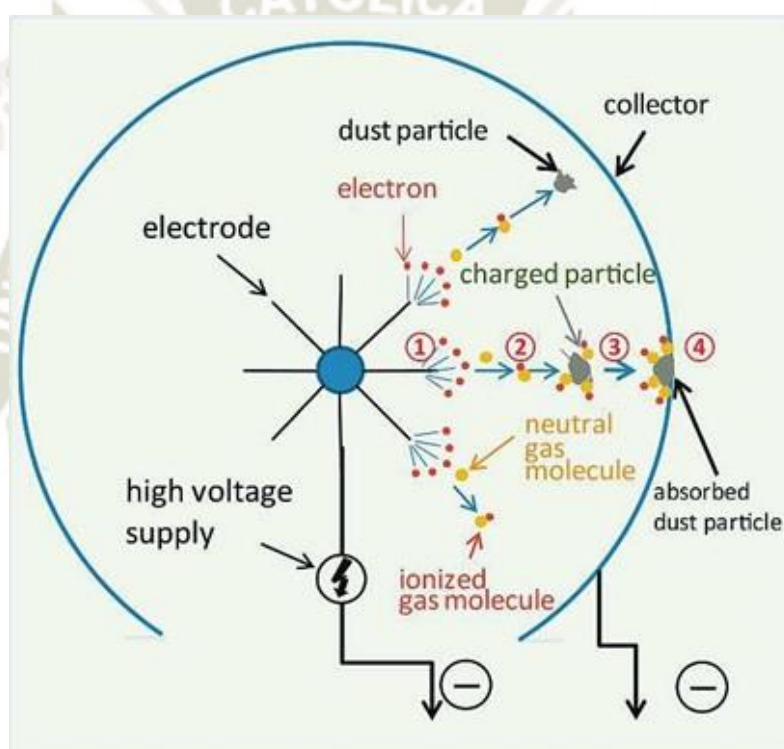


Figura 44. Ionización de las partículas por el efecto electrostático.

Fuente: DocDust AY-500, 2014, pág. 7

3.1.6. Diseño de electrodos.

Los electrodos emisores que crean la corona intensa, existen de algunos tipos de electrodos para este tipo de equipos, esto es de acuerdo a las características dimensionales que posee. Los tipos de electrodos se muestran a continuación:

- Electrodo tipo N.

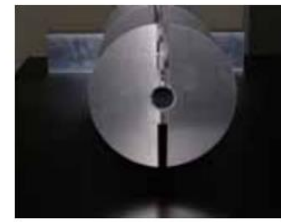
- Electrodo tipo S.
- Electrodo tipo C.



Tipo N



Tipo S



Tipo C

Figura 45. Tipos de Electrodos

Fuente: DocDust AY-500, 2014, pág. 8

En esta presente tesis se eligió el electrodo tipo S, para ver el comportamiento de las partículas en el recinto interno del precipitador.



Figura 46. Electrodo tipo S.

Fuente: Propia, 2018

3.1.7. Ventajas de este sistema de supresión de polvo.

Este nuevo sistema comparado con los demás tipos de colectores nos brinda muchas ventajas en la instalación de este equipo, el cual mencionaremos a continuación:

- Supresión de polvo garantizada $> 90\%$
- Pérdida mínima de material.
- Sin succión / filtro o rociado
- Sin costos de eliminación.
- Sin desgaste.
- Bajo consumo de energía $< 500 \text{ W}$
- Bajo mantenimiento: no se requiere personal calificado.
- Muy bajos costos de operación.
- Muy bajos costos de instalación.
- Diseño modular.
- Corto tiempo de montaje y puesta en marcha.
- Sin modificación en las propiedades del material.
- Se puede desmontar con facilidad para trasladarlo otro lugar.

3.1.8. Visión general de los factores de costo.

En la siguiente tabla se observa la rentabilidad de este equipo en comparación con otros sistemas:

Tabla 14

Costos de operación según otros equipos de supresión de polución

Costos de operación debido a	Succión	Aspersión	Supresor electrostático
Desgaste	☹️	☹️	😊
Filtros	☹️	😊	😊
Cambio de filtros	☹️	😊	😊
Eliminación de filtros	☹️	😊	😊
Tuberías	☹️	☹️	😊
Químicos	😊	☹️	😊
Agua	😊	☹️	😊
Energía eléctrica	☹️	☹️	☹️
Riesgo de heladas	☹️	☹️	😊
Costos consecuentes para otros sistemas.	☹️	☹️	😊
Mantenimiento	☹️	☹️	☹️

😊 Sin costos operativos.

☹️ Costos de operación.

Fuente: Sandvik hx410, 2009, pág. 8

3.2. DISEÑO DEL SISTEMA.

El diseño del precipitador electrostático de la presente tesis está basado en la colección del polvo de cemento(material particulado), en el cual la recolección se realizara en los puntos de alimentadores, descarga y la transición entre fajas transportadoras, en donde la forma geométrica del equipo estará dado por un electrodo tipo varilla que crea la corona ionizada y el colector del material particulado será un semicírculo tipo cubierta para fajas transportadoras, por el cual en el siguiente esquema se apreciara la forma del precipitador.

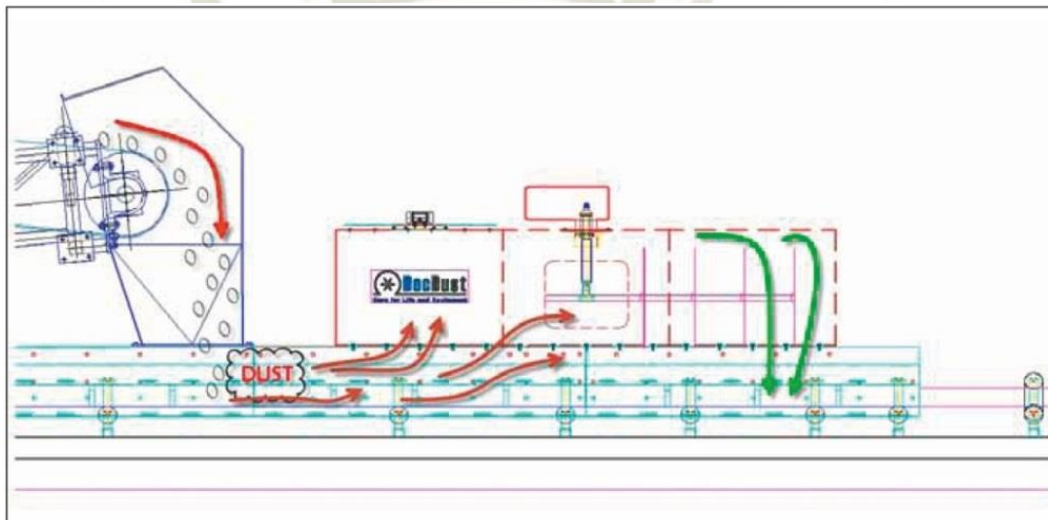
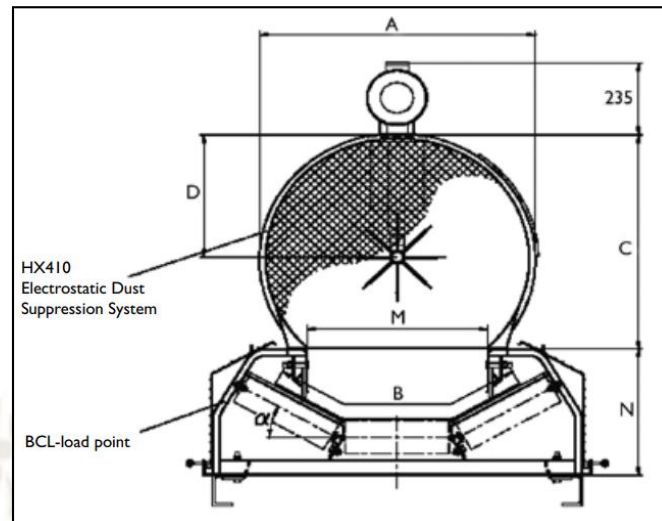


Figura 47. Diseño del precipitador electrostático.

Fuente: Sandvik hx410, 2009, pág. 4 / DocDust AY-500, 2014, pág. 5

3.2.1. Volumen del aire – polvo.

Para poder determinar el volumen de aire-polvo total, se basa según las consideraciones de diseño y el tipo de equipo, en nuestro caso el equipo se verá en las fajas transportadoras, se observa que en la siguiente tabla la cantidad de aire extraído en m³/h en diferentes puntos de la banda y según el tamaño del ancho de la banda. Esta tabla 15 está basado en consideraciones teorías y empíricas.

Tabla 15

Caudal de aire extraído por equipo.

Equipo	Tam. (mm)	m³/h	Valores/consideraciones			m³/h	
			A	B	C		
BANDAS TRANSPORTADORAS 	650	4250	1500	1750	1000		
	850	5250	2000	2250	1000		
	1000	6500	2500	2750	1250		
	1200	7750	3000	3250	1500		
	1400	8750	3500	3750	1500		
	1600	10'000	4000	4250	1750		
ALIMENTADORES DE PLACAS 	800	6500	3500	2000	1000		
	1000	7500	4000	2500	1000		
	1200	8750	4500	3000	1250		
	1400	9750	5000	3500	1500		
	1600	10'000	5500	4000	1500		
	ALIMENTADORES PIVOTANTES 	800		2500	9000		9000
1000			3000	10'000	10'000		
1200			3500	11'000	11'000		
1400			4000	12'000	12'000		
ELEVADORES 	400		CADENA m³/h		BANDA m³/h		
	500		A	B	A	B	
	630		1250	1000	2000	1000	
	800		1500	1000	2250	1000	
	1000		2000	1250	2500	1250	
	1250		2500	1250	3000	1250	
	1600		3000	1500	3500	1500	
			3500	1500	4500	1500	
		4000	1500	6000	1500		
RASCADORES Y TORNILLOS SIN FIN	200	500	POR CADA 10 METROS				
	250	500					
	315	500					
	400	750					
	500	750					
	630	1000					
	800	1000					
1000	1250						
DESGLIZADORES			120% DEL SOPLADOR				
MALLA CLASIFICADORA		50	POR TON/H ABIERTO				
ZARANDA VIBRATORIA		450	POR M2 CERRADO				
MALLA GIRATORIA		600	POR M2 CERRADO				

Fuente: Jiménez, 2015, pág. 18

- De la anterior tabla se tomara un tamaño y cantidad de aire a extraer en el punto B y C.

Ancho de banda (mm)	Cantidad de aire-mezcla (m3/h)
650	2750

3.2.2. Cantidad de polvo a extraer.

El contenido o la concentración de polvo en el aire de la industria del cemento, está basado en una serie de datos relacionados que contienen valores de aproximación de

los contenidos de polvo en (gramos/m³N), que se utilizan en las fábricas de cemento.

Muestra la siguiente tabla 16.

Tabla 16

Concentración de polvo por equipo.

Ítem	Puntos de producción de polvo en fábricas de cemento	g/m ³ N
1	Triturador (según la humedad)	5-15
2	Molinos de martillos de gran velocidad Tamaño del producto de 2-5mm Para producto en polvo	15-20 20-40
3	Vibromatriz	15-20
4	Tolvas	5-15
5	Apilamientos abiertos, sin cobertura	hasta 5
6	Volcadores de vagones(según humedad del material)	10-20
7	Secadero de materias primas: Secadero de tambor rotatorio Secaderos rápidos con álabes para proyección	40-20 50-250
8	Molino de crudo: Con salida por gravedad Molinos barridos por aire con secado simultaneo	20-80 300-500
9	Molinos por rodadura, molinos de rodillos y solera rotatoria (molinos Loesche, MPS, Raymod, Polysius, etc.)	650
10	Molinos de carbón: Con salida por gravedad Con molienda-secado	20-80 100-120
11	Gases residuales del horno rotatorio: Hornos largos para vía húmeda Hornos largos por vía seca Hornos cortos para vía seca	hasta 15 hasta 30 hasta 60
12	Enfriadores de parrilla de Clinker(enfriadores Fuller)	10-15
13	Molinos de cemento	20-80
14	Separadores por aire(del plato dispersor)	80-120
15	Elevadores de cangilones: Para crudo Para cemento Clinker	20-30 hasta 10
16	Puestos de transición de transportadores de cinta continua Aerodeslizadores, silos de mezcla de crudo, aireación de silos para fluidificación de crudo y cemento.	15-20 30-50
17	Instalaciones de transporte neumático(bombas Fuller, recipientes de impulsión)	150-200
18	Carga a granel	40-60
19	Máquinas de ensacar cemento	20-30

Fuente: Duda, 1977, pág. 293

- De la tabla 16 anterior vemos que la concentración en transición en fajas transportadoras es de 15-20 g/m³ N. (15000 -20000 mg/m³N)

Ítem	Punto de producción de polvo	g/m ³ N
16	Puestos de transición de transportadores de cinta continua	15-20

- Según norma tabla 3 la concentración de material particulado en cualquier momento en la salida del proceso deberá ser de 150 mg/m³ como máximo.

3.2.3. Eficiencia de captura.

$$n_c = \frac{C_i - C_s}{C_i}$$

Dónde:

C_i : Concentración de material en la entrada (g/m³)

C_s : Concentración de material en la salida (g/m³)

$$n_c = \frac{20000 - 150}{20000}$$

$$n_c = 0.9925 \text{ o } 99.25 \%$$

- Flujo másico en la entrada del equipo será la concentración de polvo en la transición y la cantidad de aire capturado en el punto B + C según punto 3.1.1 (2750 m³/h)

$$m_i = C * Q$$

C : Concentración de material (polvo) (g/m³)

$$m_i = 20 * 2750$$

$$m_i = 55000 \frac{g}{h}$$

- Flujo másico en la salida:

$$n_c = \frac{m_i - m_s}{m_i}$$

$$0.982 = \frac{55000 - m_s}{55000}$$

$$m_s = 990.0 \frac{g}{h}$$

- Cantidad de material capturado en el equipo:

$$m_{cap} = m_i - m_s$$

$$m_{cap} = 55000 - 990$$

$$m_{cap} = 54010.0 \frac{g}{h} \text{ o } 54.0 \frac{kg}{h}$$

3.2.4. Velocidad de captura del polvo.

La velocidad de captura del polvo en la transición de fajas transportadoras está dada según la condición de la dispersión del contaminante y la aplicación, el cual se muestra un rango de velocidades de captura en la siguiente tabla 17.

Tabla 17

Rango de velocidades de captura.

RANGO DE VELOCIDADES DE CAPTURA		
CONDICION DE LA DISPERSION DEL CONTAMINANTE	APLICACIÓN	VELOCIDAD DE CAPTURA (m/s)
Sueltas sin velocidad en el aire	Evaporación de tanques	0.25 a 0.5
Sueltas con velocidad baja del aire	Transportadores de baja velocidad	0.5 a 1.0
Generación activa dentro de la zona de generación	Chutes de carga/descarga de transportadores, trituradoras	1.0 a 2.5
Alta velocidad dentro de la zona	Molienda, sandblasting	2.5 a 10

Fuente: Jiménez, 2015, pág. 19

3.2.5. Relación entre el campo eléctrico y la diferencia de potencial.

La aplicación de una diferencia de potencial sumamente alta, hace que se ionice las partículas que para luego estas precipiten en la placa colectora. Según esquema siguiente.

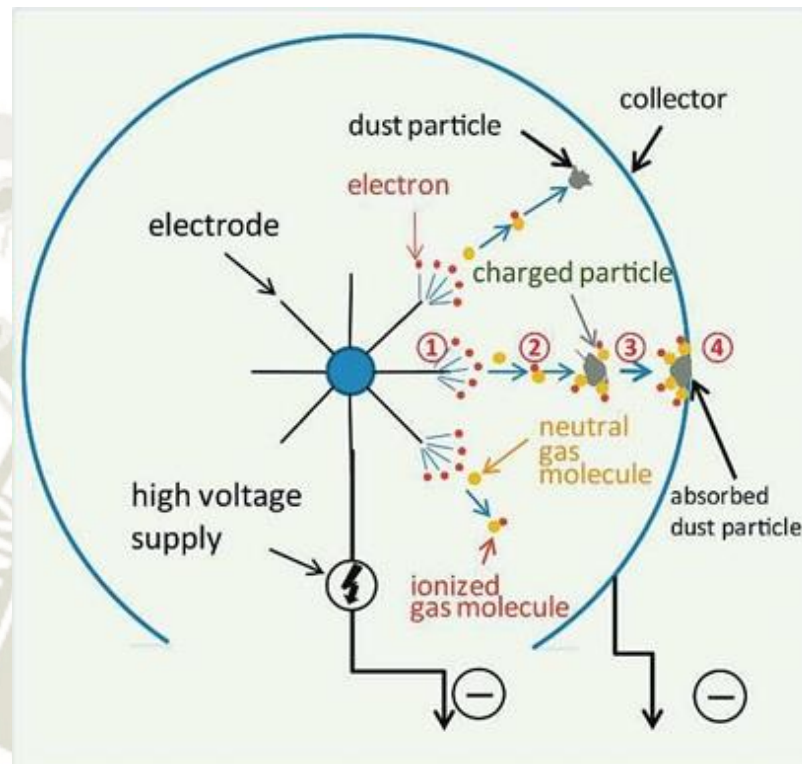


Figura 48. Ionización de las partículas.

Fuente: DocDust AY-500, 2014, pág. 7

Según la ecuación 2.16, el campo eléctrico creado por un filamento está definido como:

$$E = \frac{V_{ab}}{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \frac{1}{r}$$

En donde, se observara las distancias estimadas del equipo según las dimensiones de la faja transportadora, a continuación:

Según el diseño el dimensionamiento del precipitador se puede calcular para diferentes tamaños de banda, entonces como se tomó un ancho de banda de 650 mm, seleccionaremos esas dimensiones según la anterior tabla 15.

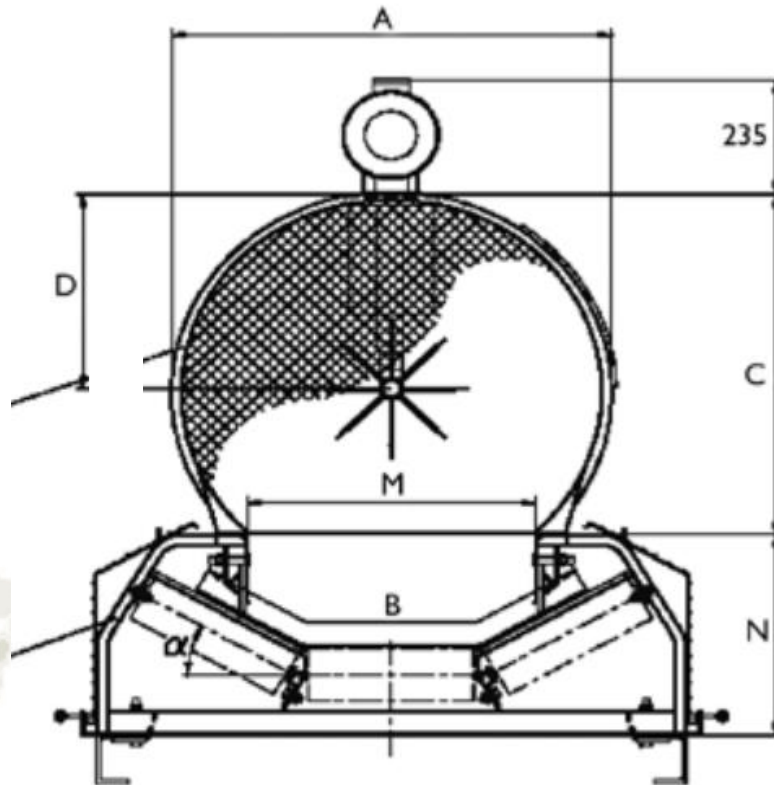


Figura 49. Dimensiones según tamaño de faja transportadora.

Fuente: Sandvik hx410, 2009, pág. 4

Tabla 18

Dimensiones del equipo según tamaño de ancho de banda.

