



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

TÍTULO

Modelado de un sistema SCADA para la automatización de un separador de polímeros mediante el uso de triboelectricidad aplicado en el proceso del tratamiento de desechos sólidos en la provincia de Santa Elena

MODALIDAD

PROPUESTA TECNOLÓGICA

AUTOR

ARIEL ENRIQUE ROMÁN LAÍNEZ

DOCENTE TUTOR

Ing. RONALD HUMBERTO ROVIRA JURADO, Ph.D.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2024

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por el apoyo moral y la guía de mi tutor ante este nuevo desafío. Cada momento de adversidad que he podido sobre llevar en este largo camino hasta culminar este trabajo.

Ariel Enrique Román Láinez

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mi mamá, quien con esfuerzo y perseverancia durante años me sacó adelante. Un ejemplo de que la constancia siempre lleva al éxito.

Ariel Enrique Román Láinez

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ronald Humberto Rovira Jurado, hago constar que he revisado el trabajo de titulación titulado " **Modelado de un sistema SCADA para la automatización de un separador de polímeros mediante el uso de triboelectricidad aplicado en el proceso del tratamiento de desechos sólidos en la provincia de Santa Elena**" presentado por Ariel Enrique Román Laínez como requisito parcial para obtener el grado de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones. Después de una revisión exhaustiva, considero que el trabajo cumple con los estándares y requisitos establecidos para un proyecto de esta naturaleza. Por lo tanto, apruebo y recomiendo este trabajo de titulación para su evaluación y defensa ante el tribunal de grado.



Firmado electrónicamente por:
RONALD HUMBERTO
ROVIRA JURADO

Ing. Ronald Humberto Rovira Jurado, Ph.D.

TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Washington Torres Guin, Mgt.
Decano de la Facultad

Ing. José Sánchez Aquino, Mgt.
Director de la Carrera

Ing. Sendey Vera González, Mgt
Docente del Área



Firmado digitalmente por:
RONALD HUMBERTO
ROVIRA JURADO

Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph.D.
Docente Tutor

Ab. María Rivera González, Mgt
Secretaria General

Resumen

El objetivo de la investigación es analizar el comportamiento de la trayectoria de un polímero cargado en un campo electromagnético. Se analizaron las variables que afectan su comportamiento y se las relacionó en un modelo matemático.

Se realizaron pruebas con los valores de cada una de las variables mediante el simulador SCILAB. Mediante una serie de pruebas con cada una de las variables se obtuvo hasta un 99% de efectividad del proceso. Así mismo se diseñó un sistema SCADA del proceso de separación donde se relacionó las entradas y salidas del proceso mediante el programa Tia Portal v16.

Palabras claves: Triboelectricidad, polímeros, polaridad, electrodo, interfaz, proceso electrostático

Abstract

The objective of the research is to analyze the behavior of the trajectory of a charged polymer in an electromagnetic field. The variables that affect its behavior were analyzed and related in a mathematical model.

Tests were carried out with the values of each of the variables using the SCILAB simulator. Through a series of tests with each of the variables, a 99% effectiveness of the process was obtained. A SCADA system was also designed for the separation process where the inputs and outputs of the process were related by means of the Tia Portal v16 program.

Keywords: Triboelectricity, polymers, polarity, electrode, interface, electrostatic process.

DECLARACIÓN

El contenido del presente trabajo de graduación es de mi responsabilidad, el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Universidad Estatal Península de Santa Elena.



Ariel Enrique Román Láinez

Contenido general

Contenido

AGRADECIMIENTO	2
DEDICATORIA	3
APROBACIÓN DEL TUTOR	4
TRIBUNAL DE GRADO.....	5
Resumen.....	6
Abstract.....	7
Lista de anexos.....	5
Lista de abreviaturas	6
Capítulo 1.....	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Descripción del proyecto.....	3
1.3 Objetivos del proyecto	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Alcance del proyecto.....	6
1.6 Metodología	7
Capítulo 2.....	9
2.1 Marco contextual.....	9
2.1.2 Regulación del uso de plásticos en el Ecuador	11
2.1.3 Regulación del acondicionamiento de residuos plásticos	11
2.2 Marco conceptual	12

2.2.1	Características de los polímeros comerciales.....	12
2.2.2	Separación electrostática de materiales plásticos.....	15
2.2.3	Métodos de electrificación para separadores triboeléctricos.	16
2.2.4	Dispositivos pasivos de carga eléctrica.....	17
2.2.5	Dispositivos de carga eléctrica por tambor rotatorio	18
2.2.6	Dispositivos de carga eléctrica por lecho fluidizado.....	19
2.2.7	Descripción funcional del proceso de separación electrostática	20
Capítulo 3.....		27
3.1	Desarrollo y resultados.....	27
3.1.1	Modelo matemático	27
3.2	Simulación del modelo matemático.....	33
3.3	Solución numérica	36
3.4	Planteamiento de pruebas	41
3.5	Diseño de un sistema de monitoreo de separadores electrostáticos.....	49
3.6	Elementos del sistema de control.....	50
Capítulo 4.....		52
4.1	Sistema scada	52
4.1.1	Diseño P&id.....	52
4.1.2	Administración de usuarios	53
4.1.3	Interfaz de separación	55
4.1.4	Registros de datos	57
4.2	Resultados	58
4.3	Conclusión	60
Bibliografía		62

Índice de figuras

Figura 1. Producción relativa de plásticos por sector industrial.....	10
Figura 2. Producción relativa de plásticos por tipo	10
Figura 3. Clasificación de los termoplásticos y algunas aplicaciones.....	13
Figura 4. Propiedades eléctricas de los termoplásticos	14
Figura 5. Serie triboeléctrica	16
Figura 6. Esquema de un dispositivo de carga eléctrica pasiva.....	17
Figura 7. Dispositivo de carga eléctrica por tambor rotatorio.....	19
Figura 8. Dispositivo de carga por lecho fluidizado.....	20
Figura 9. Diagrama de procesos para la separación de plásticos granulados	21
Figura 10. Diagrama de procesos para la separación de plásticos granulados.....	22
Figura 11. Separador triboeléctrico EBS-T.....	23
Figura 12. Separador triboeléctrico HB1500.....	24
Figura 13. Separador triboeléctrico SG-3000.....	25
Figura 14. Tabla comparativa de separadores triboeléctricos	26
Figura 15. Ilustración para el cálculo del potencial eléctrico entre los electrodos.....	29
Figura 16 Diagrama de cuerpo libre de la partícula cargada.....	33
Figura 17 Esquema del modelo matemático-Scilab	35

Figura 18 Partícula negativa a 35kV	37
Figura 19 Partícula negativa a 70 kV	38
Figura 20 Partícula negativa con radio de 0.15 mm	39
Figura 21 Partícula positiva con carga de 11nQ.....	40
Figura 22 Tabla descriptiva de parámetros	41
Figura 23 Trayectoria - Caso 1.....	42
Figura 24 Trayectoria - Caso 2.....	43
Figura 25 Trayectoria - Caso 3.....	44
Figura 26 Trayectoria - Caso 4.....	45
Figura 27 Trayectoria - Caso 5.....	46
Figura 28 Trayectoria caso 6	47
Figura 29 a Tabla descriptiva de casos experimentales.....	48
Figura 29 b Tabla descriptiva de casos experimentales	48
Figura 30 Relación de compuertas lógicas del sistema SCADA	49
Figura 31 Diseño del sistema HDI	50
Figura 34 Interfaz principal de usuario	54
Figura 35 Ingreso de usuario	54
Figura 36 Advertencia de usuario incorrecto	55
Figura 37 Botones designados para cambio de interfaz	55

Figura 38 Interfaz de proceso de separación	56
Figura 39 Interfaz de registro de datos	57
Figura 40 Interfaz de registro de datos	58
Figura 32 Efectividad a 35 KV – 2.85 mm	59
Figura 33 Efectividad a 35 KV – 2.801 mm	60

Índice de tablas

AGRADECIMIENTO	2
DEDICATORIA	3
TRIBUNAL DE GRADO	5
Resumen	6
Abstract.....	7
Lista de anexos	5
Lista de abreviaturas.....	6
Capítulo 1	2
Capítulo 2	9
Tabla 1. Propiedades eléctricas de los termoplásticos.....	14
Capítulo 3	27
Capítulo 4	52
Bibliografía.....	62

Lista de anexos

Anexo 1. Presupuesto.