B	A	C	D	M			N		
				30°	45°	20°	30°	45°	20°
500	500	480	250	310	280	320	382	400	389
650	600	540	285	420	400	440	400	435	412
800	790	710	395	550	490	570	420	448	445
1000	860	720	415	720	640	740	450	499	420
1200									
1400									
1600									

Fuente: Sandvik, 2009, pág. 4

Entonces para tomar los radios del equipo, se verá un esquema en la siguiente:

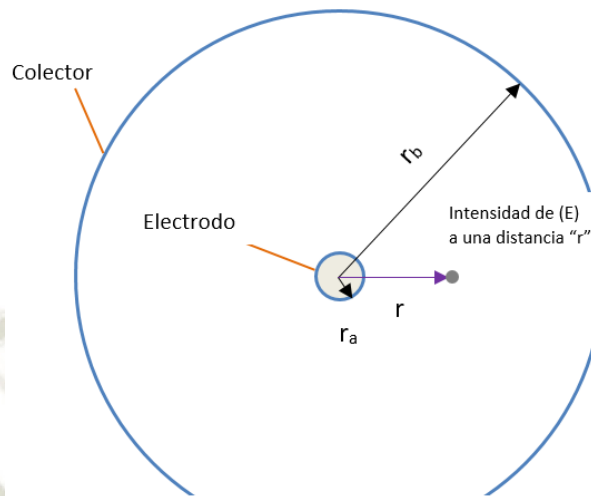


Figura 50. Radios del Electrodo, colector y radio de intensidad de campo eléctrico

Fuente: Propia, 2018

De la Ecuación 2.16 vemos que:

$$E = \frac{V_{ab}}{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \frac{1}{r}$$

- $r_a = 1\text{cm} = 0.01\text{m}$
- $r_b = 215\text{ mm} = 21.5\text{cm} = 0.215\text{ m}$
- $r = 11\text{cm (valor iterativo)} = 0.11\text{ m}$
- $V_{ab} = 30000\text{ V (valor regulado)}$

Entonces:

$$E = \frac{30000}{\ln\left(\frac{0.215}{0.01}\right)} \frac{1}{0.11}$$

$$E = 8.89 * 10^5 \left[\frac{V}{m} \right] \text{ o } \left[\frac{N}{C} \right]$$

3.2.6. Carga eléctrica de la partícula.

La carga eléctrica de la partícula está dada según la ecuación 2.17, debido a la carga por campo el cual es el que domina para partículas mayores a 1µm.

$$q_f = \left(\frac{3k}{k+2} \right) \pi \epsilon_0 d^2 E \quad \text{ecuac (16)}$$

- k=5
- d=5µm=5x10⁻⁶m
- ε₀=8.85x10⁻¹² [C²/Nm²]
- E= 8.89*10⁵ [V/m] ó [N/C]

$$q_f = \left(\frac{3 * 5}{5 + 2} \right) \pi * 8.85 * 10^{-12} (5 * 10^{-6})^2 * 8.89 * 10^5$$

$$q_f = 1.32 * 10^{-15} \text{ [C]}$$

El campo eléctrico está dado según la aplicación de una diferencia de potencial y la geometría del equipo, el cual el precipitador es un semicírculo tubular.

3.2.7. Velocidad de migración de la partícula.

La velocidad de la partícula se calcula según la ecuación 2.20, el cual muestra la velocidad con la que recorre hacia las paredes del colector.

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

- q_f= 1.32x10⁻¹⁵ [C]
- μ = 1.84x10⁻⁵ [N s/m²]
- d = 5µm = 5x10⁻⁶m

- $E = 8.89 \cdot 10^5$ [V/m] ó [N/C]

$$W = \frac{1.32 \cdot 10^{-15} \cdot 8.89 \cdot 10^5}{3\pi \cdot 1.84 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}$$

$$W = 1.36 \left[\frac{m}{s} \right] = 136 \left[\frac{cm}{s} \right]$$

3.2.8. Tiempo de la partícula en recorrer hacia el colector.

El tiempo el cual la partícula demora en recorrer hacia el colector está dada si consideramos que la aceleración es constante, entonces tenemos:

$$s = \left(\frac{v_o + v_f}{2} \right) t$$

- $s = r_b = 21.5$ cm
- $v_o = W = 136$ cm/s
- $v_f = 0$ (llega a chocar en el colector velocidad final “cero”)

Entonces:

$$t = \frac{d}{\left(\frac{v_o + v_f}{2} \right)}$$

$$t = \frac{21.5}{\left(\frac{136 + 0}{2} \right)}$$

$$t = 0.32 \text{ s}$$

El tiempo que demora en viajar la partícula aproximadamente está a 1 segundo, estos resultados se puede variar o disminuir según la aplicación de una diferencia de potencial más alta.

En el siguiente capítulo se hará un Excel con estos datos y aproximaremos más los resultados.

3.2.9. Cálculo del área del colector.

Para calcular y diseñar el área del colector se usará la ecuación 2.21:

$$n_c = 1 - e^{-\left(\frac{WA}{Q}\right)}$$

$$A = -\frac{\ln(1 - n_c)}{\frac{W}{Q}}$$

- $n_c = 97.1 \% = 0.971$
- $W = 1.36 \text{ [m/s]}$
- $Q = 2750 \text{ m}^3/\text{h} = 0.764 \text{ m}^3/\text{s}$ (se tomara la cantidad de aire a extraer, dentro del cual está la concentración de polvo), tomado de la tabla según dimensiones de la banda.

Entonces tenemos:

$$A = -\frac{\ln(1 - n_c)}{\frac{W}{Q}}$$

$$A = -\frac{\ln(1 - 0.971)}{\frac{1.36}{0.764}}$$

$$A = 1.99 \text{ m}^2$$

3.2.10. Cálculo de la longitud del precipitador.

La longitud del precipitador estará basada en el área, el cual se obtuvo de los cálculos previos, según la forma del equipo se verá en un esquema para el dimensionamiento.

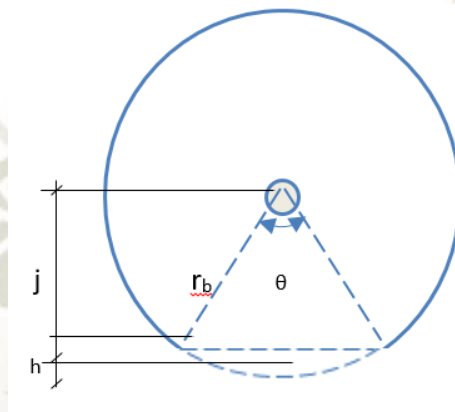
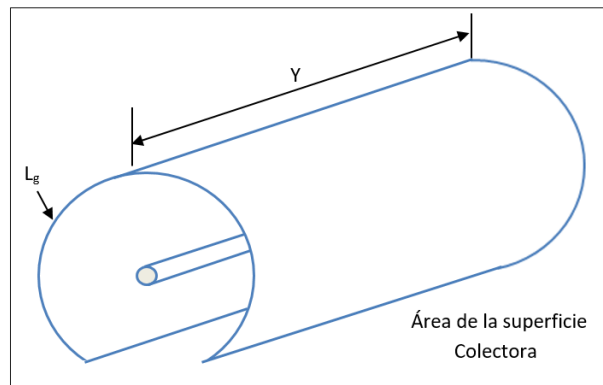


Figura 51. Dimensiones del colector.

Fuente: Propia, 2018

$$A = r_b * Y(2\pi - \theta)$$

$$Y = \frac{A}{r_b(2\pi - \theta)}$$

$$\theta = 2\arccos\left(\frac{j}{r_b}\right)$$

Entonces tenemos:

- $j = 11.5 \text{ cm} = 0.115 \text{ m}$
- $h = r - j = 0.215 - 0.115 = 0.10 \text{ m}$

$$\theta = 2\arccos\left(\frac{0.115}{0.215}\right)$$

$$\theta = 2.01$$

- La longitud del precipitador electrostático será:

$$Y = \frac{A}{r_b(2\pi - \theta)}$$

$$Y = \frac{1.99}{0.215(2\pi - 2.01)}$$

$$Y = 2.16 \text{ m}$$

$$\text{aprox } Y = 2.00 \text{ m}$$

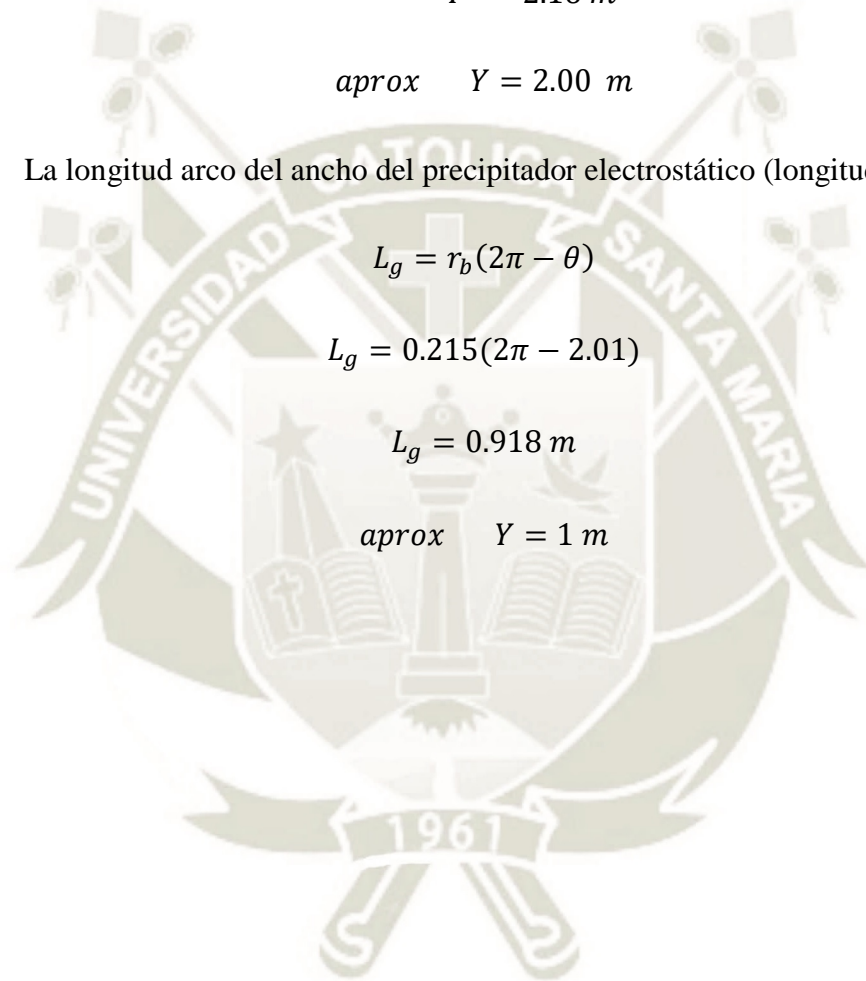
- La longitud arco del ancho del precipitador electrostático (longitud de arco) será:

$$L_g = r_b(2\pi - \theta)$$

$$L_g = 0.215(2\pi - 2.01)$$

$$L_g = 0.918 \text{ m}$$

$$\text{aprox } Y = 1 \text{ m}$$



3.2.11. Características y rangos de los parámetros de diseño.

Tabla 19

Características del equipo Rangos y parámetros de diseño

Parámetros de diseño - resultados	
Parámetro	Rango
Material (polvo)	cemento seco
Resistividad (media)	$10^7 - 10^{11} \Omega \text{ cm}$
Diámetro de Partícula	$> 1 \mu\text{m}$
Temperatura	$< 700^\circ\text{C}$
Radio entre electrodo y colector	21.5 cm
Diámetro del electrodo	2 cm
Con puntas activas en el electrodo	Si
Velocidad de dispersión	1.0 - 2.5 m/s
Área del precipitador	2.0 m ²
Longitud del equipo	2.0 m
Velocidad de migración hacia el colector	136 cm/s
Diferencia de potencial suministrado	30000 VDC
Carga de la partícula	$1.32 * 10^{-15} \text{ C}$
Tiempo en recorrer la partícula hacia el colector	0.32 s
Intensidad de campo eléctrico generado	$8.89 * 10^5$
Flujo másico en el ingreso	55000 g/h
Flujo másico en la salida	1575 g/h
Masa capturada o reintroducida	53425 g/h
Caudal de aire-polvo	2750 m ³ /h
Concentración de polvo	15 - 20 g/m ³ N
Concentración mínima (según norma)	150 mg/m ³ N
Tamaño de faja transportadora (ancho)	500 mm
Zona de generación de polvo según (figura 1.20)	B - C
Eficiencia del equipo	97.1%

Fuente: Propia, 2018

CAPITULO IV: CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

4.1. CONSTRUCCIÓN DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.

El precipitador electrostático se construyó según las especificaciones de diseño de la presente tesis, el cual este se implementa un equipo a escala, en donde simulara la puesta de funcionamiento en la retención del material particulado.

A continuación se menciona las partes del precipitador electrostático a construir.

- Electrodo ionizante.
- Placa colectora.
- Estructura del PES.
- Soporte de la placa colectora.
- Soporte del electrodo ionizante.
- Bastidor de faja transportadora.
- Pintado del equipo.
- Montaje del equipo.
- Circuito eléctrico de control.
- Suministro de energía.

4.1.1. Electrodo Ionizante.

El electrodo que se construyo es de material A36, lo mejor es usar acero inoxidable calidad 316L. Este electrodo tiene unas planchas estriadas de forma estrellada, el cual este tipo de configuración sirve para concentrar más el campo eléctrico creado en el interior para que el material particulado se ionice en menor tiempo y que migre más rápido hacia la placa colector.

- Para construir el electrodo se tomó como material un tubo de acero inoxidable 316L de 1 pulgada de diámetro sch 40 con una longitud de 1,80 m.



Figura 52. Tubo del electrodo

Fuente: Propia, 2018

- Se cortó 12 planchas en forma estrellada de material acero inoxidable 316L como se ve en la figura.



Figura 53. Plancha de forma estrellada

Fuente: Propia, 2018

- Se soldó estas planchas al tubo, separadas cada 15 cm una de otra.



Figura 54. Configuración de electrodo

Fuente: Propia, 2018

4.1.2. Placa colectora.

El precipitador electrostático es de configuración tipo tubular, por el cual la placa colectora será de forma cilíndrica tipo cubierta, el cual está montado por encima de la faja transportadora mediante soportes. La placa cilíndrica se tomó como material una plancha de acero inoxidable 316L, que luego fue rolada a las dimensiones diseñadas.

- Para construir la placa cilíndrica se tomó una plancha de 2 m de largo por 1 m de ancho con un espesor de 1.27mm, el cual se rolo a una forma cilíndrica como se ve en la figura siguiente.



Figura 55. Placa cilíndrica colectora

Fuente: Propia, 2018

4.1.3. Estructura.

Para realizar la estructura del precipitador electrostático, se fabricó una faja transportadora que sirve como modelo en el funcionamiento del PES. Se diseñó una faja transportadora de 3 m de largo con 0.5 m de ancho.

- El bastidor de la faja transportadora se fabricó con ángulos de material A36.



Figura 56. Bastidor de faja modelo

Fuente: Propia, 2018

- Se fabricó estación de polines para la faja transportadora, el cual se hizo con ángulos y platinas con material acero A36.



Figura 57. Estación de polines

Fuente: Propia, 2018

- Los polines se fabricó con tubo de material A36, el cual se cortó varios trozos para realizar los polines.



Figura 58. Fabricación de polines

Fuente: Propia, 2018

- Una vez diseñado los polines y la base de los polines se empezó a unir las piezas, las cuales quedaron así.



Figura 59. Estación de polines y bastidor

Fuente: Propia, 2018

4.1.4. Soporte de la placa colectora.

- La los soportes de la placa colectora se fabricó con tubo cuadrado de material a36 de 1 pulg. por 1pulg. El cual quedo como se ve en la imagen siguiente.



Figura 60. Soporte de placa colectora

Fuente: Propia, 2018

- El cual se unió con la placa y el bastidor de la faja transportadora.



Figura 61. Ensamble de estación de polines, bastidor e soporte de placa colectora

Fuente: Propia, 2018

4.1.5. Soporte de los electrodos ionizante.

Para el soporte del electrodo ionizante, se hizo un agujero en la parte superior media de la placa colectora el cual está sujeta mediante abrazaderas y con un aislante que evita que la placa y electrodo estén en corto circuito, en la figura siguiente se ve como se colocó.



Figura 62. Soporte de electrodo

Fuente: Propia, 2018

Se usó como material aislante un polímero (poliamida) para aislar la placa colectora con el electrodo.

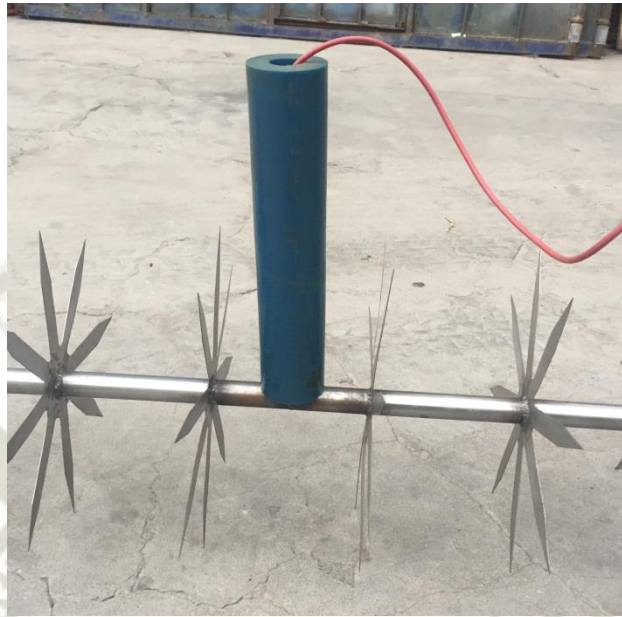


Figura 63. *Aislante de electrodo*

Fuente: Propia, 2018

4.1.6. Bastidor de faja transportadora y precipitador.

El bastidor del precipitador electrostático se diseñó y fabricó con ángulos estructurales de material A36, el cual quedó así.



Figura 64. Estructura base del precipitador electrostático

Fuente: Propia, 2018

- Se unió la estructura del bastidor con la faja transportadora y el precipitador electrostático.



Figura 65. Ensamble de estructura base del precipitador electrostático

Fuente: Propia, 2018

4.1.7. Pintado del equipo.



Figura 66. Pintado de estructura base del precipitador electrostático

Fuente: Propia, 2018

4.1.8. Montaje del equipo.

Se hizo el montaje de todas las piezas, incluso la banda de caucho de la faja transportadora.



Figura 67. Montaje de precipitador electrostático

Fuente: Propia, 2018

4.2. CONTROL Y MONITOREO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.

- El control eléctrico del precipitador electrostático se diseñó y se fabricó un circuito eléctrico que controla la energía eléctrica que requiere este equipo, el cual también se usó como ayuda simuladores para realizar el circuito eléctrico. (Flyback – 18000VDC)
- Se implementó un circuito que demanda una diferencia de potencial de 30000 VDC.
Modelo CXDZ

4.2.1. Transformador Flyback.

Se vio en la parte teórica que los precipitadores electrostáticos trabajan con altos voltajes (20 kV – 100 kV), por ende para este equipo a escala y modelación del funcionamiento del precipitador electrostático se usó un transformador que eleva la tensión hasta 18 kV en corriente directa (DC).

Se usó un flyback, el cual estos se encuentran en televisores antiguos y que nos brindan esa cantidad de voltaje que necesita nuestro equipo.



Figura 68. Flyback

Fuente: Melinterest

Este componente nos brinda una salida de hasta 18 kV, estos trabajan con una alimentación de corriente directa (DC) y a altas frecuencias (10 kHz – 60 kHz). Las características de este son:

- Corriente directa (DC)
- Voltaje de entrada: 0 - 20 Volt.
- Voltaje de salida: 10 kV - 18 kV
- Frecuencia: 15 kHz - 50kHz

Para hacer trabajar a este equipo se requiere de los circuitos eléctricos siguientes.

- Circuito rectificador de corriente alterna (AC) a corriente directa (CD) onda completa)
- Circuito regulador de voltaje.
- Circuito elevador de frecuencia.
- Circuito de control.

4.2.2. Circuito eléctrico.

4.2.2.1. Circuito rectificador de corriente alterna (AC) a corriente directa (CD).

El circuito rectificador de corriente alterna (AC) a corriente directa (DC) se diseñó con los siguientes componentes.

- 01 transformador de 220 VAC a 12 VAC.
- 01 puente de diodos.
- 01 condensador electrolítico de 2200 uF de 16 V.
- 01 interruptor on-off
- 01 LED testigo.

Con la ayuda del programa PROTEUS, nos facilitó en la construcción de este circuito, el circuito quedo de la siguiente manera.