Anexo 2. Extracto de código.

Anexo 3. Resultado de la revisión del trabajo en la plataforma Urkund.

Lista de abreviaturas

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

HDPE: Polietileno de alta densidad

HMI: Human machine interfaz

Kg: Kilogramo

Kv: kilovoltios

LDPE: Polietileno de baja densidad

m: Metros

mA: Miliamperios

mm: Milímetros

nC: Nano coulomb

P&ID: Diagrama de tuberías e instrumentación

PA: Poliamida

PET: Tereftalato de polietileno

PLC: Controlador lógico programable

PMI: Instituto de manejo de proyectos

PP: Polipropileno

PS: Poliestireno

PVC: Policloruro de vinilo

SCADA: Supervisory control and data acquisition

Ton: Tonelada MA

Capítulo 1

Antecedentes

El incremento incesante de la población mundial impone un desafío a todos los sistemas de producción. La demanda de materias primas pronto llegará a situaciones críticas. Los bosques, canteras y minas experimentan una sobreexplotación, marcada desde finales de la segunda guerra mundial. La aparición de los materiales plásticos como sustituto de los recursos naturales despertó interés en la industria debido a las múltiples ventajas que presentan. Entre sus características se destacan la facilidad de transformación en productos terminados, el bajo costo de producción y su baja densidad. Esta última característica tiene un efecto en el ahorro de energía, por ejemplo, en la industria de automóviles. Por lo tanto, el desarrollo y uso de plásticos es de importancia fundamental en la economía nacional. Sin embargo, el uso de materiales plásticos no está exento de consecuencias.

La principal desventaja de los plásticos es que el medio ambiente no los asimila. En consecuencia, la permanencia de desechos plásticos constituye una grave amenaza para los ecosistemas. Los esfuerzos de investigación para contrarrestar esta amenaza están orientados en dos direcciones: el desarrollo de bioplásticos y el desarrollo de métodos para su reciclaje.

Entre los métodos de reciclaje de plásticos es de interés el reciclado químico. En este proceso los desechos se descomponen en compuestos de bajo peso molecular. Una de las potenciales aplicaciones del reciclaje químico es la producción de combustibles. Sin embargo, por ahora representan un peligro de toxicidad y son muy demandantes en consumo de energía.

El método de reciclaje más usado es la fundición de los desechos para su posterior extrusión o inyección de productos finales. En este método se pueden fundir materiales plásticos de propiedades mecánicas disímiles. Un ejemplo de tal aplicación es la inyección de tinas para lavar ropa. Sin embargo, las propiedades mecánicas de tales mezclas son deficientes y, por lo tanto, una de las tareas por resolver en el reciclaje de plásticos es la optimización de los procesos de separación.

Los métodos de separación existentes de los diferentes plásticos se basan en ciertas propiedades mecánicas, ópticas y eléctricas. Entre las propiedades mecánicas se resalta la diferencia de densidades que se usa en la separación por flotación. Las propiedades ópticas se aprovechan en sistemas de separación de visión por computadora. Sin embargo, estos métodos por ahora no son eficientes a gran escala.

Una alternativa prometedora para la separación de plásticos se basa en la carga triboeléctrica que consiste en separar partículas de propiedades eléctricas diferentes mediante la acción de campos eléctricos. Una de las ventajas del proceso seco de separación electrostática es la contaminación reducida de las fuentes de agua. Además, tiene un bajo consumo energético. Sin embargo, el proceso de separación se puede ver afectado por las condiciones y variaciones de los parámetros controlados en el proceso. Por este motivo es necesario estudiar las estrategias de automatización para el control del proceso.

Descripción del proyecto

El diseño de esta propuesta se realizó en base al proyecto de investigación “Simulación por computador del proceso de separación de dieléctricos” del grupo de investigación Tecnología, Ciencia y Educación (TECED) de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena UPSE codificado con el número: INCYT-PNF-2019-S72-121. El objetivo principal de este

proyecto es identificar y optimizar los procesos de automatización que se utilizan en la separación de desechos plásticos mediante el uso del fenómeno triboeléctrico. Para este fin se realizará una descripción de las etapas del proceso de separación, se identificará las variables que rigen los procesos de cada etapa, se analizará las ecuaciones que describen el comportamiento del campo eléctrico en el separador, así como también las ecuaciones de movimiento de las partículas a separar. Finalmente se diseñará un sistema SCADA que brinde información estadística de los resultados a partir de los valores referenciales que se tienen acerca de la humedad, diferencia de potencial de los electrodos, tiempo de carga, tamaño de los gránulos de polímeros y demás factores que afectan el resultado.

Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

Modelar el proceso de automatización de un separador triboeléctrico de polímeros para optimizar el proceso de reciclaje de plásticos granulados mediante la construcción de un modelo matemático desarrollado en Scilab y el esquema funcional desarrollado en Tia portal

1.3.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar un modelo matemático en Scilab para describir la intensidad del campo eléctrico y la trayectoria de la partícula, así mismo, como su correlación con la efectividad en el proceso de separación.
2. Analizar las condiciones externas (humedad, conductividad, ionización del aire, etc.) que afectan el proceso de separación mediante el modelo matemático para su control.

3. Desarrollar un sistema SCADA a partir del modelo esquemático para controlar y evaluar los procesos de separación
4. Simular el esquema funcional de los procesos mediante Tia portal para definir los elementos constitutivos del proceso de separación.
5. Afinar los datos iniciales de cada proceso para optimizar la eficiencia del sistema

Justificación

El incesante crecimiento poblacional y los hábitos de consumo dentro del país han desencadenado una serie de problemas sociales y ecológicos. Según el censo del 2010 se generaba alrededor de 4.101.875 toneladas de desechos anualmente se estimó un crecimiento de alrededor de 1.083.226 para el año 2021, es decir, dentro del país anualmente existe para la presente fecha alrededor de 5.183.226 toneladas de desechos sólidos. Según el informe del proyecto (ambiente, 2019), la gestión que se necesita para el tratamiento de estos desperdicios carece de un enfoque económico, investigativo y ambiental. Por lo cual no es posible su reintegración en procesos circulares generando que requieran de estos como materia prima.

En la actualidad en la provincia de Santa Elena el manejo de basura constituye un problema acuciante que requiere esfuerzos mancomunados para su solución. De acuerdo a un estudio del Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos PNGIDS en la provincia de Santa Elena se generan en conjunto 178,91 toneladas de residuos al día, de las cuales el 14.5% corresponde a desechos plásticos (ambiente, 2019). Evidentemente, la creación de estaciones de reciclaje de estos desechos tendría un impacto positivo en la calidad de vida de los habitantes de la provincia.

En la actualidad dentro de la provincia de Santa Elena se cuenta con tres depósitos de basura que son las encargadas del manejo de desechos que se producen en cada uno de los cantones. Cada uno de estos cuenta con el mismo método para tratar con los desperdicios que genera cada cantón. Este método consiste en elaborar fosas donde se depositan los desechos para que mediante las condiciones del lugar se desintegren. El uso de este método para el tratamiento de desperdicios es consecuencia de no contar con alternativas para el aprovechamiento de estos y como consecuencia solo se tiene una afectación directa en las propiedades del suelo. Para este fin se debe atender a todas las fases del tratamiento de desechos sólidos. El presente trabajo se enfoca en el diseño y modelado de un sistema SCADA para la automatización del proceso de separación electrostática de residuos plásticos granulados.

Alcance del proyecto

En esta propuesta se plantea modelar un sistema automático de separación de polímeros. En este método de separación se involucran diferentes procesos, sin embargo, en el trabajo se hará énfasis en el proceso de clasificación. Dentro del proceso de clasificación se generará un modelado matemático que permitirá predecir la trayectoria de la partícula del polímero, obteniendo así en porcentajes la eficiencia del proceso.

La investigación está enfocada en la etapa final, es decir la etapa de separación, al tratarse de un sistema de lazo abierto se empezará con el esquema funcional de los procesos previos a la etapa de clasificación. A partir de esta generar una simulación que estará segmentada en dos partes: modelado matemático y esquema funcional. Se presentará una simulación del modelado matemático que nos faculta a manipular los datos iniciales de los procesos, tales como: intensidad del campo eléctrico, valor de carga de la partícula, tamaño de la partícula, velocidad de la banda transportadora, etc. (Thami

Zeghloul, 2016) Por otra parte, la simulación del esquema funcional contará con los procesos involucrados en la separación de los polímeros, a su vez, esta indicará la maquinaria a utilizar para en cada una de las etapas. Así mismo, se presentará una simulación con el sistema SCADA de los procesos y su vinculación entre sí y el resultado obtenido mediante la etapa de clasificación.

Metodología

En el desarrollo de esta propuesta primeramente se realizará la revisión de fuentes bibliográficas relacionadas a cada una de las etapas involucradas en el tema abordado. Los temas revisados servirán de referencia para facilitar la comprensión de conceptos, métodos de desarrollo y datos relacionados con la misma. Seguidamente, se describirán los procesos mediante esquemas organizacionales sugeridos por el Instituto de manejo de proyectos (PMI).

Para el modelado matemático se realizará un análisis interpretativo de las ecuaciones de Maxwell. Estas describen el comportamiento y la intensidad de un campo eléctrico, así mismo, nos permitirían identificar el valor del campo eléctrico generado por el electrodo en cada punto del proceso de clasificación. Relacionando el comportamiento entre el electrodo y la trayectoria de la partícula del polímero. (Yufei Qin, 2021)

El análisis y la interpretación del modelo matemático se desarrollarán mediante el uso del software Scilab, el cual facilita la manipulación de las ecuaciones establecidas, así mismo, permite establecer las tablas de valores que mediante gráficas describen la factibilidad del proceso en relación a los valores iniciales de cada etapa.

Finalmente, la simulación del diseño del sistema SCADA se hará uso del software Tia portal para representar el esquema funcional. Es decir, mediante la programación de este software generar la configuración de un controlador lógico programable (PLC). Este a su vez controlaría la maquinaria a utilizar en cada proceso como: electrodos, cortadora, bandas transportadoras, motores para tambor de carga y otros equipos. (AVM Silveira, 2017) De igual manera a través del controlador se obtendrá los valores de las variables del sistema para la automatización de los procesos.

Se obtiene como resultado de esta investigación un modelado estructurado que nos permite tener una referencia de los posibles resultados de este método de separación. Esto con la finalidad de poder plantear una solución mucho más factible, que la separación manual, para la separación de desechos sólidos.

Capítulo 2

2.1 Marco contextual

2.1.1 Los residuos plásticos

El término "contaminación plástica" se refiere al fenómeno en el que hay una acumulación excesiva en el entorno natural de materiales que están hechos de plástico o derivados del plástico. Según el informe sobre contaminación plástica (Solis, 2022), anualmente se produce un aproximado de 270 millones de toneladas de plástico en todo el mundo. Este plástico, tarde o temprano, se convertirá en desecho que se eliminará de manera que tendrá un impacto directo en el medio ambiente. En el peor de los escenarios, la tasa de emisiones de plástico por persona por día alcanzó 0.48 kilogramos en el año 2015. Ecuador no es una excepción; sin embargo, el valor de esta tasa es significativamente menor y constituye solo 0.15.

Como se muestra en la figura 2.1, las actividades económicas que más utilizan productos plásticos son el comercio de bienes que vienen en envases plásticos, la construcción de estructuras y la industria textil. La vida útil de los productos tiene un impacto significativo en la cantidad de residuos producidos. Por ejemplo, la vida útil de los envases es de solo unos meses a diferencia del uso del plástico en el transporte y la construcción, donde la vida útil oscila entre los 6 y los 35 años. Por lo tanto, la principal fuente de residuos plásticos proviene de la industria.