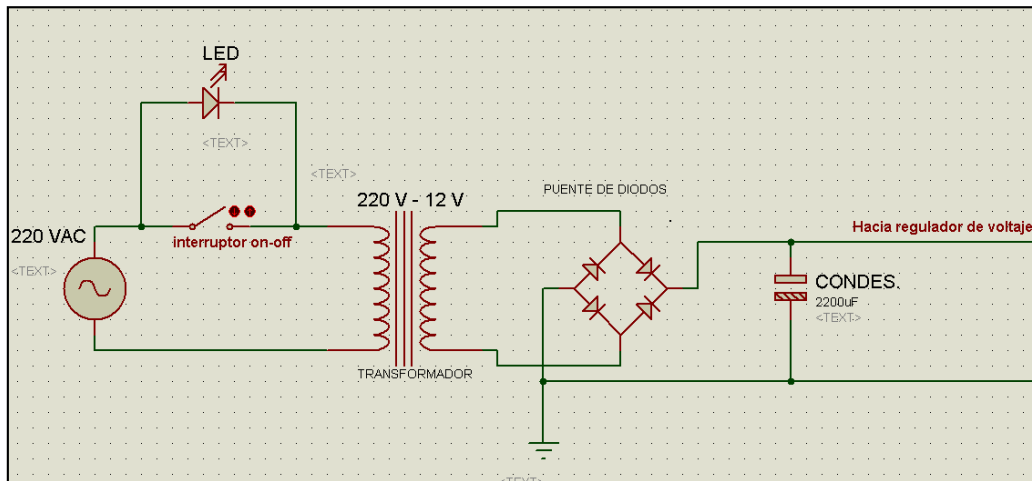


Figura 69. Rectificador de AC a DC

Fuente: Propia, 2018

4.2.2.2. Circuito Regulador de Voltaje de entrada de corriente directa (DC).

Este circuito se usó para regular el voltaje de entrada rectificadas, que es necesario para variar el voltaje de nuestro precipitador electrostático. Los materiales que se usó para este circuito son los siguientes:

- 01 condensador de 0.1 uF de 50 V.
- 01 potenciómetro de 10 k Ω .
- 01 resistencia de 470 Ω .
- 01 condensador de 1 uF de 50 V.
- 01 regulador de voltaje tipo LM317T
- 01 mini voltímetro de 3 dígitos digital.

Con la ayuda del programa PROTEUS, nos facilitó en la construcción de este circuito, el circuito quedo de la siguiente manera.

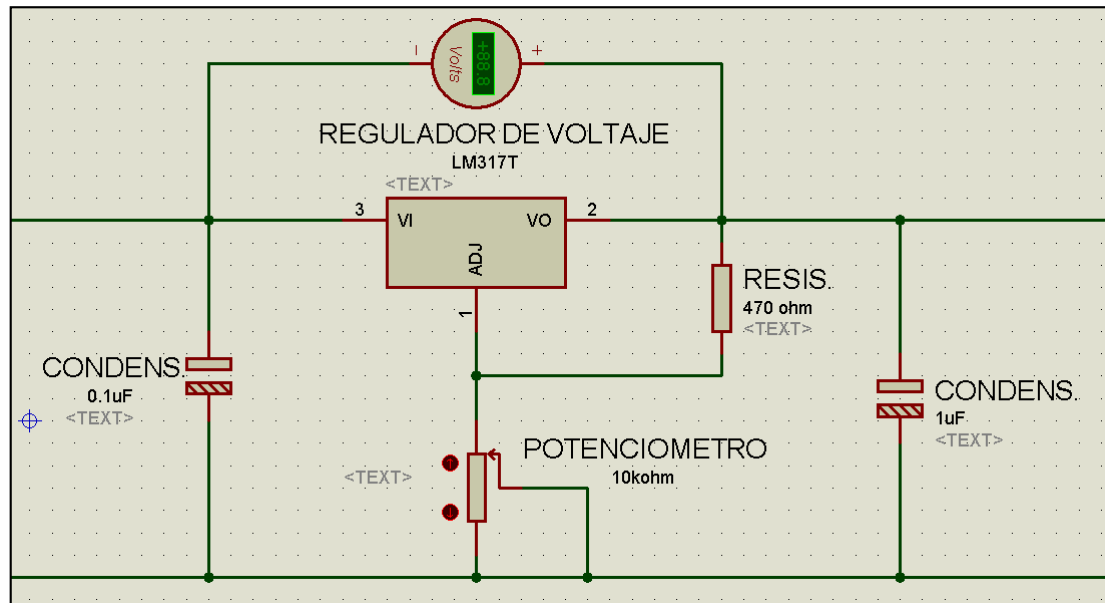


Figura 70. Regulador de voltaje

Fuente: Propia, 2018

4.2.2.3. Circuito elevador de frecuencia (Hz).

Este circuito se usa para elevar la frecuencia, el cual necesita el flyback (transformador de alto voltaje) para su funcionamiento. Los materiales que se usó para este circuito son los siguientes:

- 02 resistencias de 1 k Ω .
- 01 potenciómetro de 20 k Ω .
- 01 potenciómetro de 10 k Ω .
- 01 resistencia de 10 k Ω .
- 01 condensador de 1nF.
- 01 circuito integrado 555.
- 01 resistencia de 330 Ω .
- 01 transistor 2N2222A.

- 01 condensador de 22nF.
- 01 resistencia de 100 Ω .
- 01 Mosfet IRF540.
- 01 fusible de 5 A.
- 01 switch on-off.
- 01 Regulador 7805
- 01 Led diodo.

Con la ayuda del programa PROTEUS, nos facilitó en la construcción de este circuito, el circuito quedo de la siguiente manera.

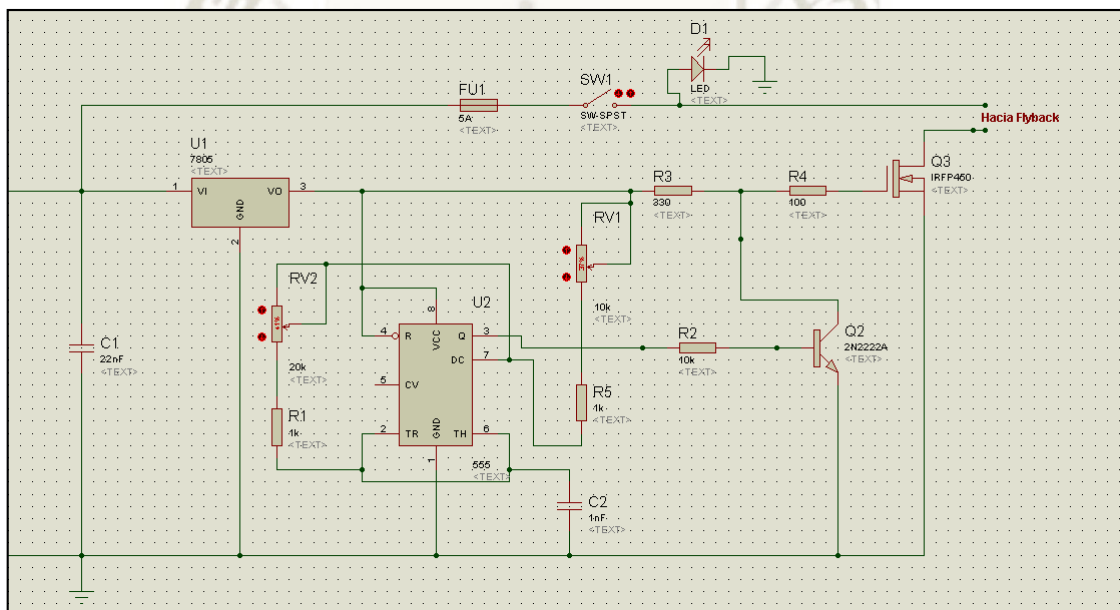


Figura 71. Elevador de frecuencia

Fuente: Propia, 2018

4.2.2.4. Circuito general

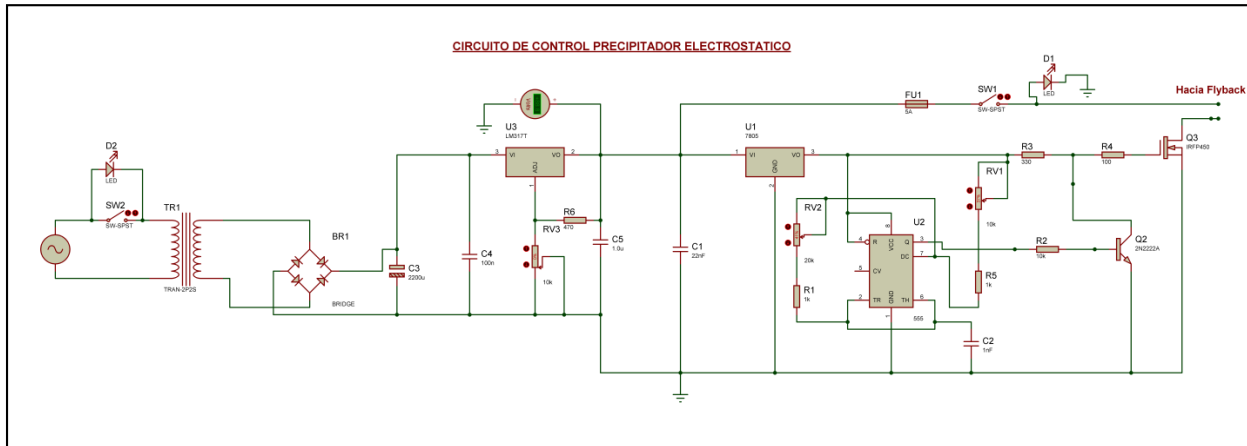


Figura 72. Circuito general

Fuente: Propia, 2018

4.2.3. Tablero eléctrico.

La construcción eléctrica del circuito se instaló en una caja de paso aislante eléctrico, de dimensiones:

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



Figura 73. Tablero/Caja para circuito

Fuente: Propia, 2018

4.2.3.1. Construcción del circuito.

La construcción del circuito se siguió según el esquema general del circuito diseñado, el cual el circuito se construyó en una placa perforada para circuitos.

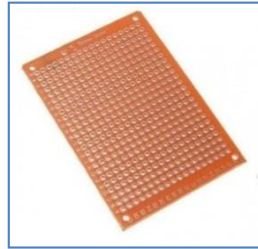


Figura 74. Placa perforada para circuito

Fuente: tresdprinttech, 2019

La imagen continuación muestra la construcción del circuito, en la cual se ve el circuito rectificador de AC (Corriente Alterna) a DC (Corriente Directa)

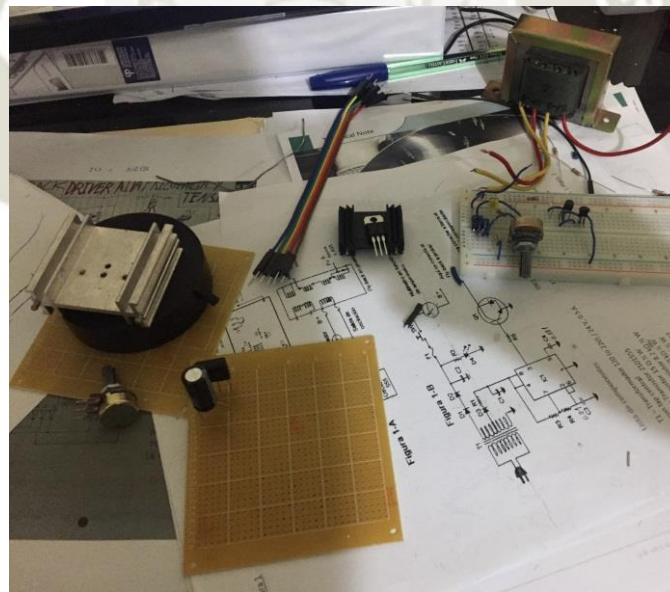


Figura 75. Construcción de circuito de AC a DC

Fuente: Propia, 2018

La imagen continuación muestra la construcción del circuito, en la cual se ve el circuito rectificador de CA (Corriente Alterna) a CD (Corriente Directa) el circuito regulador de voltaje en la salida del circuito rectificador construido en la placa perforada para circuitos eléctricos.

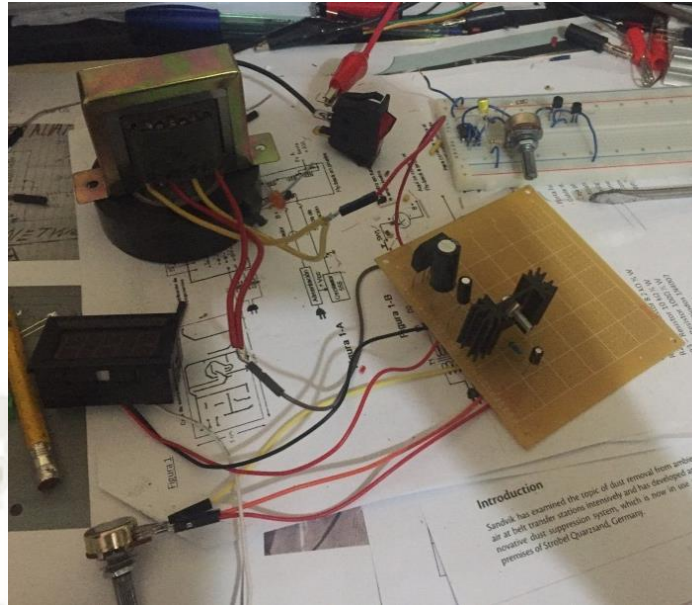


Figura 76. Construcción de circuito regulador de voltaje

Fuente: Propia, 2018

La imagen continuación muestra la construcción del circuito, en la cual se ve el circuito rectificador de CA (Corriente Alterna) a CD (Corriente Directa), el circuito regulador de voltaje en la salida del circuito rectificador y el circuito elevador de frecuencia construido en la placa perforada para circuitos eléctricos.

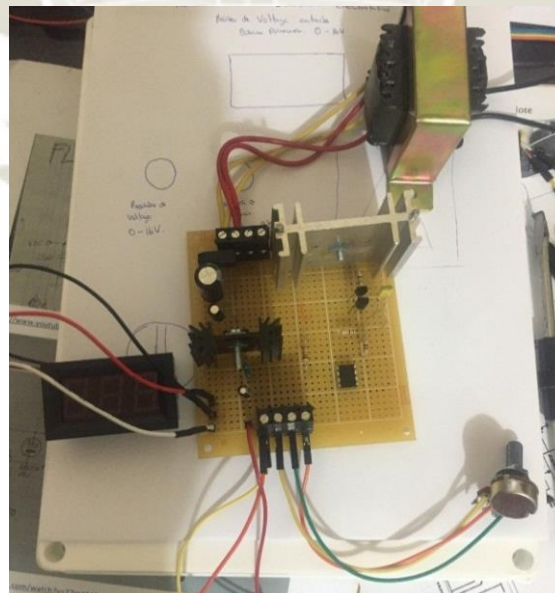


Figura 77. Construcción de circuito elevador de frecuencia

Fuente: Propia, 2018

En la siguiente imagen se instaló los mandos de control en la cara exterior del tablero eléctrico, se instaló el transformador y se ubicó la tarjeta del circuito eléctrico en el tablero de control.

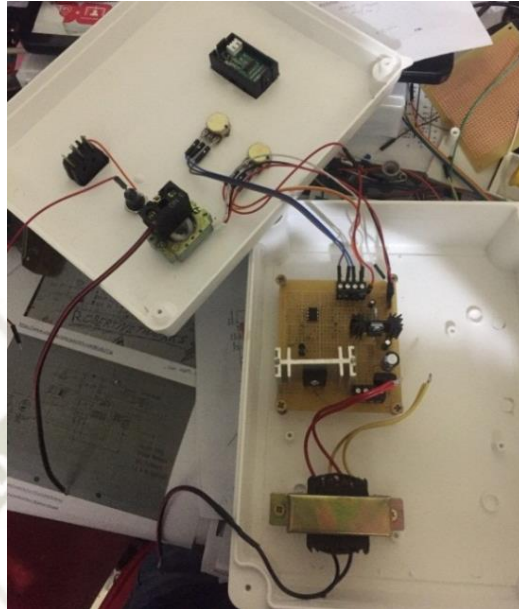


Figura 78. Circuito instalado en tablero

Fuente: Propia, 2018

En la siguiente imagen se instaló el transformador (flyback) junto al circuito de control, el cual conecto según el diseño del circuito dado anteriormente.

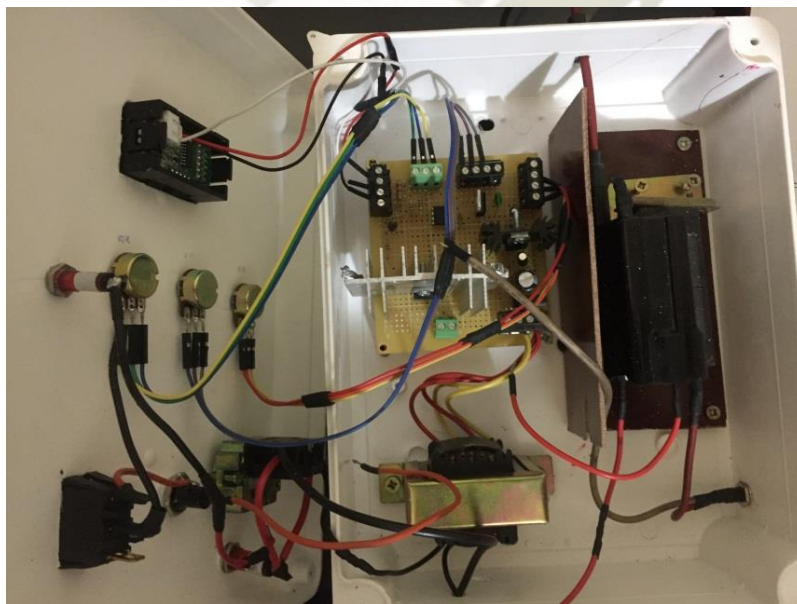


Figura 79. Circuito de control de PES

Fuente: Propia, 2018

En la siguiente imagen muestra como quedo la cara exterior del tablero de control del precipitador electrostático.



Figura 80. Cara exterior del tablero.

Fuente: Propia, 2018

4.2.4. Controlador digital.

Se instaló un mini voltímetro digital de 3d dígitos que regula el voltaje de entrada después del circuito rectificador de AC a DC de.

- Voltaje de transformador :220 VAC -> 12 VAC
- Voltaje después del circuito rectificador: :12 VDC
- Mini voltímetro de 3 dígitos.
- Potenciómetro regulador de voltaje.



Figura 81. Mini voltímetro digital

Fuente: System1



Figura 82. Tablero cara exterior

Fuente: Propia, 2018

4.2.5. Cables.

Los cables de la generación de alto voltaje, los cables son de un material aislante de alta tensión, el cual estos están instalados en el flyback.

Características:

Marca	: SUMITOMO-Y
Tipo	: TV – 40
Material	: XLHDPE
Temperatura	: 105 °C (máxima)
Tamaño	: AWG22
Tensión máxima	: 40KVDC



Figura 83. Cable de alta tensión.

Fuente: Melinterest

4.2.6. Interruptores de encendido.

Para el tablero de control se instaló interruptores:

- 01 switch on - off

- 01 selector de encendido de circuito de control.
- 01 llave general termomagnética C16/monofásico.



Figura 84. Interruptores de encendido

Fuente: Promelsa, 2018

4.2.7. Circuito de control de alta diferencia de potencial CXDZ.

Este circuito nos proporciona una diferencia de voltaje de 30000VDC, el cual es suficiente para la captura del material particulado en nuestro equipo precipitador electrostático. Este es un suministro de energía de alto voltaje, puede usarlo para generar la salida de alto voltaje,

Este equipo de suministro tiene las siguientes funciones de protección:

Protección de acceso directo:

Cuando la línea de salida positiva y la línea de salida negativa son cortas, el voltaje de salida será cortado

Prevenir la protección de chispa:

Cuando el campo electrostático esté generando una chispa, la fuente de alimentación HV (High Voltage) reducirá la salida, después de un segundo, la salida volverá a comenzar,

4.2.7.1. Usos de este suministro de energía.

- Campo eléctrico de alta tensión.
- Limpiador de aire electrotérmico.
- Campo electrostático.
- Humo limpio.
- Purificadores de aire.
- Ionizador de aire.
- Precipitador electrostático.
- Disipador de polvo, Etc.

4.2.7.2. Especificaciones del suministro de energía.

- Marca: CXDZ.
- Modelo: CX-300A
- Tensión de entrada: 180 V ~ 260 V (AC)
- Tensión de salida: 3KV ~ 30KV (DC) (continuamente)
- Corriente de salida: 8 ~ 10mA (DC)
- Potencia máxima de salida: 100 W
- Peso: 1,5 kg
- Tamaño: 240mm * 105mm * 108mm



Figura 85. Control de suministro de energía

Fuente: CXDZ ChengDu innovative electronic factory, 2011

CAPITULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIONES

5.1. SIMULACIÓN DEL ELECTRODO.

La simulación del electrodo será para observar las líneas de campo eléctrico, analizando con una diferencia de potencial de 30000 V, el cual es la máxima diferencia de potencial que nuestro equipo desarrolla.