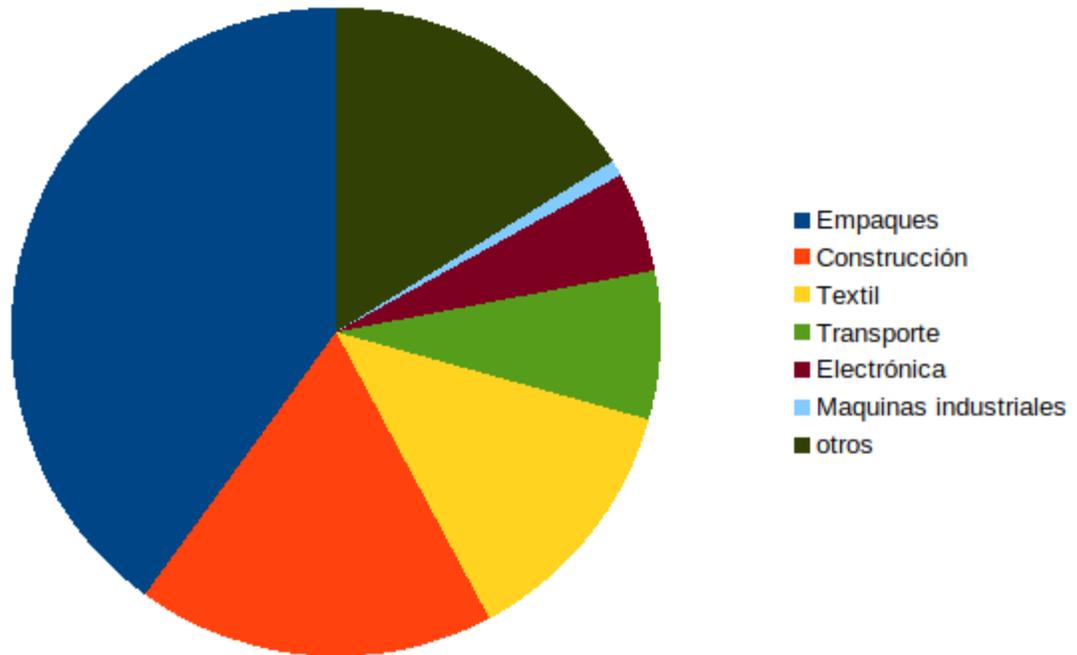


Figura 1. Producción relativa de plásticos por sector industrial

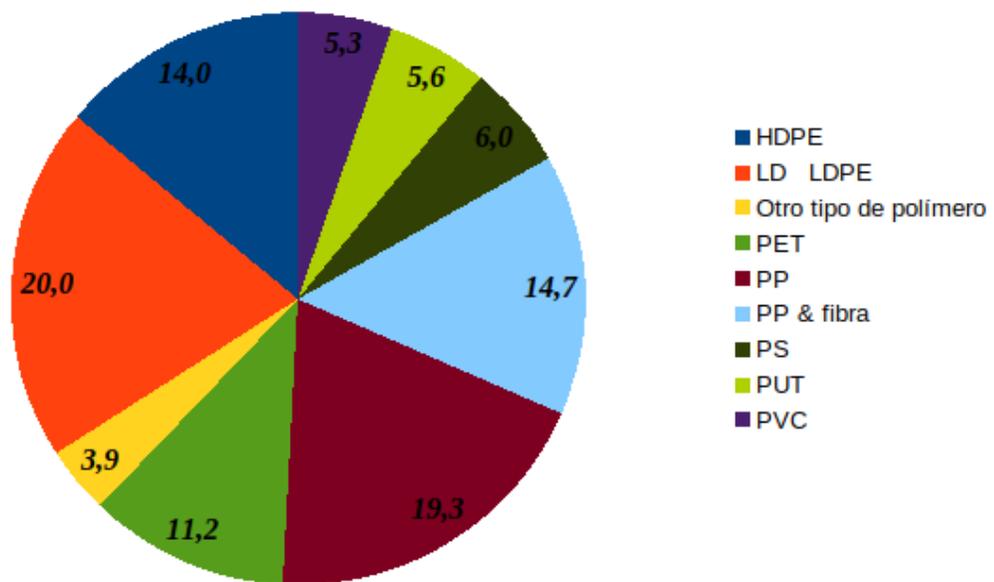


Figura 2. Producción relativa de plásticos por tipo

2.1.2 Regulación del uso de plásticos en el Ecuador

En nuestro país, la ley orgánica para la racionalización, reutilización y reducción de plásticos de uso único se publicó el 21 de diciembre de 2020. Esta ley prohíbe las bolsas de plástico y los sorbetes en áreas protegidas. Además, prohíbe el marketing y el uso de bolsas y contenedores de un solo uso. (Barrezueta, 2020)

La ley también regula la composición de las mezclas de los objetos plásticos fabricados. En el caso de las bolsas plásticas de un solo uso, estas deben tener hasta un 60% de material reciclado. Los recipientes de poliestireno expandido deben contener hasta un 18%. Mientras que los cubiertos, tarrinas y vasos deberán contar con un 30% de material reciclado.

2.1.3 Regulación del acondicionamiento de residuos plásticos

Los títulos 5 y 6 del documento titulado “Políticas para la Gestión Integral de Plásticos en el Ecuador”, que fue publicado en el registro oficial 218 del país, establecen las normas que rigen el acondicionamiento y reutilización de los residuos plásticos. (Núñez, 2014)

El artículo 18 de esta ley establece que se deben promover programas de selección y reducción de residuos plásticos a nivel de jurisdicción y competencia municipal; y a nivel industrial, un control del ciclo de vida de los productos plásticos y una reducción de su impacto negativo en el medio ambiente. Ambas responsabilidades caen bajo el nivel municipal.

Sumado a esto, el artículo 16 establece que tanto los consumidores como los generadores de residuos plásticos están obligados a realizar las acciones previas de separación en la fuente, así como de recolección o entrega selectiva. La ley también

estipula que en los procesos de reciclaje debe considerarse la viabilidad económica, técnica, legal y ambiental, la obtención de productos que permitan un desempeño adecuado, seguro y sano.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Características de los polímeros comerciales

La palabra "polímero" proviene de dos palabras griegas: "poli" significa "muchos" y "meros" significa "partes" o "enlaces". Podemos decir que todos los plásticos son polímeros, pero no todos los polímeros son plásticos. Existen muchos otros polímeros además de los plásticos (gomas, biopolímeros, polímeros inorgánicos, etc.). Los plásticos se pueden diferenciar por su comportamiento bajo carga, así como por sus propiedades reológicas y cómo actúan cuando se funden.

Según sus propiedades, los polímeros se dividen típicamente en tres categorías: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

A altas temperaturas, los polímeros termoplásticos se reblandecen y a bajas temperaturas se endurecen. Por lo tanto, se pueden volver a fundir y cambiar sin afectar las propiedades mecánicas del material. Podemos enumerar el polietileno, el polipropileno, el poliestireno y la poliamida como termoplásticos.

A diferencia de los termoplásticos, los polímeros termo estables son sustancias que permanecen permanentemente sólidas después de un solo curado. Durante el proceso de curado, los polímeros dentro del material se entrecruzan para formar un enlace irrompible e irreversible. Esto significa que los termoestables no se derretirán a

temperaturas extremadamente altas y por lo tanto, no son reciclables. Los materiales epóxicos, el poliuretano y las resinas fenólicas son ejemplos típicos de polímeros termoestables.

Los polímeros altamente elásticos se conocen como elastómeros. Por ejemplo, el caucho forma parte de esta familia de polímeros. Los elastómeros insaturados y los elastómeros saturados son las dos categorías principales de elastómeros. Los elastómeros son útiles en la producción de neumáticos, en la fabricación de prótesis médicas, entre otras aplicaciones.

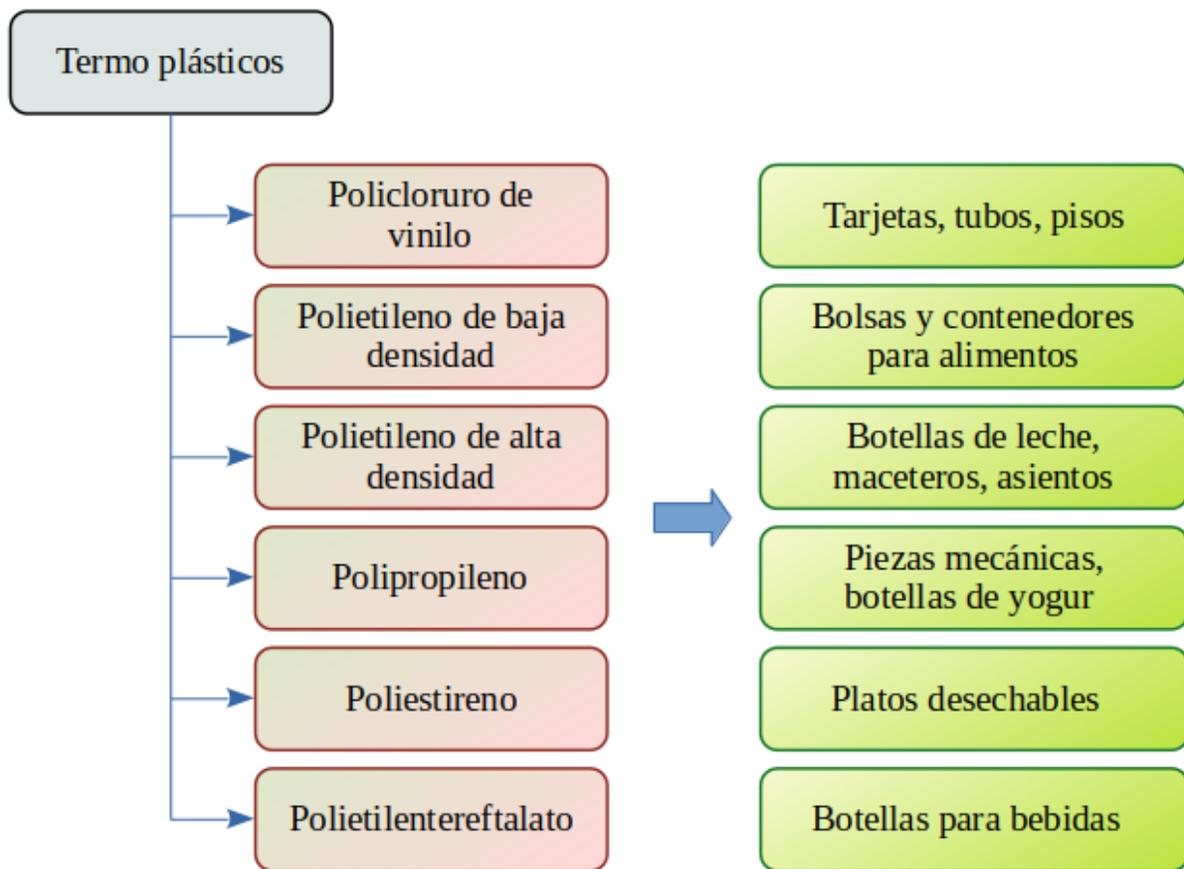


Figura 3. Clasificación de los termoplásticos y algunas aplicaciones

Los polímeros tienen una amplia gama de propiedades, incluidas las propiedades químicas y físicas, las propiedades mecánicas y térmicas, las propiedades ópticas y eléctricas, etc. Debido a los aditivos, refuerzos, requisitos de calidad diferentes y otros factores, la mayoría de las propiedades pueden variar mucho. La composición exacta del material, que determina sus propiedades, es el “know-how” del fabricante. Entre las propiedades eléctricas de los polímeros se tiene las siguientes (cuadro 2.1):

- la resistividad superficial y volumétrica,
- la constante dieléctrica y
- la rigidez dieléctrica.

Material	Resistividad volumetrica [Ω.cm]	Rigidez dielectrica [V.mm]x10 ⁴	Constante dielectrica
PET	$> 10^{13}$	5	3.4 - 3.7
HDPE	6×10^{15}	2.1 - 3.5	2.2 - 2.4
LDPE	6×10^{15}	1.9 - 3.5	2.2 - 2.4
PP	$> 10^{16}$	2.3 - 2.5	2.1 - 2.6
PVC	2×10^{14}	1.2 - 2.0	2.7 - 3.9

Tabla 1. Propiedades eléctricas de los termoplásticos

2.2.2 Separación electrostática de materiales plásticos

El término "separación electrostática" se refiere a una amplia clase de tecnologías que se utilizan con frecuencia para separar mezclas granulares debido a las fuerzas eléctricas que actúan sobre los gránulos cargados o polarizados. En 1879, Theodore B. Osborne ideó un sistema de clasificación para separar la paja del grano molido.

Las técnicas de separación electrostática aprovechan las diferencias de conductividad eléctrica de las partículas cargadas y la aparición de cargas positivas o negativas en su superficie. En los separadores electrostáticos tradicionales, las partículas son golpeadas con iones producidos por un electrodo conectado a un potencial muy alto (15 a 30 kV). Cuando estas partículas cargadas entran en contacto con un tambor conectado a tierra, se alejan a diferentes velocidades dependiendo de qué tan bien conduzcan la electricidad.

En los separadores triboeléctricos, las partículas se cargan a través de una fricción intensa. En este proceso algunas partículas se cargan positivamente y otras negativamente. Esta técnica permite clasificar preferentemente mezclas binarias de partículas. Los separadores triboeléctricos se usan casi exclusivamente para la clasificación de plásticos (como HDPE/PP, PET/PVC, PVC/caucho, PP/PS, ABS/PMMA, HIPS/ABX y mezclas de PVC/PE, entre otros).

Los separadores triboeléctricos se basan en el efecto del mismo nombre. La palabra triboelectricidad proviene del griego *tríbos* que significa fricción. El efecto consiste en la aparición de cargas eléctricas durante el rozamiento mutuo de dos dieléctricos, semiconductores o metales de diferente composición química o de la misma composición, pero de diferente densidad.

El efecto triboeléctrico presenta las siguientes regularidades:

1. Cuando se frota dos cuerpos químicamente idénticos, el más denso de ellos adquiere carga positiva.
2. Cuando se frota un metal contra un dieléctrico, el metal se puede electrificar tanto positiva como negativamente.
3. Cuando se frota dos dieléctricos, el dieléctrico con permitividad más alta se carga positivamente.
4. La electrificación de los cuerpos en fricción es mayor cuanto mayor es su superficie.

Los cuerpos se pueden disponer en filas, llamadas series triboeléctricas, en las que el cuerpo anterior se electrifica positivamente y el siguiente negativamente.

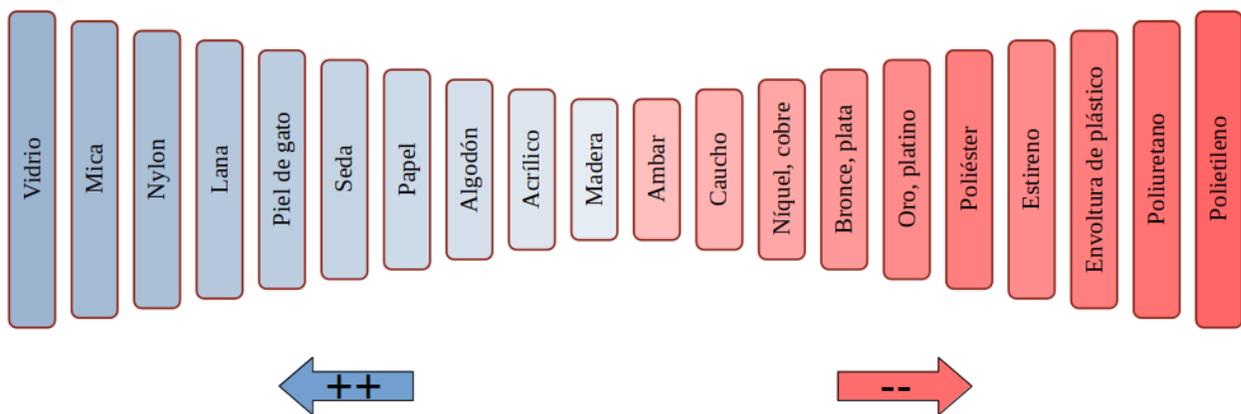


Figura 5. Serie triboeléctrica

2.2.3 Métodos de electrificación para separadores triboeléctricos.

Los dispositivos de carga eléctrica más comunes mencionados en los artículos acerca de separación de residuos plásticos por triboelectricidad son los dispositivos pasivos de carga eléctrica, ventiladores, cilindros rotatorios, lechos fluidizados y los

microciclones. Una comparación experimental de estos dispositivos se puede encontrar en el trabajo de Zemat [10].

2.2.4 Dispositivos pasivos de carga eléctrica

Los dispositivos de carga eléctrica pasiva son contenedores con varias superficies aislantes planas e inclinadas sobre las que se deslizan los gránulos de plástico por acción de la gravedad, como se muestra en la figura 2.5. Los gránulos adquieren carga eléctrica al frotarse unos contra otros durante la caída de un plato a otro. Los parámetros de calibración de este aparato son el número de platos y su inclinación.