Se usó como simulador el Ansys Workbench para este tipo de demostración,

- A continuación se diseñó el electrodo tipo S con 4 aspas de forma estrellada, esto solo para observar la demostración de las líneas de campo.

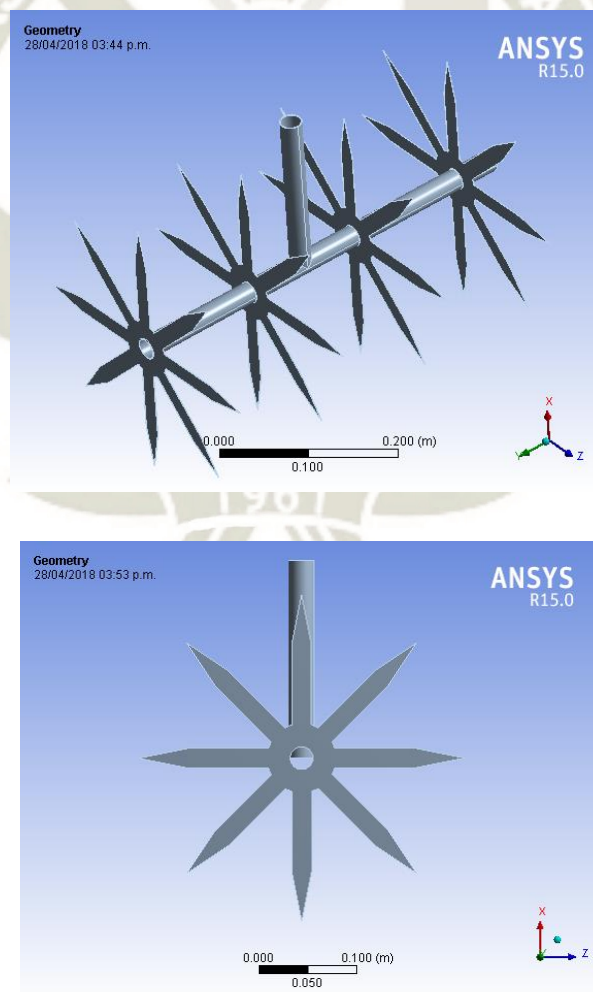


Figura 86. Dibujo del electrodo en cad

Fuente: Propia, 2018

- En la siguiente imagen se mostrara las líneas de campo eléctrico del electrodo tipo S.

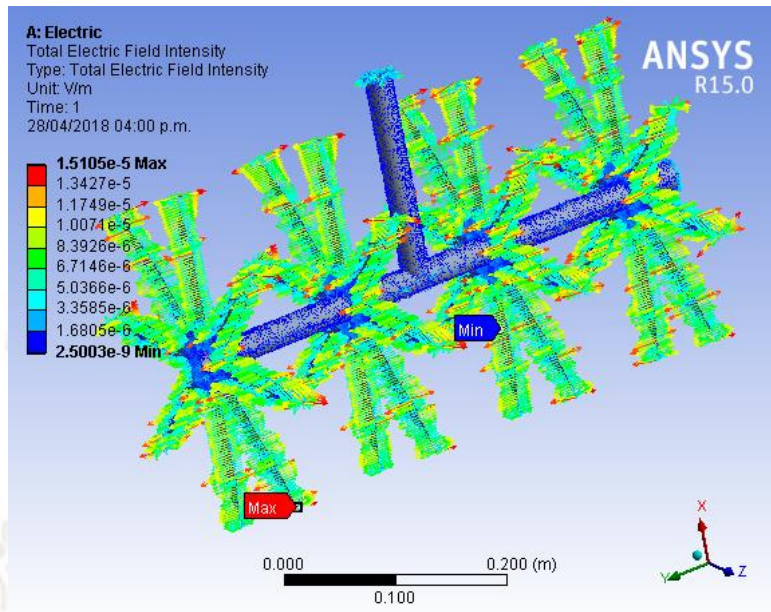


Figura 87. Simulación del electrodo vista ISO

Fuente: Propia, 2018

- En las simulaciones del electrodo observamos que las líneas del campo salen de forma perpendicular de las aspas, esa configuración está bien ya que los espacios entre aspas se generan líneas de campo eléctrico que hacen que las partículas de polvo se ionicen para luego estas migren hacia las placas colectoras.

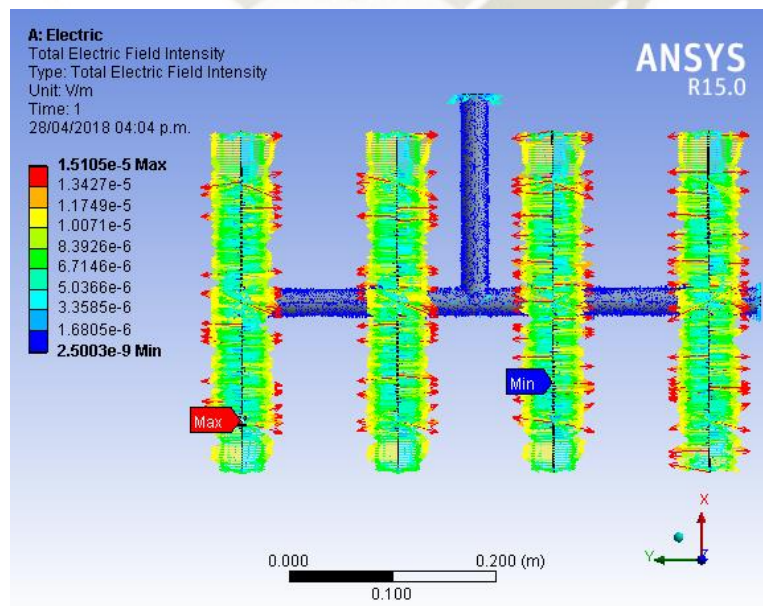


Figura 88. Simulación del electrodo vista lateral

Fuente: Propia, 2018

- Observando en la figura vemos como las líneas de campo salen de forma perpendicular de cada aspa, esto es debido al principio de formación de campo eléctrico entre un placa, que para luego al encontrarse las líneas de campo en direcciones opuestas estas líneas de campo se verán obligadas a que no se crucen, por ende cambiaran su dirección, ya que signos iguales se repelen.

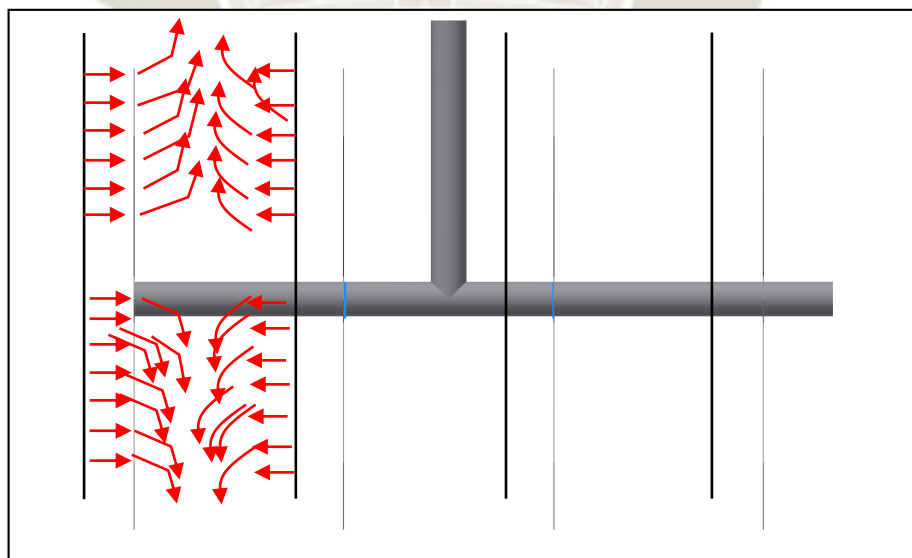
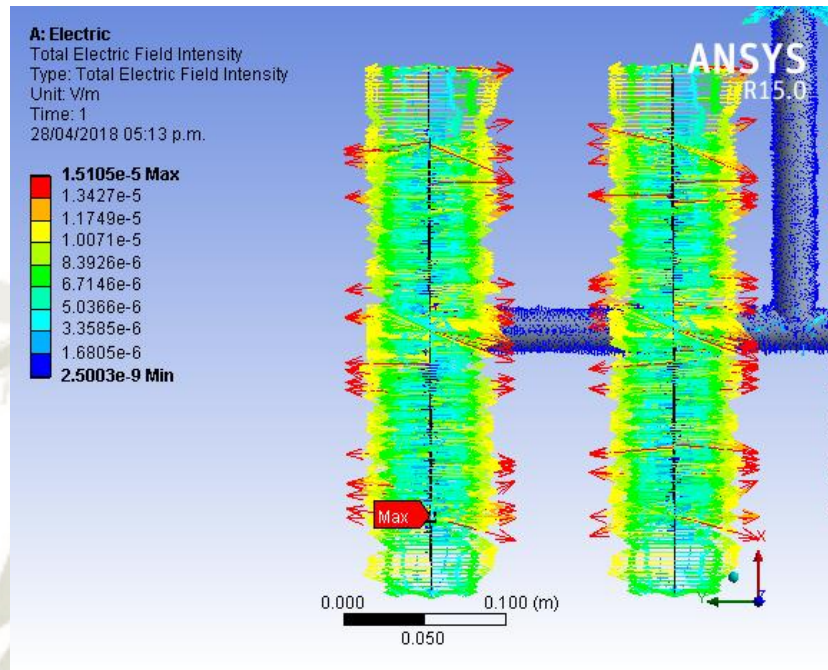


Figura 89. Simulación del electrodo vista lateral y líneas de campo eléctrico

Fuente: Propia, 2018

5.2. PUESTA A PRUEBA DEL PRECIPITADOR.

El precipitador electrostático puede trabajar con uno de los dos circuitos de suministro de energía implementados anteriormente, los cuales están aptos para el funcionamiento:

1. Tablero eléctrico elevador de voltaje flyback.
2. Suministro de energía CXDZ.

Ambos Suministros de energía tienen el mismo principio de funcionamiento, sin embargo el equipo CXDZ nos proporciona una diferencia de potencial de hasta 30000 VDC, en comparación con el suministro flyback que nos proporciona hasta 18000VDC.

Por lo tanto para las pruebas de funcionamiento del precipitador electrostático se usará el equipo CXDZ ya que nos proporciona una salida de diferencia de potencial alta, el cual brinda una captura más eficiente del material particulado dentro del precipitador electrostático.

5.2.1. Prueba del PES con humo.

En esta prueba del precipitador se simulara con humo, el cual es un material particulado más fino que el polvo de cemento aproximadamente ($0.1 \mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$), el humo se hará ingresar en la entrada del precipitador electrostático, que para luego se visualizará la captura de este material particulado en el precipitador electrostático, por el cual en la salida observaremos que el humo es disipado.

5.2.2. Prueba del PES con polvo de cemento.

En esta prueba del precipitador se simulara con polvo de cemento, el cual el polvo de cemento es aproximadamente ($< 10 \mu\text{m}$), el polvo se hará ingresar en la entrada del precipitador electrostático, que para luego se visualizará la captura de este material particulado en el precipitador electrostático, por el cual en la salida observaremos que el polvo es disipado.

- Pruebas del precipitador electrostático con humo.



- Equipo apagado: (off)



- Equipo encendido (on)

- Pruebas del precipitador electrostático con polvo de cemento



Equipo apagado: (off)



Equipo encendido. (on)



Figura 90. Puesta en marcha precipitador electrostático.

Fuente: Propia, 2018

5.3. ANÁLISIS.

En las imágenes de la pág. 134. Se observa que se puso a prueba el precipitador electrostático, tanto para el material particulado como el humo y el polvo de cemento, en donde se visualizó la disipación del material particulado al poner en marcha el equipo.

En las siguientes presentaciones se realizará las gráficas respectivas de este equipo trabajando en las condiciones de diseño.

El diseño del precipitador electrostático se puede manejar para diferentes tamaños de faja transportadora y la cantidad de polvo generado en la transición.

En esta presente tesis se realizó los cálculos para una faja transportadora de dimensiones.

Ancho de faja: 500mm

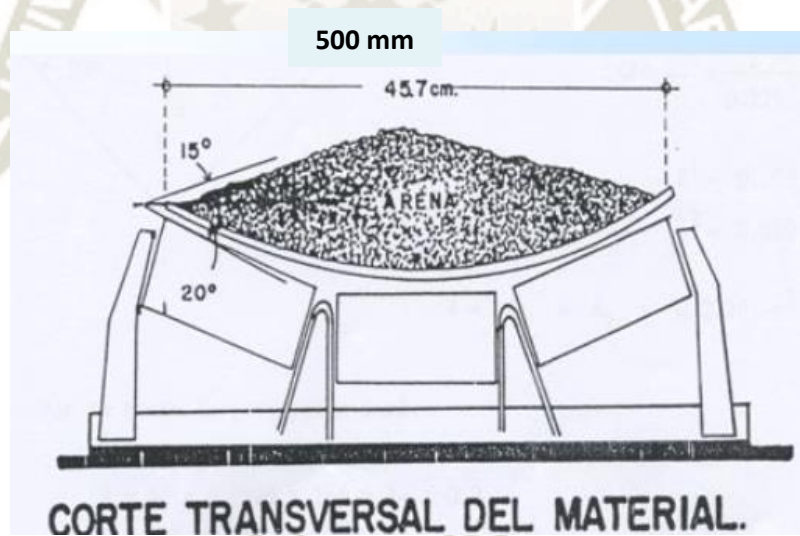


Figura 91. Ancho de faja

Fuente: Iglesias & Lozano

En las siguientes tablas 20 y 21 hechas en Excel se verifica los datos ingresados en Excel según el tamaño de la faja transportadora y la cantidad del polvo que ingresa al precipitador.

Tabla 20

Datos de entrada para el diseño del PES

Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
V_{ab}	Diferencia de potencial entre electrodo y placa colectora	30000	[V]
Q	Flujo del polvo y aire (Según dimensiones de faja transportadora – figura)	0.764	[m ³ /s]
C	Concentración material de polvo en el aire-tabla	20	[g/m ³]
m_i	Flujo másico en la entrada	55000	[g/h]
d	Diámetro de partícula	5.00E-06	[m]
μ	Viscosidad dinámica del gas	1.84E-05	[N s/m ²]
r_b	Distancia del electrodo hacia la placa colectora	0.215	[m]
r_a	Radio del electrodo	0.01	[m]
r	Distancia del electrodo hacia un punto entre el electrodo y la placa colectora	0.011	[m]
k	Constante dieléctrica de la partícula	5	[adimensional]
n	Eficiencia	97.0%	
ϵ_0	Permitividad del espacio vacío	8.85E-12	[C ² /Nm ²]
π	Pi	3.1416	[adimensional]

Fuente: Propia, 2018

Tabla 21

Datos de salida del diseño del PES

Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
E	Intensidad de campo eléctrico $E = \frac{V_{ab}}{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)r}$	8.89E+0	[V/m][N/C]
Qc	Carca de partícula por campo $q_c = \left(\frac{3k}{k+2}\right)\pi\epsilon_0 d^2 E$	5	[C]
W	Velocidad de migración $W = \frac{q_f E}{3\pi\mu d}$	1.32E-15	[m/s]
t	Tiempo de migración $t = \frac{d}{\left(\frac{v_o + v_f}{2}\right)}$	0.32	S
A	Area de la placa colectora $A = -\frac{\ln(1-n_c)}{\frac{W}{Q}}$	2.00	[m ²]
n	Edificiencia del supresor $n_c = 1 - e^{-\left(\frac{WA}{Q}\right)}$	0.971	
ms	Flujo másico en la salida $m_s = m_i * e^{-\left(\frac{WA}{Q}\right)}$	1575	[g/h]
mcap	Masa capturada $m_{cap} = m_i - m_s$	53425	[g/h]

Fuente: Propia, 2018

5.4. GRÁFICAS.

5.4.1. Gráfica Distancia en cualquier punto entre el electrodo y el colector VS intensidad del campo eléctrico.

Esta gráfica muestra como la intensidad de campo eléctrico disminuye cuando el punto aplicación se va alejando del electrodo. Aplicando una diferencia de potencial de 30000V

Tabla 22

Distancia en cualquier punto entre el electrodo y el colector VS intensidad del campo eléctrico.

r (m)	E (V/m)	r (m)	E (V/m)
0.010	9.78E+05	0.115	8.50E+04
0.017	5.75E+05	0.122	8.01E+04
0.024	4.07E+05	0.129	7.58E+04
0.031	3.15E+05	0.136	7.19E+04
0.038	2.57E+05	0.143	6.84E+04
0.045	2.17E+05	0.150	6.52E+04
0.052	1.88E+05	0.157	6.23E+04
0.059	1.66E+05	0.164	5.96E+04
0.066	1.48E+05	0.171	5.72E+04
0.073	1.34E+05	0.178	5.49E+04
0.080	1.22E+05	0.185	5.29E+04
0.087	1.12E+05	0.192	5.09E+04
0.094	1.04E+05	0.199	4.91E+04
0.101	9.68E+04	0.206	4.75E+04
0.108	9.05E+04	0.215	4.55E+04

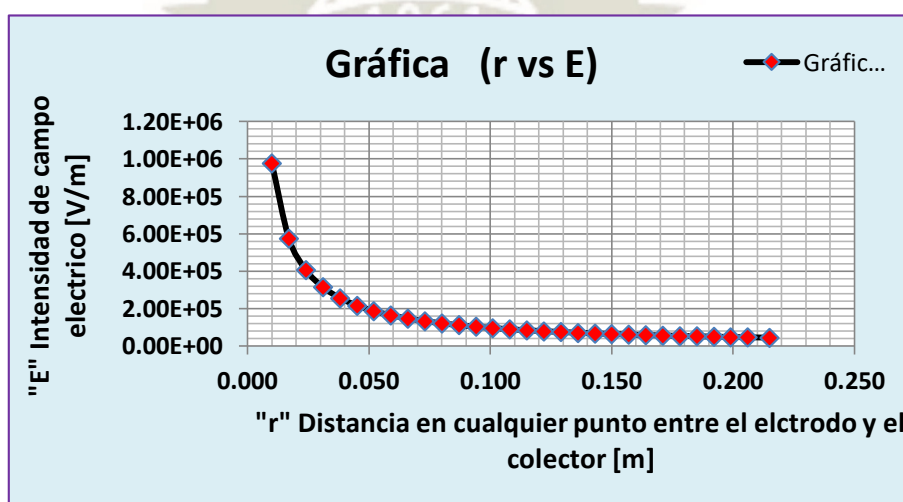


Figura 92. Distancia en cualquier punto entre el electrodo y el colector VS intensidad del campo eléctrico.

Fuente: Propia, 2018

5.4.2. Gráfica Diferencia de potencial VS Intensidad de campo eléctrico.

Esta gráfica muestra como varía el campo eléctrico según la variación del suministro de energía y el aumento de la distancia entre el electrodo y la placa colectora.

Tabla 23

Diferencia de potencial VS Intensidad de campo eléctrico.