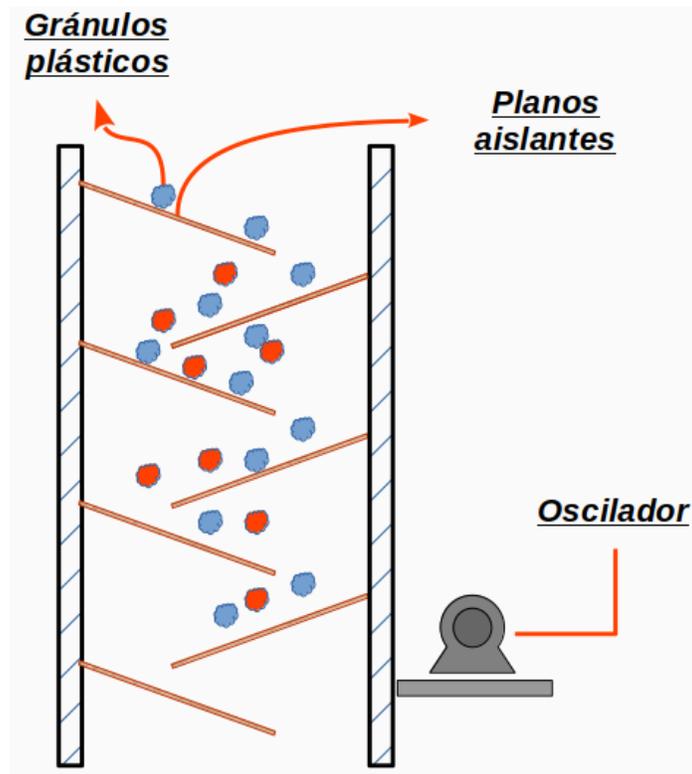


Figura 6. Esquema de un dispositivo de carga eléctrica pasiva

Entre las ventajas de este dispositivo se encuentran la sencillez de construcción y la alimentación continua de la operación. Además, las placas se pueden recubrir con diferentes materiales de tal forma que el dispositivo permite cargar positivamente un tipo de partícula y negativamente el otro. Una de las desventajas del proceso de carga pasiva es que, si los gránulos son demasiado pequeños, es posible que la gravedad no sea suficiente para deslizarlos por las paredes.

2.2.5 Dispositivos de carga eléctrica por tambor rotatorio

Este aparato de carga eléctrica tiene la forma de un cilindro giratorio que está rodeado por todos lados por paredes. El cilindro tiene dos aberturas: una en la parte superior, para la introducción de partículas, y otra en la parte inferior, para la liberación de las mismas. La mezcla granular de plásticos se agrega continuamente al cilindro giratorio, que se inclina muy levemente con respecto a la horizontal para permitir que las partículas caigan fuera de él bajo la influencia de la gravedad. Debido a las colisiones por fricción que tienen lugar entre los gránulos de plástico y las paredes cuando gira el cilindro, los gránulos terminan con una carga eléctrica. Se ha demostrado que los dispositivos de cilindro rotatorio tienen la capacidad de cargar mezclas de PP/PS y PP/HDPE. (AVM Silveira, 2017) En una variación de este aparato para generar un campo eléctrico dentro del dispositivo se coloca una fuente de alto voltaje entre el cilindro interior y la pared del aparato.

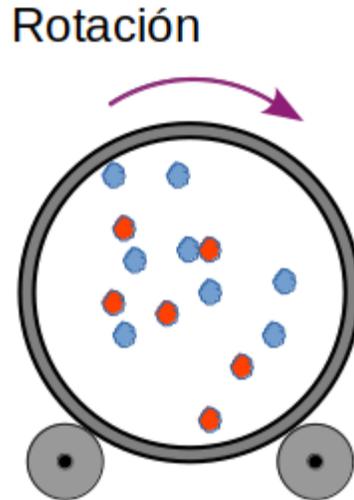


Figura 7. Dispositivo de carga eléctrica por tambor rotatorio

2.2.6 Dispositivos de carga eléctrica por lecho fluidizado

El dispositivo de carga consiste en un contenedor cilíndrico alargado que sirve como zona de concentración para el lecho fluidizado. Se carga el plástico granulado a través de una abertura, esta a su vez se conecta a un compresor de aire. El compresor aplica aire a presión dentro del contenedor para generar el movimiento del material y producir fricción entre el mismo.

Las partículas de plástico granulado sufren una triboelectrización producto de las múltiples colisiones, generando así una carga. Se ha experimentado la carga de polímeros ABS/PS y PA/PC dando resultados favorables para este método de carga (Wessim Aksa, 2013).

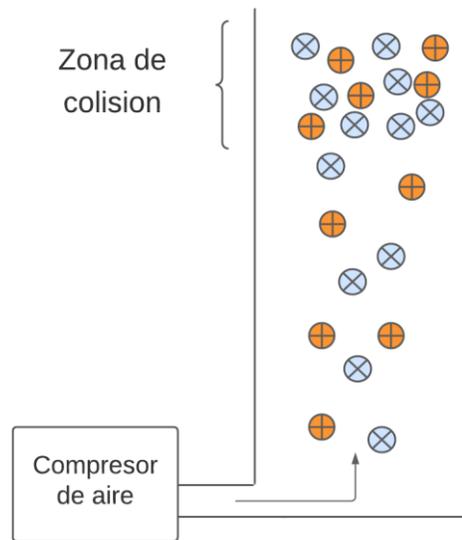


Figura 8. Dispositivo de carga por lecho fluidizado

2.2.7 Descripción funcional del proceso de separación electrostática

Antes de que puedan separarse, los plásticos granulados deben pasar primero por una serie de procesos. Estos procesos implican moler, lavar, secar y tamizar el material, los mismos que son los responsables de la preparación de los distintos tipos de gránulos de plástico, y se llevan a cabo independientemente del método de separación que se vaya a utilizar.

Los plásticos se transportan a lo largo de una cinta transportadora antes de ser triturados por una cortadora. Este procedimiento tiene como objetivo producir plástico granulado con un espesor aproximadamente de 2 milímetros a 2,8 milímetros. Posteriormente, los gránulos de plástico se lavan en un dispositivo diseñado para eliminar cualquier resto de polvo y residuos que puedan haberse adherido a la superficie.

Una vez que se han lavado los gránulos, se secan para eliminar cualquier resto de humedad. El plástico granulado se seca en un horno a una temperatura de aproximadamente 60 C° durante dos horas. La temperatura del horno se regula con

precisión para proteger la integridad del plástico. Los gránulos de plástico se preparan para su próximo destino siguiendo el procedimiento de secado.

Tamizar los gránulos de plástico es el paso final del preprocesamiento y tiene dos propósitos: primero, elimina cualquier partícula que no cumpla con el requisito de tamaño y segundo, asegura que las partículas sean uniformes en tamaño y forma. Esto es fundamental porque el tamaño de la partícula influye en el proceso de separación que tiene lugar en las etapas posteriores.

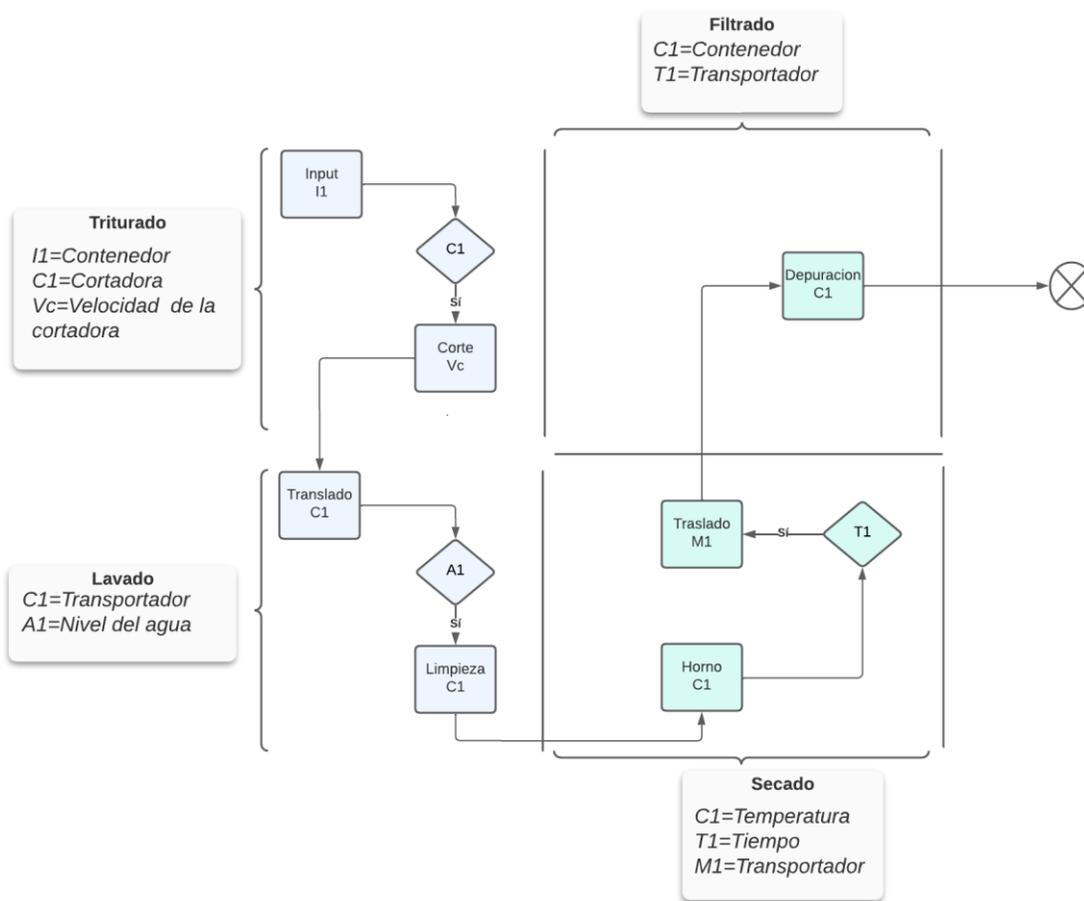


Figura 9. Diagrama de procesos para la separación de plásticos granulados

Una vez finalizadas las etapas de preparación del plástico, se cargan los polímeros granulados. El plástico se electrifica mediante el uso de un tambor giratorio. Mediante el movimiento se produce fricción entre la materia ingresada, generando cargas opuestas entre sí.

Dos electrodos con polaridades diferentes producen atracción o repulsión hacia las partículas de plástico. Esto genera una desviación en su trayectoria para separar tipos de plásticos.

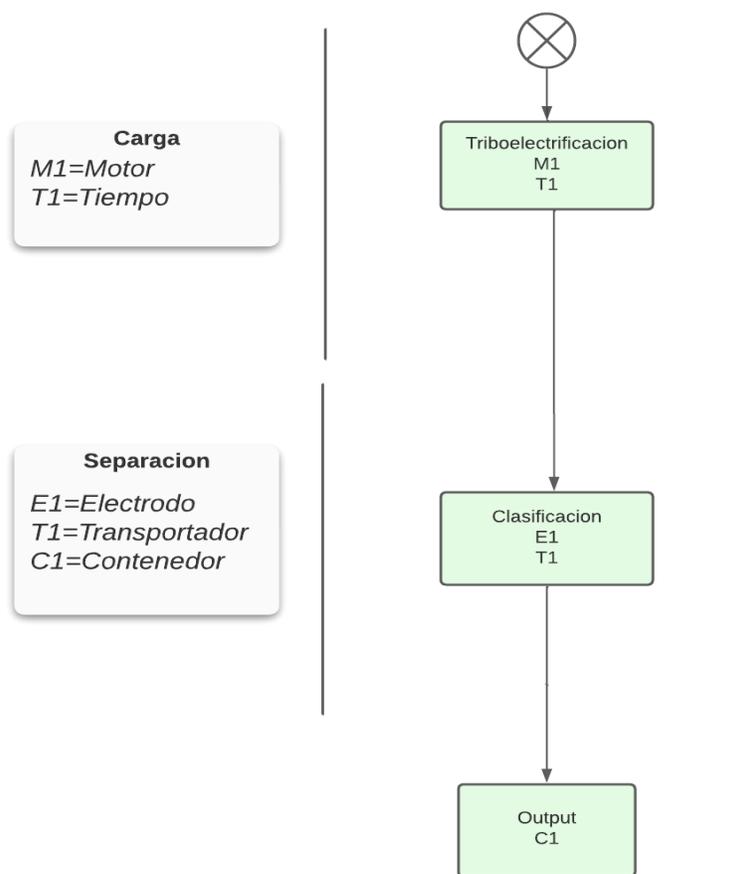


Figura 10. Diagrama de procesos para la separación de plásticos granulados

2.2.8 Separadores electrostáticos comerciales

En la búsqueda de fabricantes de separadores electrostáticos, encontramos los siguientes: Prodecologia, Hamos, Shuguang, Haibao Machinery, Suyuan y RTK.

Prodecologia[C] es una empresa ucraniana que produce separadores triboeléctricos para la separación en seco de mezclas de polímeros en función de sus características eléctricas. (Lozin, 2021) Los separadores funcionan en dos etapas de clasificación a temperaturas del aire entre 5 y 40 grados centígrados, con una humedad relativa del ambiente interno del separador que no supere el 40% y la humedad relativa del producto que no supere el 0,5%. La mezcla de polímeros a separar se alimenta a una tolva de carga y luego se descarga en un dispositivo tribocargador especial. Las partículas de polímero se mezclan en el dispositivo tribocargador, donde adquieren cargas positivas y negativas como resultado de numerosas interacciones con las paredes del dispositivo. Los separadores tienen una capacidad máxima de 1800 kg/h con una pureza del 97% y un consumo energético de 5 kW.



Figura 11. Separador triboeléctrico EBS-T

Haibao Machinery es una empresa china especializada en la fabricación de separadores de plásticos. Dentro de los que se incluye polímeros que no pueden ser separados por el método de flotación. Entre los plásticos con los que trabaja se tiene los siguientes: ABS, PS, PP, PVC,PA ,entre otros.

Unos de los separadores con los que cuenta es el modelo HB1500, un invento de alta calidad que al igual que muchos de sus productos cuenta con certificación CE(conformidad europea). Teniendo este una capacidad de separación para los plásticos granulados de hasta 1.5 ton/h con una pureza de 98%. Necesita de un área mínima de 90 m² y una potencia de 110 a 130 Kw para su correcto funcionamiento.



Figura 12. Separador triboeléctrico HB1500

Shuguang está ubicada en la ciudad de Zhengzhou, China. Es una empresa dedicada a la investigación, fabricación y desarrollo de equipos de trituración y tratamiento de desechos sólidos. La empresa cuenta con certificaciones como ISO 9001, ISO 14004, GB/T19001 y GB/T24001.