Vab (V)	r (m)	E (V/m)	Vab (V)	r (m)	E (V/m)
1000	0.010	3.3E+04	16000	0.115	4.5E+04
2000	0.017	3.8E+04	17000	0.122	4.5E+04
3000	0.024	4.1E+04	18000	0.129	4.5E+04
4000	0.031	4.2E+04	19000	0.136	4.6E+04
5000	0.038	4.3E+04	20000	0.143	4.6E+04
6000	0.045	4.3E+04	21000	0.150	4.6E+04
7000	0.052	4.4E+04	22000	0.157	4.6E+04
8000	0.059	4.4E+04	23000	0.164	4.6E+04
9000	0.066	4.4E+04	24000	0.171	4.6E+04
10000	0.073	4.5E+04	25000	0.178	4.6E+04
11000	0.080	4.5E+04	26000	0.185	4.6E+04
12000	0.087	4.5E+04	27000	0.192	4.6E+04
13000	0.094	4.5E+04	28000	0.199	4.6E+04
14000	0.101	4.5E+04	29000	0.206	4.6E+04
15000	0.108	4.5E+04	30000	0.215	4.5E+04

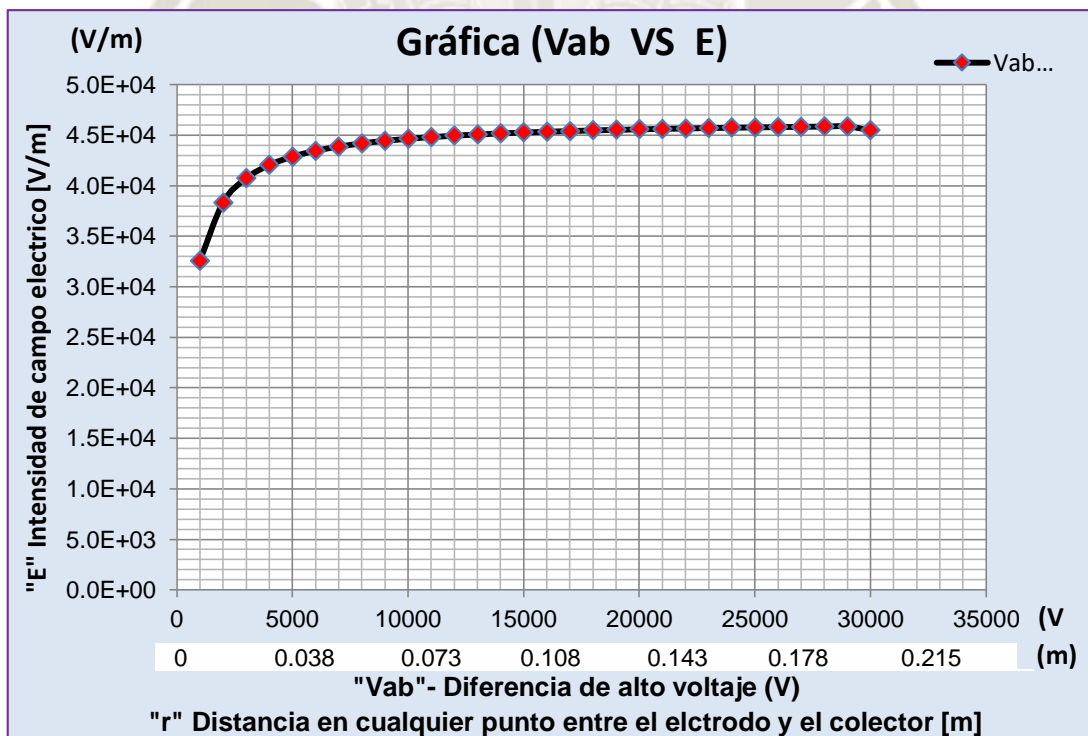


Figura 93. Diferencia de potencial VS Intensidad de campo eléctrico.

Fuente: Propia, 2018

5.4.3. Gráfica diferencia de potencial VS velocidad de migración hacia la placa colectora (Vab VS W)

Esta gráfica muestra como aumenta la velocidad de migración del material particulado hacia la placa colectora según se aplica una diferencia de potencial variable. Al aplicar una diferencia de potencial de 30000 VDC, la velocidad de migración de las partículas asciende hasta 1.40 m/s.

Tabla 24

Diferencia de potencial VS velocidad de migración hacia la placa colectora (Vab VS W).

Vab (V)	W (m/s)	Vab (V)	W (m/s)
1000	1.5E-03	16000	3.9E-01
2000	6.0E-03	17000	4.4E-01
3000	1.4E-02	18000	4.9E-01
4000	2.4E-02	19000	5.4E-01
5000	3.8E-02	20000	6.0E-01
6000	5.4E-02	21000	6.7E-01
7000	7.4E-02	22000	7.3E-01
8000	9.7E-02	23000	8.0E-01
9000	1.2E-01	24000	8.7E-01
10000	1.5E-01	25000	9.4E-01
11000	1.8E-01	26000	1.0E+00
12000	2.2E-01	27000	1.1E+00
13000	2.5E-01	28000	1.2E+00
14000	3.0E-01	29000	1.3E+00
15000	3.4E-01	30000	1.4E+00

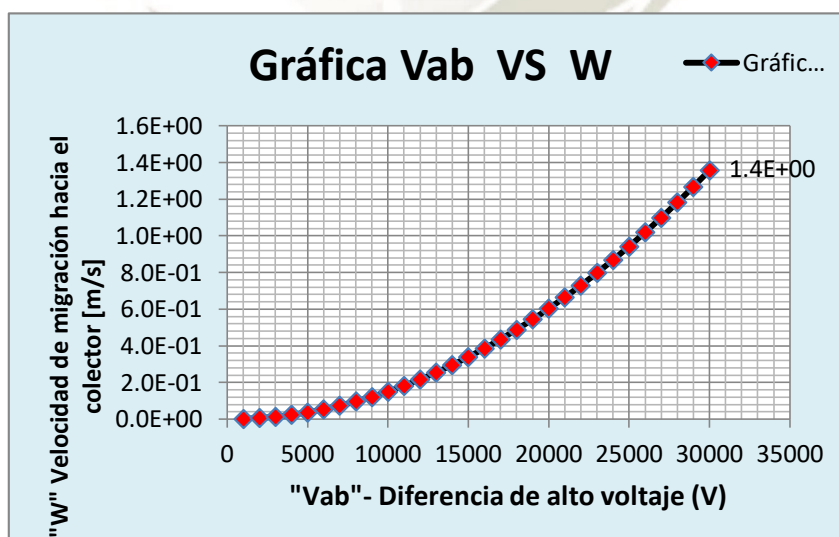


Figura 94. Diferencia de potencial VS velocidad de migración hacia la placa colectora (Vab VS W).

Fuente: Propia, 2018

5.4.4. Gráfica diferencia de potencial VS tiempo en migrar hacia la placa colectora (Vab VS t)

Esta gráfica muestra como disminuye el tiempo de migración hacia la placa colectora al aplicar una diferencia de potencial variable. Al aplicar una diferencia de potencial de 30000VDC el tiempo de migración a la placa colectora es de 0.32 s

Tabla 25

Diferencia de potencial VS tiempo en migrar hacia la placa colectora (Vab VS t)

Vab (V)	t (s)	Vab (V)	t (s)
1000	285.11	16000	1.11
2000	71.28	17000	0.99
3000	31.68	18000	0.88
4000	17.82	19000	0.79
5000	11.40	20000	0.71
6000	7.92	21000	0.65
7000	5.82	22000	0.59
8000	4.45	23000	0.54
9000	3.52	24000	0.49
10000	2.85	25000	0.46
11000	2.36	26000	0.42
12000	1.98	27000	0.39
13000	1.69	28000	0.36
14000	1.45	29000	0.34
15000	1.27	30000	0.32

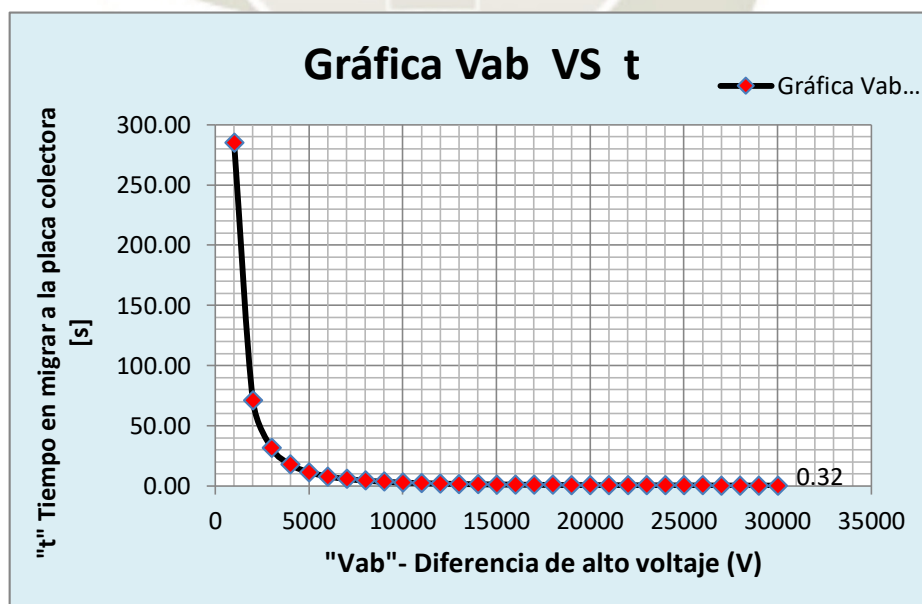


Figura 95. Diferencia de potencial VS tiempo en migrar hacia la placa colectora (Vab VS t)

Fuente: Propia, 2018

5.4.5. Gráfica diferencia de Potencial VS Flujo másico capturado en el PES (Vab VS mcap)

Esta gráfica muestra el flujo de masa que es capturado en el precipitador electrostático, aplicando de forma ascendente la diferencia de potencial. Al aplicar una diferencia de potencial de 30000VDC, el flujo de masa capturado en el precipitador electrostático es de 53425 g/h de una carga de masa de ingreso de 55000g/h

Tabla 26

Diferencia de Potencial VS Flujo másico capturado en el PES (Vab VS mcap)

Vab (V)	mcap (g/h)	Vab (V)	mcap (g/h)
1000	217	16000	34982
2000	862	17000	37428
3000	1920	18000	39696
4000	3367	19000	41776
5000	5169	20000	43663
6000	7287	21000	45357
7000	9674	22000	46863
8000	12281	23000	48187
9000	15054	24000	49341
10000	17941	25000	50337
11000	20889	26000	51187
12000	23850	27000	51907
13000	26778	28000	52511
14000	29632	29000	53012
15000	32376	30000	53425

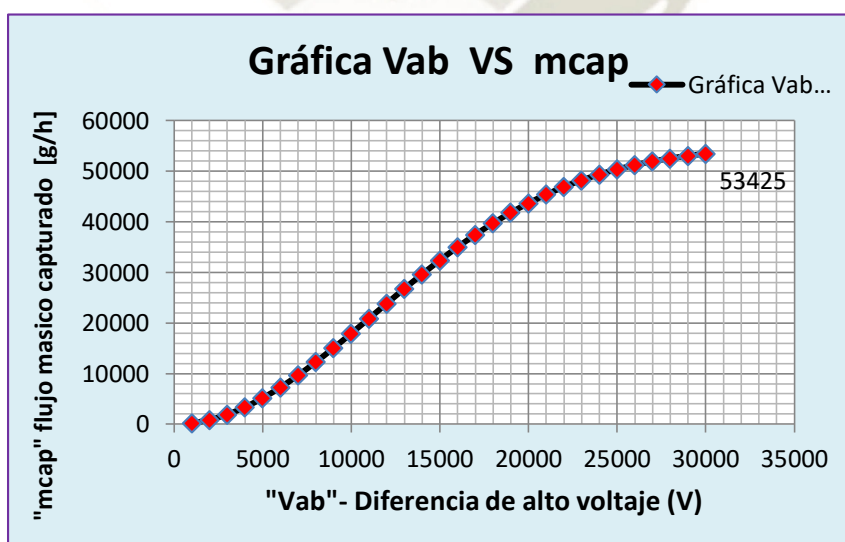


Figura 96. Diferencia de Potencial VS Flujo másico capturado en el PES (Vab VS mcap)

Fuente: Propia, 2018

5.4.6. Gráfica diferencia de Potencial VS Flujo másico en la salida del PES (Vab VS msa)

Esta gráfica nos muestra como el flujo másico en la salida disminuye o es disipado al aplicar una diferencia de potencial variable al precipitador electrostático. El cual el flujo másico que ingresa al PES es 55000 g/h, al aplicar una diferencia de potencial de 30000 VDC, se visualiza un flujo másico de 1575 g/h en la salida del PES.

Tabla 27

Diferencia de Potencial VS Flujo másico en la salida del PES (Vab VS msa)

Vab (V)	mcap (g/h)	Vab (V)	mcap (g/h)
1000	54783	16000	20018
2000	54138	17000	17572
3000	53080	18000	15304
4000	51633	19000	13224
5000	49831	20000	11337
6000	47713	21000	9643
7000	45326	22000	8137
8000	42719	23000	6813
9000	39946	24000	5659
10000	37059	25000	4663
11000	34111	26000	3813
12000	31150	27000	3093
13000	28222	28000	2489
14000	25368	29000	1988
15000	22624	30000	1575

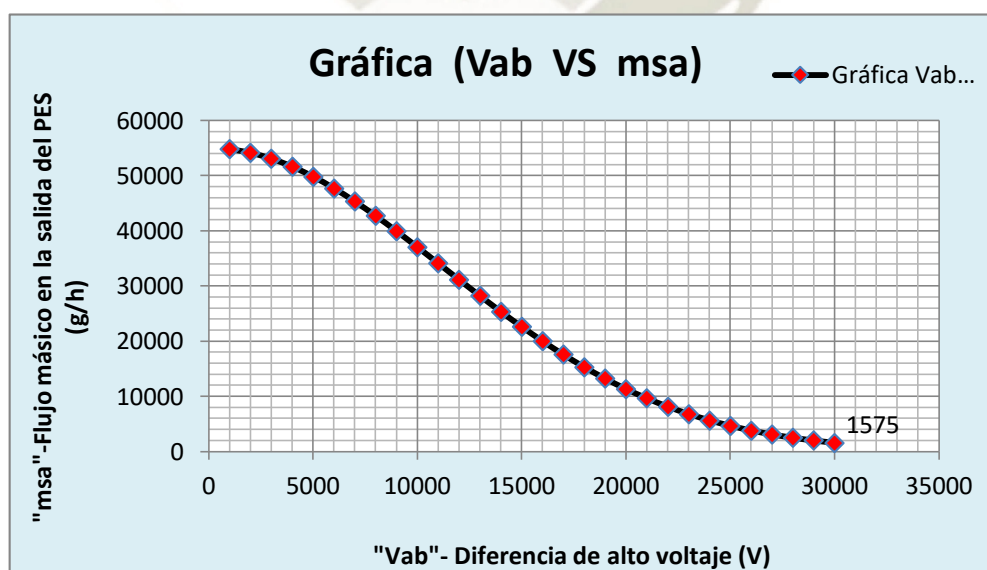


Figura 97. Diferencia de Potencial VS Flujo másico en la salida del PES (Vab VS msa)

Fuente: Propia, 2018

5.4.7. Gráfica diferencia de Potencial VS eficiencia de captación del PES (Vab VS ncap%)

Esta gráfica nos muestra la eficiencia de captación del precipitador electrostático el cual según variando la diferencia de potencial varia la eficiencia del PES. Al variar el suministro de energía a 30000 VDC visualizamos que la eficiencia del PES alcanza hasta el 97.1% de eficiencia.

Tabla 28

Diferencia de Potencial VS eficiencia de captación del PES (Vab VS ncap)

Vab (V/m)	ncap (%)	Vab (V/m)	ncap (%)
1000	0.4%	16000	63.6%
2000	1.6%	17000	68.1%
3000	3.5%	18000	72.2%
4000	6.1%	19000	76.0%
5000	9.4%	20000	79.4%
6000	13.2%	21000	82.5%
7000	17.6%	22000	85.2%
8000	22.3%	23000	87.6%
9000	27.4%	24000	89.7%
10000	32.6%	25000	91.5%
11000	38.0%	26000	93.1%
12000	43.4%	27000	94.4%
13000	48.7%	28000	95.5%
14000	53.9%	29000	96.4%
15000	58.9%	30000	97.1%

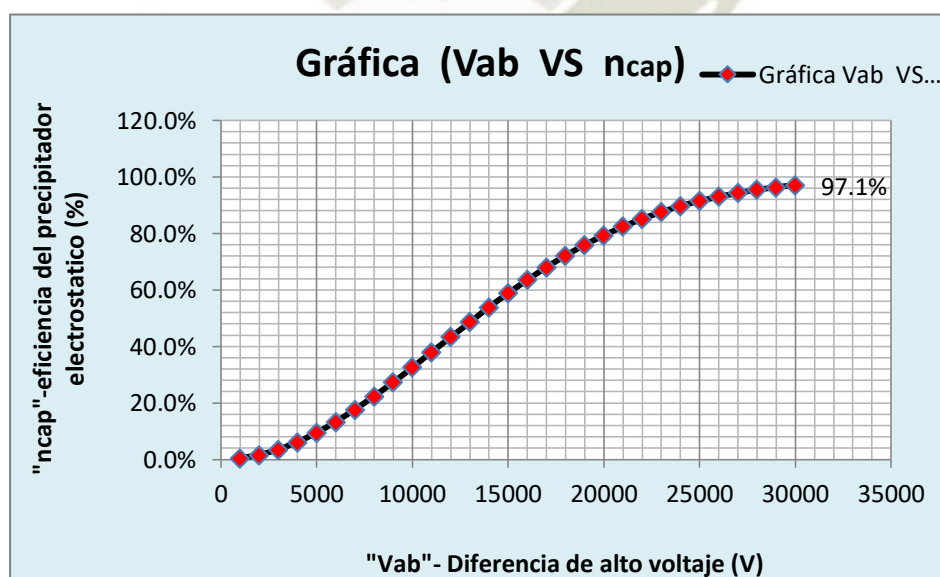


Figura 98. Diferencia de Potencial VS eficiencia de captación del PES (Vab VS ncap)

Fuente: Propia, 2018

CONCLUSIONES

- Se ha logrado elaborar el diseño e implementación de un prototipo a escala de un precipitador electrostático para el control de polución en una industria cementera.
- El precipitador electrostático a comparación de otros colectores es más eficiente, según el tamaño de partícula a capturar, ver tabla 10.
- Se estudió los principios de la física electrostática aplicados en los precipitadores electrostáticos.
- Se logró el diseño del precipitador electrostático según los cálculos de ingeniería y se obtuvieron resultados teóricos en la implementación del equipo.
- Se construyó el precipitador electrostático según el diseño y cálculos empleados.
- El diseño del precipitador electrostático considera normas ambientales para el control de polución en la industria cementera y en general.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento con humo de combustión y polvo de cemento, el cual logró capturar más del 95% de material particulado. Ver tabla 19.

RECOMENDACIONES

- Para implementar un precipitador electrostático en la disipación de polvo en la carga y descarga en las fajas transportadoras se recomienda estudiar y analizar las condiciones de trabajo y operación para tener obtener un equipo óptimo en la reducción del material particulado, basándose en el prototipo diseñado en la presente tesis sustentada, esto se realizará cambiando los parámetros de diseño y dimensiones del equipo.
- Los cálculos realizados se puede aplicar en diferentes industrias que emiten material particulado en la carga y descarga de las fajas transportadoras, esto es modificando los parámetros de diseño y dimensiones del equipo.
- Se recomienda brindar una inducción técnica al personal de trabajo al momento de operar estos tipos de equipos.
- Se recomienda no manipular el precipitador electrostático una vez puesto en marcha el equipo.
- Al momento de realizar el mantenimiento u otra actividad, se recomienda apagar el equipo y a su vez descargar el electrodo del precipitador electrostático. Ver Anexo 15.
- Se recomienda que no deben usarse en materiales de polvo explosivo o inflamable en el funcionamiento del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2002). *Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire de la EPA*. Estados Unidos.
- Arcos, J. (2011). Análisis y Diseño de una Estructura de Soporte para un Sistema de Control de Contaminación Ambiente. (*Tesis de Pregrado*). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Carrillo, H. (2011). Diseño y Cálculo de un Sistema de Extracción Localizada de Humos y Gases Porovenientes del Proceso de Soldadura. (*Tesis de Pregrado*). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- CONAMA, D. d. (2009). *Guía Metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*.
- De Meira, C. (2008). *Desempeño de un Precipitador Electrostático Operando en la Remoción de Nanopartículas de Aerosoles*. Universidad de la Salla, Bogotá, Colombia.
- Enseñat, A. (1977). *La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica*. Obtenido de Materiales de Construcción: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1180/1313>
- Fernández, B., & Hernández, A. (2008). Diagnóstico de la Industria del Cemento en Colombia y Evaluación de Alternativas Tecnológicas para el Cumplimiento de la Norma de Emisión de Fuentes Fijas. (*Tesis de Pregrado*). Universidad de la Salle, Bogota, Colombia.
- Fernandez, E. (2008). Mejoras en la Eficiencia de los Colectores de Polvo tipo Jet pulse y Precipitador Electrostático. (*Tesis de Pregrado*). Universidad de Piura, Piura.
- Gelis, J., Guerrero, G., & Narvaez, R. (2014). Principios para el Modelamiento de Precipitadores Electrostáticos de Sólidos. *Universidad de Sam Buenaventura*.

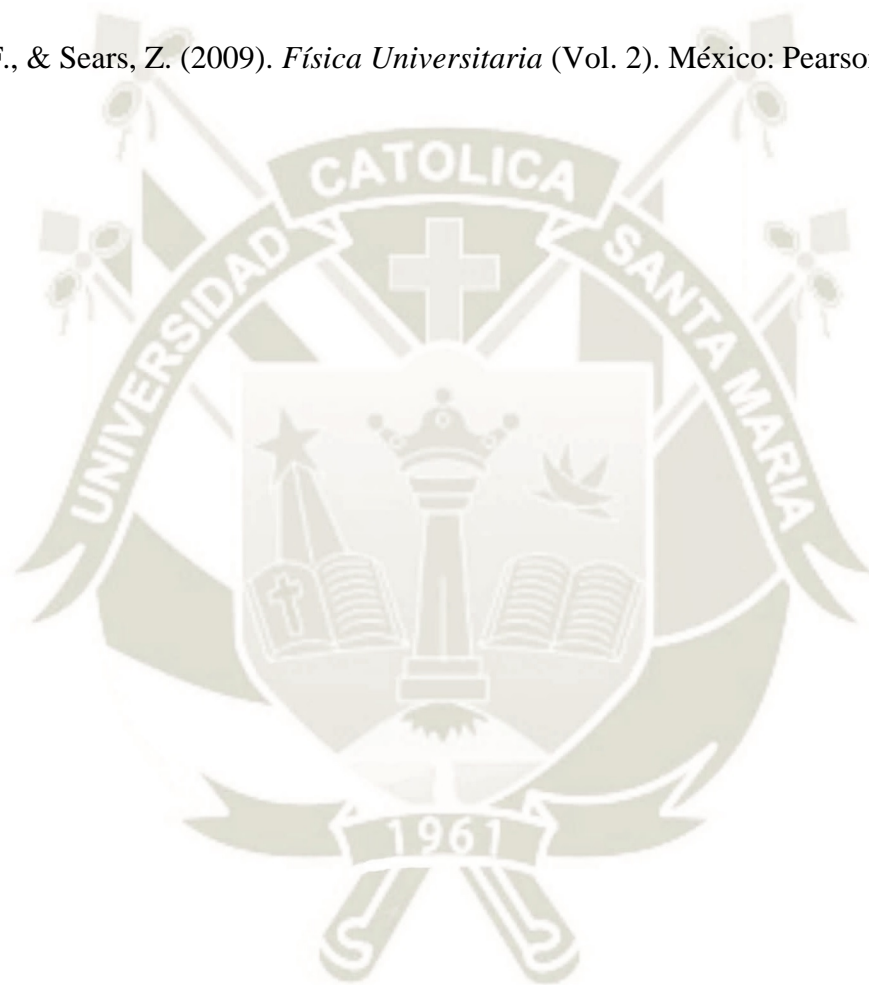
- Gómez, E. (2016). Conversión de un Precipitador Electrostático a Filtro de Mangas (Pulse Jet) en la Planta de Molienda de Carbon en la Cementera Unacem-Atocongo. (*Tesis de Pregrado*). Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú.
- Jiménez, F. (2015). *Selección de un Sistema de Despolvo en Área de Trituración en la Industria Cementera*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Kenneth, W. (1998). documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina proveniente de Fuentes Estacionarias. Contrato N° 68-D-98-026 de la EPA Asignación de Trabajo N° 0-08.
- Masters, G., & Wendell, E. (2008). *Introducción a la Ingeniería Medioambiental*. España.
- Nevers, N. d. (2000). *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. México.
- Orozco, C., & Pérez, A. (2011). *Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química*. España.
- Orrala, A. (2010). *Diseño de un Sistema de Extracción de Material Particulado de una Planta de Arena (Trituración y Clasificación de Polvo)*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca.
- Parker, K., & Plaks, N. (2004). Electrostatic Precipitator (ESP).
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (28 de abril de 2010). *Sector Cementero del Perú*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica del Perú: [http://www.latinburkenroad.com/docs/BRLA%20Peruvian%20Cement%20Industry%20\(201002%20Spanish\).pdf](http://www.latinburkenroad.com/docs/BRLA%20Peruvian%20Cement%20Industry%20(201002%20Spanish).pdf)
- Portugal, J. (2012). *Teoría y problemas de física "Campos"*. Arequipa.
- Prieto, I. (2000). Precipitadores Electrostáticos Usados en Centrales Termoeléctricas.
- Sagástegui, A. (2012). Propuesta para reducir las Emisiones de polvo fugitivo en el Proceso Productivo de una Empresa Cementera. (*Tesis de Pregrado*). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima.
- Sandvik. (2009). HX410 electrostatic dust suppression.

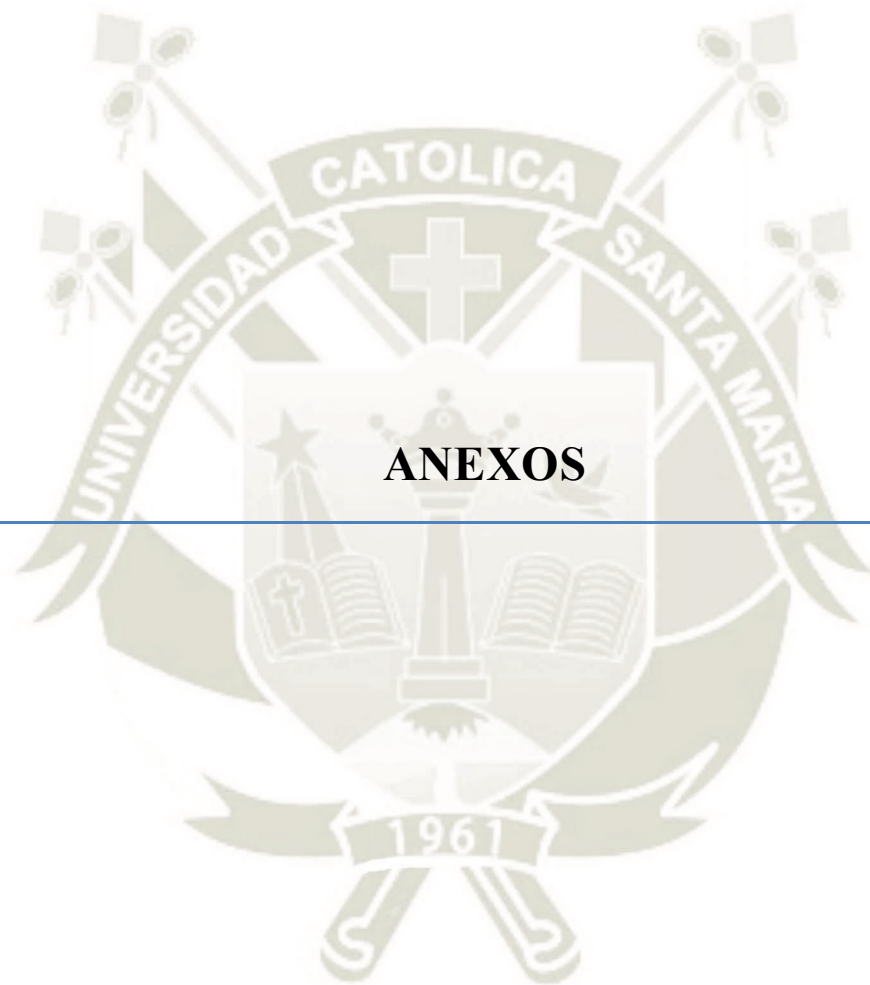
Saravia, H. (2008). *Estudio Ambiental, Técnico y Económico de la Utilización y Aprovechamiento de Precipitadores Electrostáticos, en Planta de Generación de Arizona*. Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Theodore, L. (2008). *Air Pollution Control Equipment Calculations*. Estados Unidos: Wiley.

Wood, D. (Diciembre de 1958). Consideraciones Prácticas sobre Precipitadores Electrostáticos. *Materiales de Construcción*, 8.

Young, F., & Sears, Z. (2009). *Física Universitaria* (Vol. 2). México: Pearson Educación.





Anexo 1: Estándares de Calidad Ambiental para Aire

Parámetros	Período	Valor [µg/m³]	Criterios de evaluación	Método de análisis ⁽¹⁾
Benceno (C ₆ H ₆)	Añual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO ₂)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Añual	100	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM _{2,5})	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Añual	25	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM ₁₀)	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Añual	50	Media aritmética anual	
Mercurio Gaseoso Total (Hg) ⁽²⁾	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman. (Métodos automáticos)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O ₃)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM ₁₀	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM ₁₀ (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Añual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

NE: No Exceder.

⁽¹⁾ o método equivalente aprobado.

⁽²⁾ El estándar de calidad ambiental para Mercurio Gaseoso Total entrará en vigencia al día siguiente de la publicación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, de conformidad con lo establecido en la Séptima Disposición Complementaria Final del presente Decreto Supremo.

1529835-1

Fuente: DS N°003-MINAM, 2017, pág. 9

Anexo 2: Límite permisible (LMP) para emisiones de los hornos de la industria cementera del Perú

Parámetro	Horno	LMP (mg/m ³)
Material Particulado	En curso	250
	Nuevo	150

La emisión de material particulado (MP) por horno (EH) es el promedio ponderado de las emisiones de la totalidad de las chimeneas de cada horno, incluyendo la chimenea de bypas para control de álcalis o cloro y se calcula con la siguiente ecuación:

$$EH = (\sum CiQi) / \sum Qi$$

Donde:

- EH = Emisión combinada de la línea de producción, en mg/m³
- Ci = Concentración de la chimenea "i", en mg/m³
- Qi = Flujo de gases de la chimenea "i", en m³/seg
- i = Número de chimenea

17680

Fuente: DS N°003-PRODUCE, 2002, pág. 5

Anexo 3: Límites máximos permisibles de emisiones gaseosas y de partículas en actividades o instalaciones de hidrocarburos nuevas

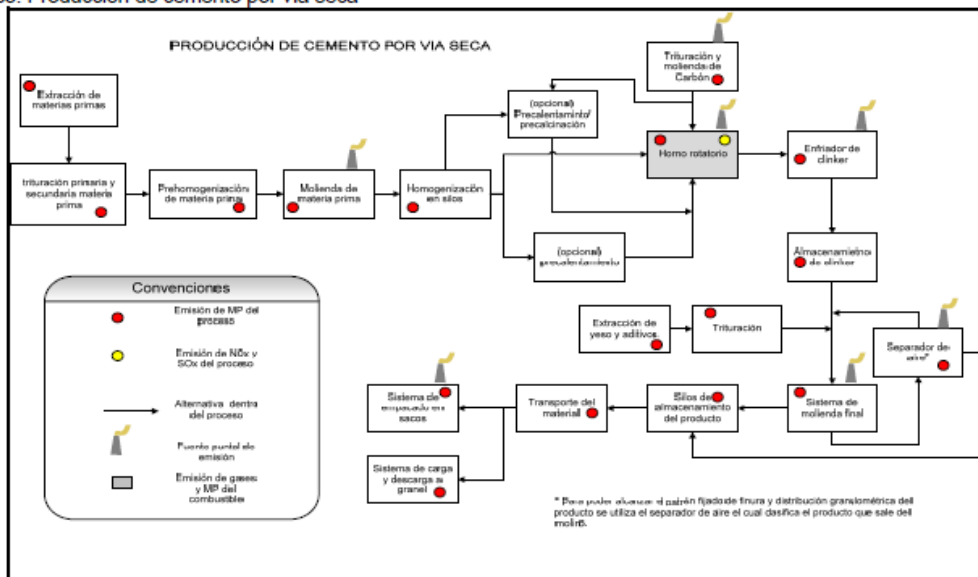
Concentración en cualquier momento		
PARÁMETRO REGULADO	Explotación en Tierra mg/Nm ²	ACTIVIDADES DE PROCESAMIENTO Y REFINACIÓN DE PETRÓLEO mg/Nm ²
Material Particulado (PM)	50	50
Compuestos Orgánicos Volátiles, incluyendo benceno (COV)	20	20
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	30	10
Óxidos de Azufre (para producción de petróleo) (SO _x)	1 000	---
Unidades de recuperación de azufre	---	150
Otras unidades	---	500
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	---	450
Usando gas como combustible	320 (o 86 ng/J)	
Usando petróleo como combustible	460 (o 130 ng/J)	
Níquel (Ni)		1
Vanadio (v)		5
Olor	No molesto en el punto receptor	

Leyenda:
mg/Nm³ miligramos/Normal metro cúbico (0°C y 1 atmósfera y base seca y 3% de exceso de oxígeno)
ng/J nanogramos/joule

Fuente: DS N°062-EM, 2010, pág. 4

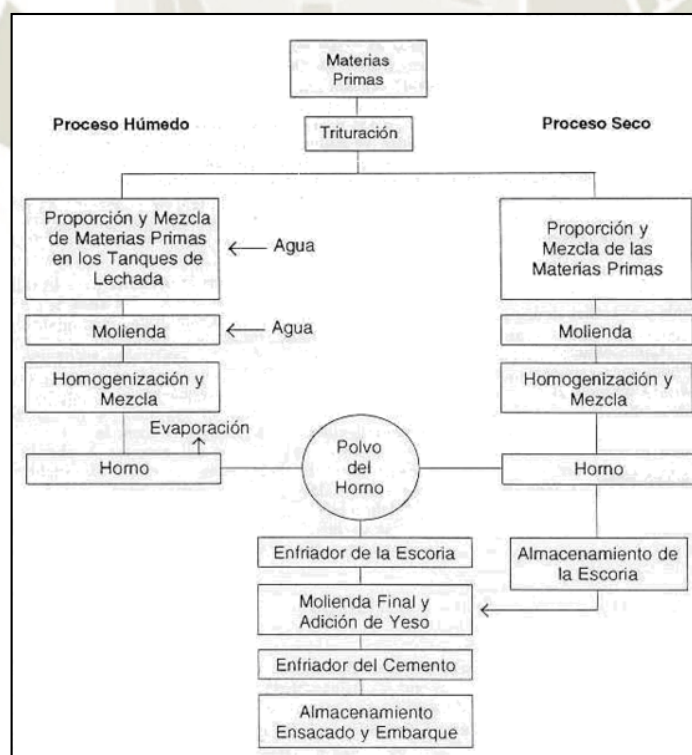
Anexo 4: Emisiones puntuales y dispersas dentro del proceso de fabricación de Clinker por las diferentes vías

Gráfico. Producción de cemento por vía seca



Fuente: Fernández & Hernández, 2008, pág. 115

Anexo 5: Procesos de una industria cementera



Fuente: Impacto ambiental de la minería de cemento, web: <https://quesaber.wordpress.com/httpwp-mepbkqt-f/>

Anexo 6: Factores de emisión en la industria del cemento.

Categoría	Contam.	Factor de Emisión (kg/ton Clínter Producido)	Fuente
Horno rotatorio seco con filtro de mangas (SCC 3-05-006-06)	MP	0,23	AP-42 de la EPA, Portland Cement Manufacturing, January 1995.
	MP10	0,193	
	MP2,5	0,103	
	SOX	0,54	
	NOX	2,1	
	CO	1,8	
	TOC	0,059	
	Plomo	10,8E-5	
	Arsénico	6E-6	
	Benceno	0,008	
	Tolueno	0,0001	
		CO2	900
	Hg	1,2E-5	Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de mercurio, PNUMA, 2005
	PCDD/PCDF	0,6E-12	Instrumental normalizado para la Identificación y Cuantificación de Liberaciones de Dioxinas y Furanos, PNUMA, 2005.

Fuente: CONAMA, 2009, pág. 38

Factores de emisión empleados en horno de cemento

Categoría	Contam.	Factor de Emisión (kg/ton Clínter Producido)	Categoría
Horno rotatorio seco con precipitador electrostático (SCC 3-05-006-22)	MP	0,5	AP-42 de la EPA, Portland Cement Manufacturing, January 1995.
	MP10	0,425	
	MP2,5	0,32	
	SOX	0,54	
	NOx	2,1	
	CO	1,8	
	TOC	0,059	
	Plomo	10,8E-5	
	Arsénico	6E-6	
	Benceno	0,008	
	Tolueno	0,0001	
Enfriadera con filtro de mangas (SCC 3-05-006-14)	CO2	900	Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.
	Hg	1,2E-5	Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de mercurio, PNUMA, 2005
	PCDD/PCDF	0,6E-12	Instrumental normalizado para la Identificación y Cuantificación de Liberaciones de Dioxinas y Furanos, PNUMA, 2005.
Enfriadera con precipitador electrostático (SCC 3-05-006-14)	MP	0,048	AP-42 de la EPA, Portland Cement Manufacturing, January 1995.
	MP	0,068	

Fuente: CONAMA, 2009, pág. 39

Factores de emisión empleados en industria del cemento

Categoría	Contam.	Factor de Emisión (kg/ton Material Procesado)	Categoría
Molienda de materia prima con filtro de mangas (SCC 3-05-006-13)	MP	0,0062	AP-42 de la EPA, Portland Cement Manufacturing, January 1995.
Transporte de materia prima en cinta transportadora con filtro de mangas (SCC 3-05-006-12)	MP	0,0016	
Tamizado de materia prima con filtro de mangas (SCC 3-05-006-11)	MP	0,00011	
Molienda de cemento con filtro de mangas (SCC 3-05-006-17)	MP	0,0042	

Fuente: CONAMA, 2009, pág. 40

Ejemplo de cálculo para emisiones estimadas en la producción de cemento.

Ejemplos de aplicación

Horno de clínker a carbón

Fuente: HORNO ROTATORIO CON TORRE DE PRECALCINACIÓN.

Marca: F.L SCHIDTH.

Modelo: FOLAX.

Combustible: CARBON.

Equipo control: PRECIPITADOR ELECTROSTATICO.

Producción anual declarada D.S. 138/2005 MINSAL: 793.360 t/año.

Dado que la fuente cuenta con precipitador electrostático como equipo de control de emisiones, la aplicación de la fórmula general es la siguiente:

$$E = (FE * 793.360 \text{ t/año}) / 1000, \text{ en t/año de emisión.}$$

Ecuación 5

Los factores de emisión empleados corresponden a los indicados en la Tabla 16, los resultados estimados son los siguientes:

TABLA 22
Emisiones estimadas horno t/año

Contaminante estimado	MP	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NO _x	VOC	SO _x	Hg
Emisión t/año	396,68	337,18	253,8	1428,05	1666,06	46,8	428,4	9,52E-3

Fuente: CONAMA, 2009, pág. 42

Anexo 8: Tamaño y área de placas recolectores.

En este punto se mostrará un procedimiento para calcular el SCA (área de colección efectiva) escrita en la ecuación (2.24), según referencia EPA.

Este procedimiento completo determina la SCA para PES grandes de placa – alambre, placa plana y tubulares secos. Este procedimiento no se aplica para los precipitadores de dos etapas o chicos porque éstos son paquetes modulares generalmente dimensionados y vendidos en base a la rapidez de flujo volumétrico del gas residual. Y también no es aplicable a PES húmedos. El procedimiento consiste en 15 pasos (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2002, págs. 3-26, 3-31)

Paso 1. Determinar la eficiencia de diseño, Eff (%). La eficiencia es el término más comúnmente utilizado en la industria y es el valor de referencia para las garantías. Sin embargo, si no ha sido especificada, puede calcularse como sigue:

$$n_c(\%) = 100 \left(1 - \frac{\text{carga de salida}}{\text{carga de entrada}} \right)$$

Paso 2. Calcular la inserción de diseño, p :

$$p = 1 - \left(\frac{n_c}{100} \right)$$

Paso 3. Calcular u obtener la temperatura de operación, T_k , (K). En los cálculos que siguen se requiere la temperatura en Kelvin.

Paso 4. Determinar si está o no presente corona invertida severa. Usualmente ocurre corona invertida severa para resistividades de polvo arriba de 2×10^{11} ohm-cm. Su presencia incrementará el tamaño del PES para alcanzar una cierta eficiencia.

Paso 5. Determinar el MMD de la distribución de partícula de entrada MMD_i (μm). Si éste no es conocido, suponga un valor de la tabla 13:

Paso 6. Suponer un valor para el escabullimiento, S_N , y para la reintroducción por golpeteo, RR , de tablas 14 y 15.

Tabla 1

Tamaño promedio de partículas

Fuente	MMD_i(mm)
Ceniza flotante de carbón bituminoso	16
Ceniza flotante de carbón bituminoso, de calderas tangencial	21
Ceniza flotante de carbón bituminoso, otros tipos de calderas	10 a 15
Horno de cemento	2 a 5
Planta de vidrio	1
Caldera de combustión de madera	5
Planta de sinterización,	50
Con precolector mecánico	6
Procesos de recuperación Kraft	2
Incineradores	15 a 30
Horno de Cobre reverberatio	1
Convertidor de cobre	1
Chimenea de planta de combustión de Coke	1
Desconocido	1

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 123

Tabla 2

Factor de escabullimiento

Tipo de PES	S_N
Planca – alambre	0.07
Pared Húmeda	0.05
Placa plana	0.10

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 123

Tabla 3

Factor de reintroducción

PES/Tipo de polvo	RR
Ceniza flotante de carbón, o desconocida.	0.14
Pared húmeda	0.0
Placa plana con velocidad de gas >1.5 m/s (ni vidrio ni cemento)	0.15
Vidrio o cemento	0.10

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 123

Paso 7. Suponer valores para los tamaños más , MMD_p , y tamaño de la humareda por golpeteo, MMD_r :

$$MMD_p = 2 \mu\text{m}$$

$$MMD_r = 5 \mu\text{m} \text{ para cenizas con } MMD_i > 5 \mu\text{m}$$

$$MMD_r = 3 \mu\text{m} \text{ para cenizas con } MMD_i < 5 \mu\text{m}$$

Dónde:

MMD_p : El MMD de la distribución de tamaños emergiendo de una zona de recolección muy eficiente.

MMD_r : El MMD de la distribución de tamaño del material golpeteado / reintroducido.

Paso 8. Usar los siguientes factores para aire puro:

$$\epsilon_0 = 8.845 \cdot 10^{-12} \quad \text{Permitividad del espacio libre} \quad [\text{C}^2/\text{Nm}^2]$$

$$\mu = 1.72 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_k}{273} \right)^{0.71} \quad \text{Viscosidad del gas} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right]$$

$$E_{bd} = 630000 \left(\frac{273}{T_k} \right)^{1.65} \quad \text{Campo eléctrico al centellar} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

$$LF = S_N + RR(1 - S_N) \quad \text{Factor de pérdida [adimensional]}$$

Para PESs de placa-alambre:

$$E_{avg} = E_{bd} \frac{5}{6.3} \quad \text{Campo promedio, sin corona invertida, polaridad positiva}$$

$$E_{avg} = 0.7 \cdot E_{bd} \frac{5}{6.3} \quad \text{Campo promedio, corona invertida severa, polaridad positiva}$$

Paso 9. Suponer el número más pequeño de secciones para el PES, n , tal que $LF^n < p$.

Los valores sugeridos para n son los de la tabla 16.

Tabla 4

Número de campos según eficiencia

Eficiencia (%)	<i>n</i>
< 96.5	2
<99	3
<99.8	4
<99.9	5
<99.9	6

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 125

Estos valores son para un LF de 0.185, correspondientes a un precipitador de cenizas flotantes de carbón. Los valores son aproximados, pero los mejores resultados son para el n más bajo permitido.

Paso 10. Calcular la inserción promedio de la sección, p :

$$p_s = p^n$$

Paso 11. Calcular la inserción de la sección de recolección, p_c :

$$p_c = \frac{p_s - LF}{1 - LF}$$

Si el valor de n es muy pequeño, entonces este valor será negativo y n tendrá que ser incrementado.

Paso 12. Calcular los factores de cambio de tamaño de partículas, D y MMD_{rp} los cuales son constantes utilizadas para computar el cambio del tamaño de partícula de sección en sección:

$$D = p_s + S_N + p_c(1 - S_N) + RR(1 - S_N)(1 - p_c)$$

$$MMD_{rp} = RR(1 - S_N)(1 - p_c) \frac{MMD_r}{D}$$

Paso 13. Calcular una tabla de tamaños de partículas para las secciones 1 a la n :

Tabla 5

Tamaño de partículas según el número de secciones

Sección	MMDs
1	MMD1 = MMD _i
2	MMD2 = {MMD1 x S _N + [1 - p _c] x MMD _p + p _c x MMD1} x p _d /D + MMD _{rp}
3	MMD3 = {MMD2 x S _N + [1 - p _c] x MMD _p + p _c x MMD2} x p _d /D + MMD _{rp}
⋮	⋮
⋮	⋮
n	MMDn = {MMDn-1 x S _N + [1 - p _c] x MMD _p + p _c x MMDn-1} x p _d /D + MMD _{rp}

Fuente: Fernandez, 2008, pág. 125

Paso 14. Calcular el SCA para las secciones 1 a la n, utilizando MMD_n, η, E_{avg}, y p_e:

$$SCA = - \left(\frac{n}{\varepsilon} \right) (1 - S_N) \frac{\ln(p_c)}{E_{avg}^2 \cdot MMD_1 \cdot 10^{-6}}$$

$$SCA = - \left(\frac{n}{\varepsilon} \right) (1 - S_N) \frac{\ln(p_c)}{E_{avg}^2 \cdot MMD_n \cdot 10^{-6}}$$

Donde el factor 10⁻⁶ convierte micras a metros. Hay que notar que la única cantidad que cambia en estas expresiones es MMD_x; por lo tanto, puede usarse la siguiente relación:

$$SCA_{n+1} = SCA_n \frac{MMD_n}{MMD_{n+1}}$$

Paso 15. Calcular el SCA total y el SCA en unidades Inglesas ESCA:

$$SCA \left(\frac{s}{m} \right) = \sum_{i=1}^n SCA_i$$

$$ESCA \left[\frac{ft^2}{kacfm} \right] = 5.080 \cdot SCA \left[\frac{s}{m} \right]$$

Este procedimiento para determinar tamaño trabaja mejor para valores p_c < LF, lo cual significa el valor más pequeño de n.

Cualquier modelo de PES es sensible a los valores del diámetro de partícula y del campo eléctrico. Este muestra la misma sensibilidad, pero las expresiones para el campo eléctrico están basadas en valores teóricos y experimentales.

El *SCA* no debe afectarse fuertemente por el número de secciones seleccionadas; si se usan más secciones, se reduce el *SCA* de cada sección (Fernandez, 2008, págs. 122-125).



Anexo 9: Velocidad de flujo.

La velocidad de flujo del gas que atraviesa los componentes principales tienen que estar diseñado para que esté de acuerdo a una eficiencia de colección alta. El área frontal de PES (ancho x altura), el área normal a la dirección del flujo del gas, debe seleccionarse para mantener bajas las velocidades del gas y para acomodar los requerimientos eléctricos (el espaciamiento alambre-placa), al tiempo que también asegura que se cumpla con los requerimientos de área total de placa (Fernandez, 2008, pág. 127).

Las placas pueden ser cortas en altura, largas en la dirección del flujo, con varias en paralelo (disminuyendo el ancho). O pueden ser grandes en altura, cortas en la dirección del flujo, con muchas en paralelo (ampliando el ancho). Después de seleccionar una configuración, la velocidad del gas puede obtenerse dividiendo la rapidez de flujo volumétrico, Q , por el área frontal del PES (Fernandez, 2008, pág. 127).

$$v_{gas} = \frac{Q}{B \cdot H}$$

Dónde:

v_{gas} : velocidad del gas [m/s]

B: anchura de la entrada del PES [m]

H: Altura de la entrada del PES [m]

Se observó que para aplicaciones de partículas con baja resistividad, son comunes velocidades de 3pie/s (0.92 m/s), y para cenizas flotantes es cerca de 5pie/s (1.5 m/s). Como se desarrolla velocidades no muy altas, asegura que la turbulencia no está fuertemente desarrollada, de modo que permite capturar más partículas.

Anexo 10: Cálculos de la caída de presión.

En los precipitadores electrostáticos la caída de presión no es muy alta, los rangos son contantes comparados con los colectores de magas tipo pulse jet que este su caída de presión es muy alta. En el PES las zonas en las cuales hay caída de presión muestran cuatro factores principales (Fernandez, 2008).

- Placa difusora (usualmente presente) – (placa perforada a la entrada)
- Transiciones a la entrada y salida del PES.
- Deflectores en las placas de recolección (refuerzos) o corrugados.
- Resistencia de la placa plana de recolección contra el flujo de gas.

Entonces la caída de presión es la suma de todas caídas de presión individuales, pero una de ellas llegara a contribuir una caída de presión más alta. Usualmente la caída de presión no afecta al diseño, pero se necesita que sea de un valor muy bajo. En la tabla 18, se proporciona caídas de presión típicas de los cuatro factores anteriores.

Tabla

Componentes de caída de presión.

COMPONENTE	CAÍDA DE PRESIÓN TÍPICA (Pa)		CAÍDA DE PRESIÓN TÍPICA (pulg. De H ₂ O)	
	BAJA	ALTA	BAJA	ALTA
Difusor	2.488	22.396	0.01	0.09
Transición de entrada	17.419	34.838	0.07	0.14
Transición de salida	1.742	3.733	0.007	0.15
Deflectores	0.149	30.607	0.0006	0.123
Placa de colección	0.075	1.991	0.0003	0.008
TOTAL	21.9	93.6	0.09	0.38

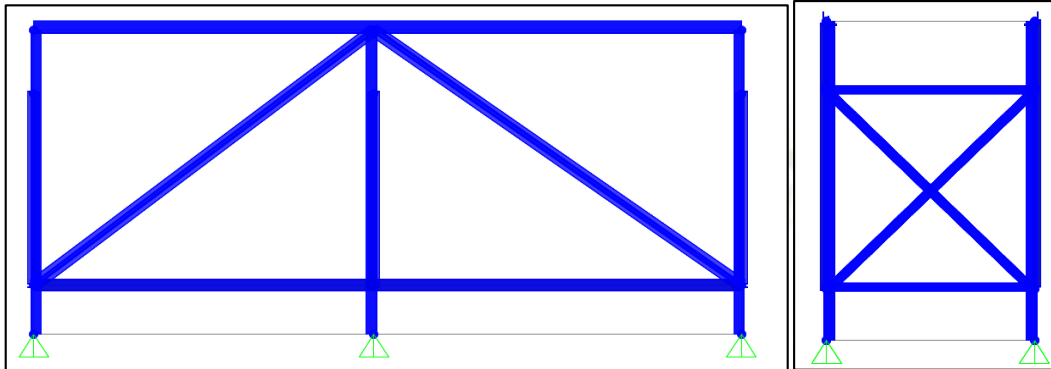
Fuente: Fernández, 2008, pág. 128

La caída de presión del PES, usualmente menos que cerca de 0.12 kPa (0.5 in.H₂O), es mucho más baja que para el sistema de recolección asociado y los conductos. Con las velocidades de transporte utilizadas para el polvo recolectado en los PESs, generalmente 1,220 m/min (4,000 pies/min) o mayores, las caídas de presión del sistema están usualmente en el rango de 0.5 a 2.5 kPa (2 a 10 in.H₂O), dependiendo de la longitud de los conductos y de la configuración, así como del (los) tipo(s) de dispositivo(s) de pre acondicionamiento utilizado(s) corriente arriba (Fernandez, 2008, pág. 128).

Anexo 11: Diseño de la estructura de soporte del precipitador electrostático.

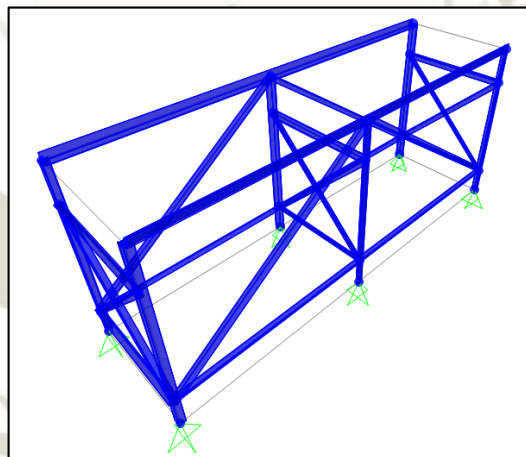
Diseño de la estructura de soporte del precipitador electrostático.

La estructura de soporte del precipitador se analizó con el programa de análisis estructural SAP2000, este diseño se realizará bajo la norma AISC-LRFD-93.



Vista Lateral

Vista Frontal



Vista Isometrica

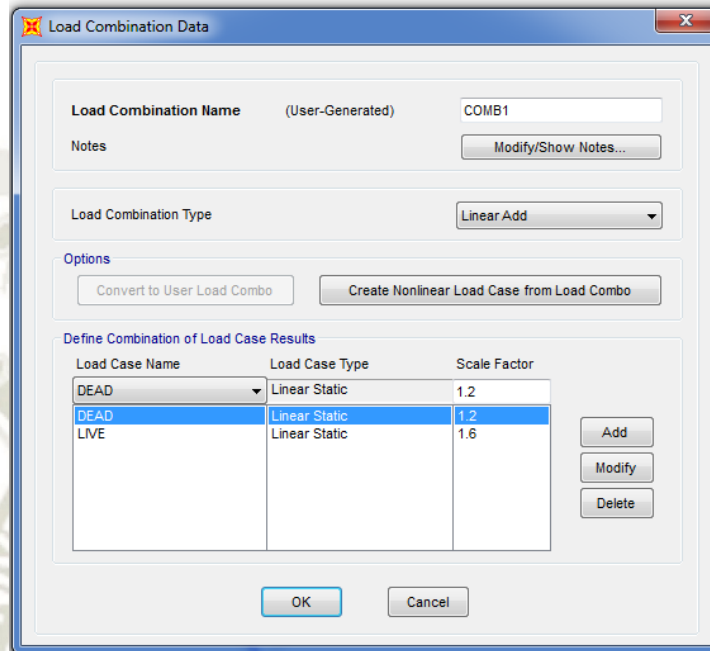
Propiedades del material.

Nombre:	ASTM A36
Acero Límite elástico:	2531 Kg/cm ²
Límite de tracción:	4077 Kg/cm ²
Módulo elástico:	2E+06 Kg/cm ²
Coefficiente de Poisson:	0.3
Densidad:	7850 kg/m ³
Módulo cortante:	7.84E+05 Kg/cm ²

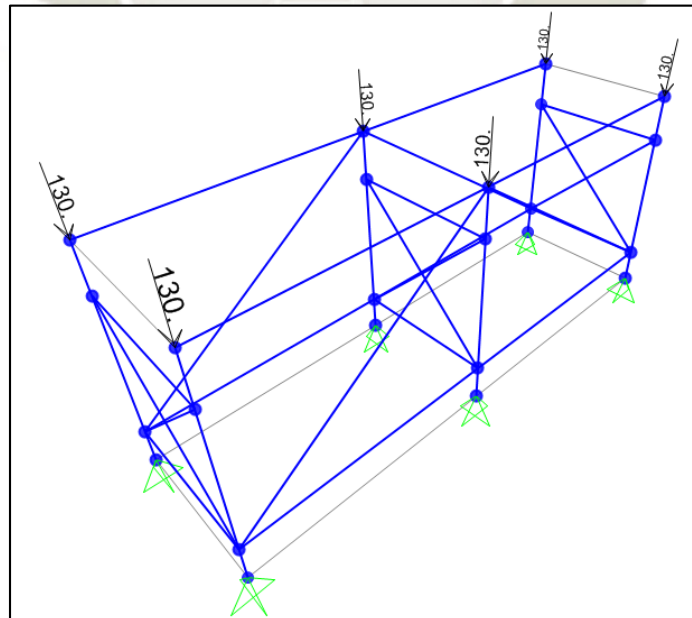
Combinaciones de carga.

Según la norma se selecciona la combinación de carga.

$$\text{COMB} = 1.2D + 1.6L$$

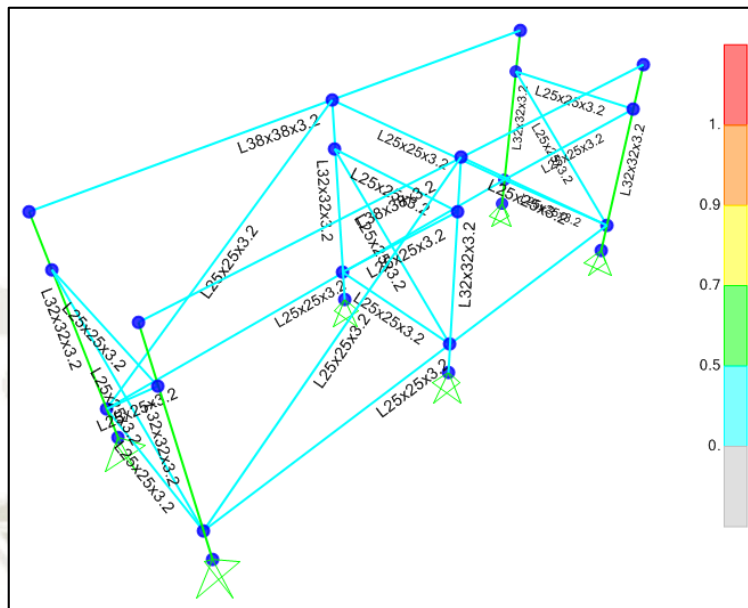


Se le asignó una carga de 780 kgf, en el análisis de la estructura, en donde se reparte por cargas puntuales de 130 kgf en los 6 puntos de la estructura.



Cargas

Resultados del análisis.



Ratios máximos

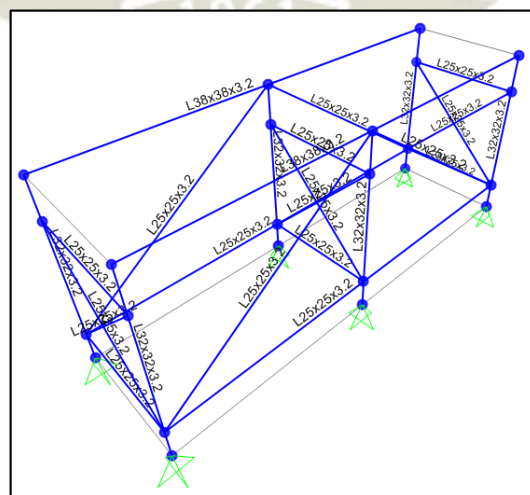
Del análisis de la estructura se determina que ningún elemento sobrepasa sus esfuerzos permisibles.

Perfiles seleccionados:

Angulo L38x38x3.2

Angulo L32x32x3.2

Angulo L25x25x3.2



Perfiles de la estructura

Análisis de resultados.

Esfuerzo máximo en el elemento

Elemento	Station	Combinación	Tipo	Esfuerzo (N/m ²)
3	0.148	DSTL1	Combination	-14596213.1

Esfuerzo máximo= 14596213.1 N/m² = 14.6 MPA

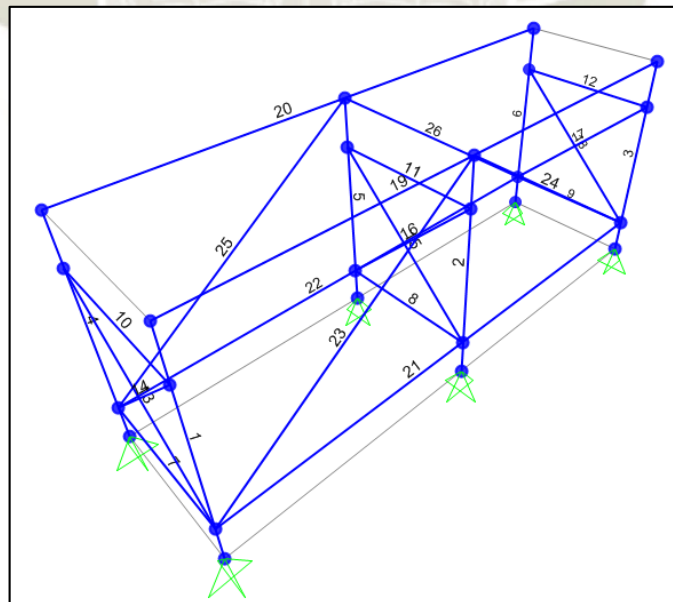
Esfuerzo de fluencia del acero A36 = 248 MPA

Fuerza máxima en el elemento a tracción = 302.1 N

Elemento	Distancia	Combinación	Tipo	Fuerza (N)
12	0	DSTL1	Combination	302.1
12	0.2975	DSTL1	Combination	302.1
12	0.595	DSTL1	Combination	302.1

Fuerza máxima en el elemento a Compresión = -2000.3 N

Elemento	Distancia	Combinación	Tipo	Fuerza (N)
1	0	DSTL1	Combination	-2000.3



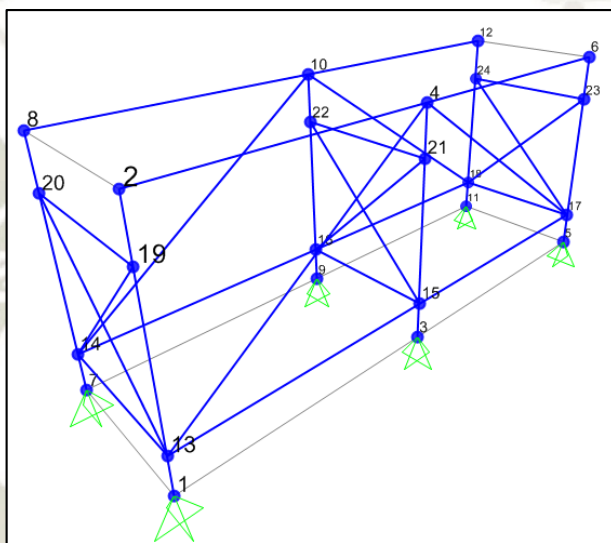
Elementos de la estructura

Fuerza en los elementos de unión

Elemento	Union	Caso	Tipo	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)
1	1	DSTL1	Combination	16	4.87	2000.3
1	13	DSTL1	Combination	-16	-4.87	-1997.24

Fuerza máxima en la unión 1 = 2000.3 N

Fuerza máxima en la unión 13= -1997.24 N



Puntos de unión de la estructura

Anexo 12: Unión por soldadura en la estructura.

Se usará el proceso SMAW en la construcción del equipo. En donde en la siguiente representación se verificará la longitud mínima del cordón de soldadura a usar.

$$P = 0.707 * W * L(0.75 * 0.6 * F_{EXX})$$

Donde:

P : Fuerza máxima en el elemento unión (lb)

W : Ancho de cordón de soldadura (in)

L : Longitud mínima del cordón de soldadura (in)

F_{EXX} : Resistencia del aporte de la soldadura (psi)

- La fuerza máxima en el elemento unión se calculó en el anexo 11, en donde fue 2000.3 N (449.62 lbf).
- El ancho de cordón se usará de 1/8" (3mm).
- Resistencia del aporte de soldadura es de 60000psi, en donde se utilizó un electrodo E6011.

$$449.62 = 0.707 * \frac{1}{8} * L(0.75 * 0.6 * 60000)$$

$$L = 0.189 \text{ in}$$

La longitud mínima en las uniones de la estructura será de 0.189 in (4.80 mm)

Anexo 13: Manual de la fuente de energía CX-300A

CXDZ www.aliexpress.com/store/1513045 CXDZ

Instructions

The main parameters:

Model	Input Voltage	Output Voltage	Output Current	Max Output Power	
CX-50TA	AC: 180V~250V (50/60Hz)	DC: 1KV~10KV	0mA~5mA	50W	<input type="checkbox"/>
CX-150A	AC: 180V~250V (50/60Hz)	DC: 2KV~15KV	0mA~10mA	100W	<input type="checkbox"/>
CX-300A	AC: 180V~250V (50/60Hz)	DC: 3KV~30KV	0mA~10mA	200W	<input checked="" type="checkbox"/>
CX-400A	AC: 180V~250V (50/60Hz)	DC: 5KV~40KV	0mA~10mA	400W	<input type="checkbox"/>

The diagram shows the front panel of the CX-300A power source. It includes a digital display at the top showing 'Output Voltage: 3.00KV', 'Output Current: 0.00mA', and 'Max Output Power: 200W'. Below the display are several control buttons: 'PRET', 'VOLT', 'Power Switch', 'OFF ON', 'L', 'H', and 'Input'. At the bottom, there are two large rotary knobs labeled 'Protecting regulatory knob' and 'voltage output regulatory knob'. On the left side, there are two LEDs: a red one labeled 'High voltage output LED(RED)' and a green one labeled 'Working LED(green)'. On the right side, there is an AC input socket labeled 'input with AC180V~260V' and a power switch labeled 'power switch'.

Fuente: CXDZ, 2018. Pág. 1

Manual de la fuente de energía CX-300A

CXDZ www.aliexpress.com/store/1513045 CXDZ

How to use the high voltage power supply

Step1

Positive output (red line) Negative output (black line)

Please make sure the high voltage output line is connected to a load, the red line and white line are the positive high voltage output, and the black line is the negative high voltage output.

Warning
The high voltage output must be connected to a load when the HV supply is working, otherwise it's High voltage transformer may be broken down with over voltage output.

Step1

Positive output line (red) Negative output line (black)

The Output Voltage between the positive output and the negative output are as follows:

Model	Output Voltage (V1)
CX-50TA	DC: $\pm 1KV \sim \pm 10KV$
CX-150A	DC: $\pm 2KV \sim \pm 15KV$
CX-300A	DC: $\pm 3KV \sim \pm 30KV$
CX-400A	DC: $+ 5KV \sim + 40KV$

Fuente: CXDZ, 2018. Pág. 2

Manual de la fuente de energía CX-300A

CXDZ www.aliexpress.com/store/1513045 CXDZ

Step1

Positive output line(red)

Negative output line(black/white)

Positive electrode

Negative electrode

discharge distance

The discharge distance between the positive electrode and the negative electrode are as follows:

Model	Discharge Distance
CX-50TA	< 2cm
CX-150A	< 3cm
CX-300A	< 4cm
CX-400A	< 5cm

Warning

If the discharge distance is over the parameters as required, the high voltage power supply may be broken!

It can be connected to the Ground or Case

Step2

power switch

Running state LED(Green)

press

input Line with AC180V~260V

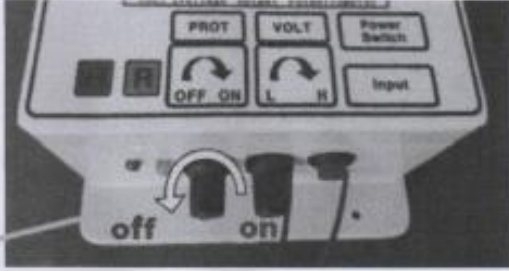
Please connect the input line with AC180V~260V and then press the power switch ,and the Running state LED (green) will be on.

Fuente: CXDZ, 2018. Pág. 3

Manual de la fuente de energía CX-300A

CXDZ www.aliexpress.com/store/1513045 CXDZ


Step3



Protecting regulatory knob

As you need the high voltage output continuously, so the preventing spark-over function should be shut down. Shut down the protecting function by turn the protecting regulatory knob to the left, Make sure the knob is turned to the end position.

Step4



voltage output regulatory knob

Change the output voltage by turning the voltage output regulatory knob :left is low voltage output and right is high voltage output.

Fuente: CXDZ, 2018. Pág. 4

Anexo 14: Aislamiento entre el electrodo, placa colectora y estructura.

Para aislar la estructura del voltaje aplicado al precipitador se usó un material aislante del tipo baquelita, el cual su resistencia dieléctrica es de:

Aprox: 24 kV/mm.

En donde el espesor de baquelita usado en nuestro equipo fue de 5mm. Entonces con este espesor su rigidez es de 100 kV/mm.

Esto nos garantiza el aislamiento de la estructura.

El aislamiento entre el electrodo y la placa colectora es muy importante, ya que ambos no deben unirse al montar los componentes.

- Trabajan aislado uno del otro.

Para eso se usó un aislamiento del tipo de poliamida. En donde su rigidez dieléctrica es aproximadamente de:

12 kV/mm

El cual se usa un espesor de poliamida de 15 mm. (180kV/mm)

En donde nos garantiza un aislamiento entre el electrodo y la placa colectora.



Fuente: Propia, 2018

Anexo 15: Modo de operación

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

1. Verificar que el espacio a trabajar esté libre de objetos que impide el funcionamiento del equipo y del operario.
2. Cerrar las cubiertas de vidrio en la entrada y salida del equipo.
3. Conectar el cable del polo positivo con el cable del electrodo.
4. Conectar el polo negativo en la placa colectora.
5. Instalar la fuente de energía en la toma de energía eléctrica de 220 Volt.
6. Pulsar el botón de color rojo (on) de la fuente de energía para observar el funcionamiento del equipo.
7. Regular el voltaje adecuado del equipo precipitador electrostático.
8. Apara apagar la fuente de energía, volver a pulsar el botón rojo (off) y el precipitador electrostático dejara de funcionar.



Fuente: Propia, 2018

Descarga del electrodo.

1. Una vez terminado de hacer funcionar el equipo. Descargar el electrodo, como:
 - a. Unir la pinza del polo negativo de la fuente de energía con la superficie del electrodo, para que este sea descargado totalmente. Ya que cuando el equipo deja de funcionar el electrodo aún sigue cargado de carga estática, por el cual necesita ser descargado.



Descarga del electrodo.

Fuente: Propia, 2018

Nota: Para trabajo real.

1. Cuando el equipo se instala en una planta industrial para empezar a trabajar, el precipitador electrostático necesitará de un pozo a tierra para descargar el electrodo antes de realizar el mantenimiento respectivo y también en la manipulación del equipo en el interior de la cámara. Se puede usar una pértiga para descargar el electrodo.



Fuente: Sandvik hx410, 2009.

2. La placa colectora también deberá estar conectada a puesta a tierra para evitar cargas estáticas durante el funcionamiento..

Anexo 16: Precipitador Electrostatico



Fuente: Propia, 2018

Precipitador Electrostatico



Fuente: Propia, 2018

Precipitador Electrostatico



Fuente: Propia, 2018

Precipitador Electrostatico



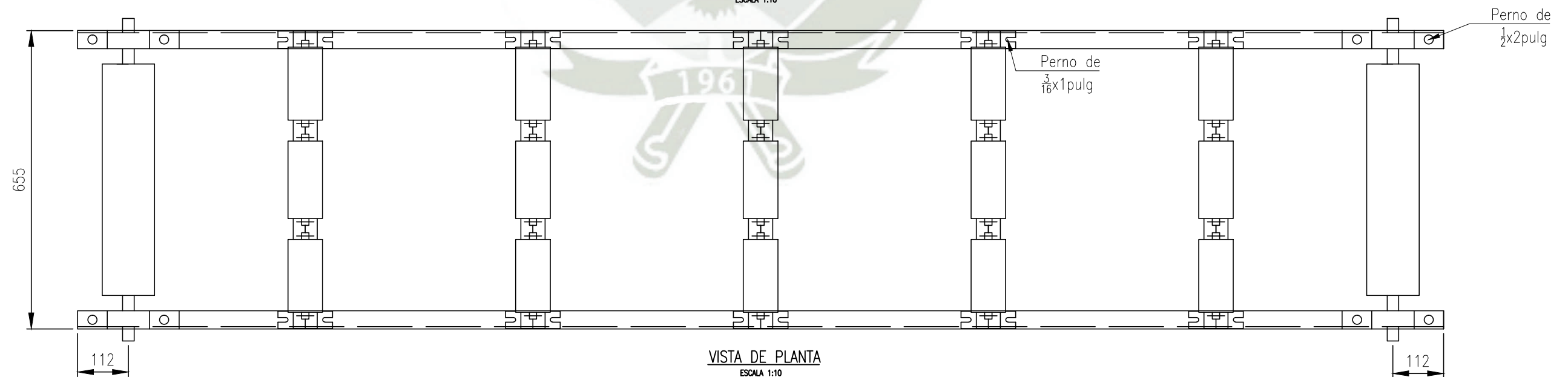
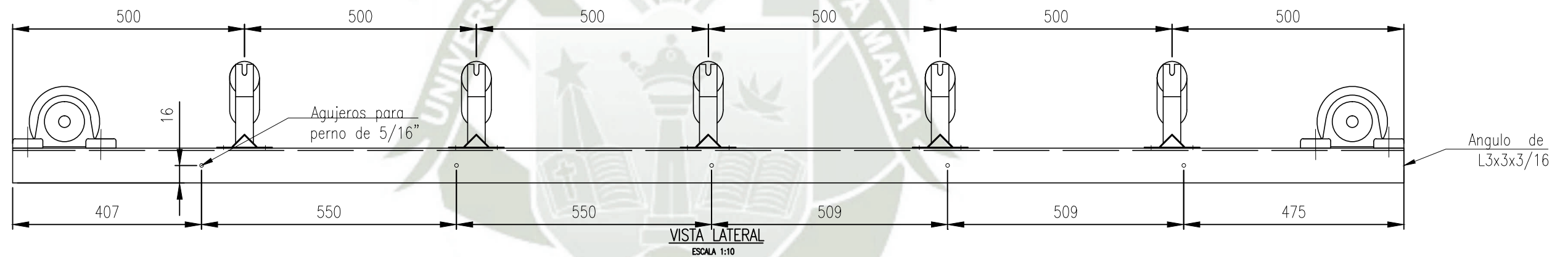
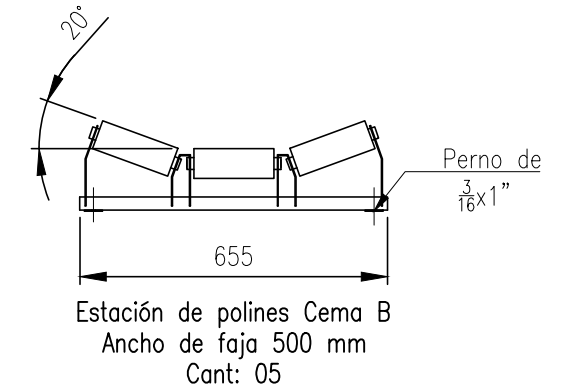
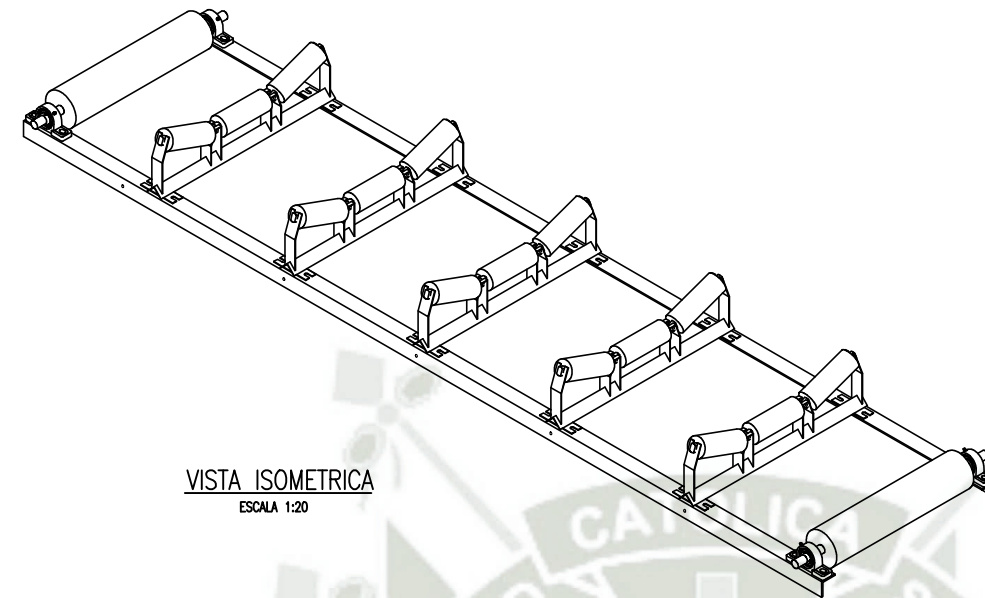
Fuente: Propia, 2018



PLANOS DE INGENIERÍA

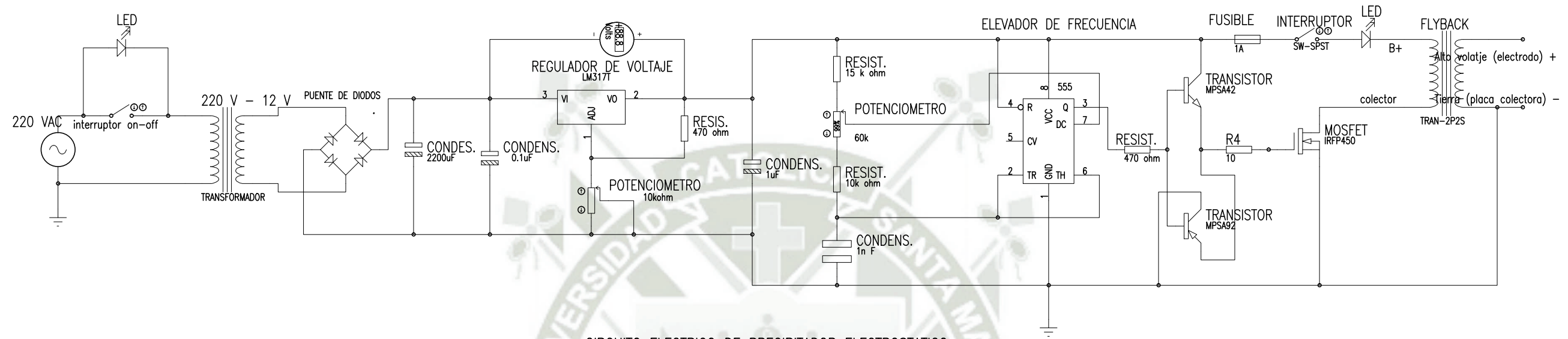
NOTAS:

1. TODAS LAS MEDIDAS SE ENCUENTRAN EN MILÍMETROS, SALVO INDICACIÓN CONTRARIA.
2. PARA REALIZAR LOS AGUJEROS EN DONDE SE UNIRÁ CADA COMPONENTE, RESTAR 1/16" DEL DIAMETRO DEL PERNO ESPECIFICADO EN EL ANGULO L3X3X16.
3. EL SIGUIENTE PLANO CORRESPONDE A UNA INGENIERÍA BÁSICA.



REV.	FECHA	DESCRIPCION	DIS. REV.	APROBADO	REV.	FECHA	DESCRIPCION	DIS. REV.	APROBADO	NUMERO DE PLANOS	REFERENCIA DE PLANOS	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA		APROBADO FECHA :	FECHA :	DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTATICO PARA EL CONTROL DE POLUCION EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA
												CONFIDENCIAL	DISEÑADO POR:	FECHA :	J.MAMANI	
												ESTE PLANO Y LA INFORMACION CONTENIDA EN EL, SON PROPIEDAD DE UCSM SU USO Y REPRODUCCION SIN AUTORIZACION PREVIA, ESTAN PROHIBIDOS.	DIBUJADO POR:	FECHA :	J.MAMANI	
												NUMERO DE PLANO ORIGINAL	REVISADO POR:	FECHA :	J.CASTRO	ESCALA
												FECHA	APROBADO POR:	FECHA :	J.DONAYRE	
												11/07/2019	JEFE DE PROYECTO:	FECHA :	--	NUMERO DE PLANO
												CLIENTE :	JEFE :	FECHA :	--	
												CLIENTE :	CLIENTE :	FECHA :	--	REV. A

CIRCUITO DE CONTROL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO 10KV



CIRCUITO ELECTRICO DE PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

ESCALA 1:16

COMPONENTES CIRCUITO DE CONTROL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO		
Item	DESCRIPTION	QUANTITY
1	Transformador de 220 VAC a 12 VAC	1
2	Puente de diodos	1
3	Condensador electrolitico de 2200 uF de 16 V	1
4	Interruptor on-off	1
5	LED testifo	1
6	Condensador de 0.1 uF de 50 V	1
7	Potenciometro de 10 k Ω	1
8	Resistencia de 470 Ω	1
9	Condensador de 1 uF de 50 V	1
10	Regulador de voltaje tipo LM317T	1
11	Minivoltmetro de 3 digitos digital	1
12	Resistencia de 1 k Ω	2
13	Potenciometro de 20 k Ω	1

Item	DESCRIPTION	QUANTITY
14	Potenciometro de 10 k Ω	1
15	Resistencia de 10k Ω	1
16	Condensador de 1nF	1
17	Circuito integrado 555	1
18	Resistencia de 330 Ω	1
19	Transistor 2N2222A	1
20	Condensador de 22nF	1
21	Resistencia de 100 Ω	1
22	Mosfet IRF540	1
23	Fusible de 5 A	1
24	Switch on-off	1
25	Regulador 7805	1
26	Led diodo	1
27	Flyback	1

REV.	FECHA	DESCRIPCION	DIS. REV.	APROBADO	REV.	FECHA	DESCRIPCION	DIS. REV.	APROBADO	NUMERO DE PLANOS	REFERENCIA DE PLANOS	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA		APROBADO FECHA	FECHA :	DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTATICO PARA EL CONTROL DE POLUCION EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA
												CONFIDENCIAL	REVISADO POR :	FECHA :	CIRCUITO ELECTRICO DE CONTROL DEL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO	
												ESTE PLANO Y LA INFORMACION CONTENIDA EN EL, SON PROPIEDAD DE UCSM SU USO Y REPRODUCCION SIN AUTORIZACION PREVIA, ESTAN PROHIBIDOS.	REVISADO POR :	FECHA :		
												NUMERO DE PLANO ORIGINAL PLANO_ORIGINAL	APROBADO POR :	FECHA :		ESCALA
												FECHA 11/07/2019	JEFE DE PROYECTO:	FECHA :	NUMERO DE PLANO	PES-007
												CLIENTE :	FECHA :	INDICADOS	REV. A	