Dentro de la gama de separadores triboeléctricos se tiene el modelo SG-3000. Este tiene la capacidad de producción para la separación de polímeros, de 2 a 3 ton/h con una tasa de efectividad igual o superior a 98%. Dentro de las especificaciones del fabricante esta que se requiere de una potencia de hasta 130 KW, así mismo, una corriente estable de 2 a 4 mA para hacer uso del equipo.



Figura 13. Separador triboeléctrico SG-3000

Empresa	Modelo	Capacidad Tn/h	Tamaño mm	Alimentacion
Prodecologia 	EBS-T-2-27/250	0.9-1.8	1980x2940x1275	5.5kw
	EBS-T-2-27/200	0.7-1.4	1980x2440x1275	5kw
Haibao Machinery 	HB1500	1-1.5	9000x5100x5800	110-130kw
Shuguang 	SG-1500	1-1.5	9500X4500X5750	110kw
	SG-3000	2-3	12000X4500X5750	130kw

Figura 14. Tabla comparativa de separadores triboeléctricos

Capítulo 3

3.1 Desarrollo y resultados

3.1.1 Modelo matemático

Los componentes principales del modelo de separador electrostático son dos electrodos de placa. Los dos electrodos de placa están opuestos entre sí en el separador, y juntos forman un campo eléctrico que permite separar partículas de diferente carga eléctrica.

Las partículas de plástico con una carga eléctrica q y una velocidad inicial \vec{v}_0 ingresan al espacio del sistema de electrodos, que tiene un electrodo conectado a tierra y el otro conectado a un alto voltaje directo U . Las partículas con carga q que ingresan al sistema se ven afectadas por el campo eléctrico, que los acelera hacia los electrodos.

La fuerza electrostática que actúa sobre las partículas tiene su origen debido al campo eléctrico generado por los electrodos y a las otras partículas cargadas en el separador. Por lo tanto, la trayectoria de estas partículas se ve afectada no solo por el campo eléctrico de los electrodos sino también por las interacciones entre otras partículas cargadas en el espacio. Pero como estas cargas son insignificantes, estos efectos de fuerzas adicionales pueden despreciarse sin ningún error significativo en el cálculo de las trayectorias de las partículas. En consecuencia, se puede considerar que el movimiento de las partículas en el separador se debe únicamente al campo eléctrico generado exclusivamente por los electrodos.

Una ecuación diferencial parcial lineal describe el campo electrostático en el sistema y dos ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales describen cómo se mueve la partícula en el sistema. Estas ecuaciones forman el modelo matemático del proceso de separación.

La distribución espacial del potencial del campo electrostático se puede obtener a partir de la ecuación de Poisson

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_V}{\varepsilon} \quad (1)$$

El símbolo ε significa la permitividad del medio y ρ_V la densidad volumétrica de la carga eléctrica.

Debido a que el tamaño de las partículas y su carga eléctrica es pequeño en comparación con las dimensiones del sistema de electrodos, la densidad de volumen de la carga eléctrica puede ignorarse porque no afecta el campo electrostático producido por los electrodos. Por lo tanto, la ecuación de Poisson se transforma en la ecuación de Laplace y el modelo matemático del proceso de separación se simplifica enormemente.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2)$$

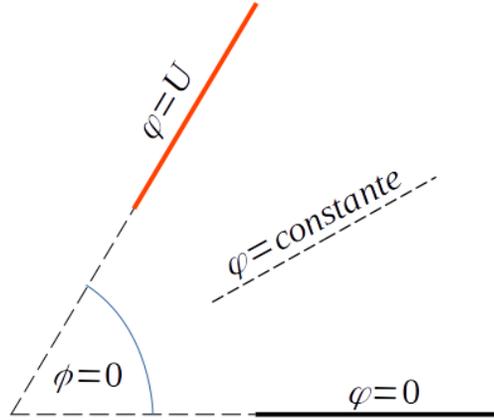


Figura 15. Ilustración para el cálculo del potencial eléctrico entre los electrodos.

La simetría cilíndrica de las placas del separador, como se muestra en la figura 15, asegura que las superficies equipotenciales son planos con coordenadas acimutales constantes que se cortan en el origen y se extienden en dirección radial.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

Dado que el potencial eléctrico depende solo de φ , podemos cambiar las derivadas parciales con derivadas totales en la forma:

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{d^2 \varphi}{d\varphi^2} = 0 \quad (4)$$

La condición en el borde de la región determina los valores de A y B, que definen la forma del potencial.

$$\varphi(0) = 0, \quad (5)$$

$$\varphi(\phi_0) = U \quad (6)$$

Por lo tanto, el potencial eléctrico entre las placas es

$$\varphi(\phi) = \frac{U}{\phi_0} \phi \quad (7)$$

Una vez que se encuentra el potencial eléctrico, la intensidad del campo eléctrico se puede calcular tomando la derivada del potencial.

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (8)$$

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \phi}{\partial \rho} e_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \phi} e_\phi + \frac{\partial \phi}{\partial z} e_z \right) \quad (9)$$

$$\vec{E} = -\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \phi} e_\phi \right) \quad (10)$$

$$\vec{E}(\rho) = -\frac{U}{\phi_0 \rho} e_\phi \quad (11)$$

Las partículas con carga eléctrica q se mueven según las siguientes ecuaciones para su velocidad v y trayectoria s :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_g + \vec{F}_f + \vec{F}_{int} \quad (12)$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (13)$$

Donde:

m denota la masa de la partícula

F_e representa la fuerza del campo electrostático

F_g la fuerza de la gravedad

F_f la resistencia del aire

F_{in} la de interacción partícula a partícula

La ecuación para calcular la fuerza electrostática es la siguiente:

$$\vec{F}_e = q\vec{E} = -q \nabla \varphi \quad (14)$$

Tomando en consideración la ecuación (3.8), la intensidad del campo eléctrico queda de la siguiente manera:

$$\vec{F}_e = -\frac{qU}{\phi_{0\rho}} e_\phi \quad (15)$$

La fuerza gravitacional se define como

$$\vec{F}_g = m\vec{g} \quad (16)$$

Cuando un objeto se mueve a través de un fluido, la fuerza principal que se opone al movimiento del objeto es la fuerza de arrastre aerodinámica. Podemos calcular la magnitud de la fuerza de arrastre usando la siguiente ecuación.

$$\vec{F}_f = 6\pi r\eta v \quad (17)$$

Donde:

η denota el coeficiente de fricción que depende de la geometría de la partícula,

r representa el radio de la partícula

v denota la velocidad de la partícula.

La permitividad del medio y la distancia entre las partículas determinan la fuerza de interacción entre las partículas individuales. La permitividad de un medio mide la facilidad con la que se pueden perturbar los campos eléctricos y, por lo tanto, es un factor

esencial para determinar la fuerza con la que interactúan las fuerzas eléctricas entre las partículas.

$$F_{in} = \frac{qq_j}{4\pi\epsilon d^2} \vec{d} \quad (18)$$

Donde:

\vec{d} es un vector, cuya magnitud es igual a la distancia que separa las partículas.

q es la magnitud de la carga de la partícula que se analiza

q_j es la magnitud de la carga de una segunda partícula que interactúa con la que se analiza

ϵ la permitividad en el vacío

$$S_{tt} + \frac{q}{m \rho} \frac{V_o}{\varphi_o} = 0 \quad (19)$$

Donde:

φ_o ángulo entre las placas (radianes)

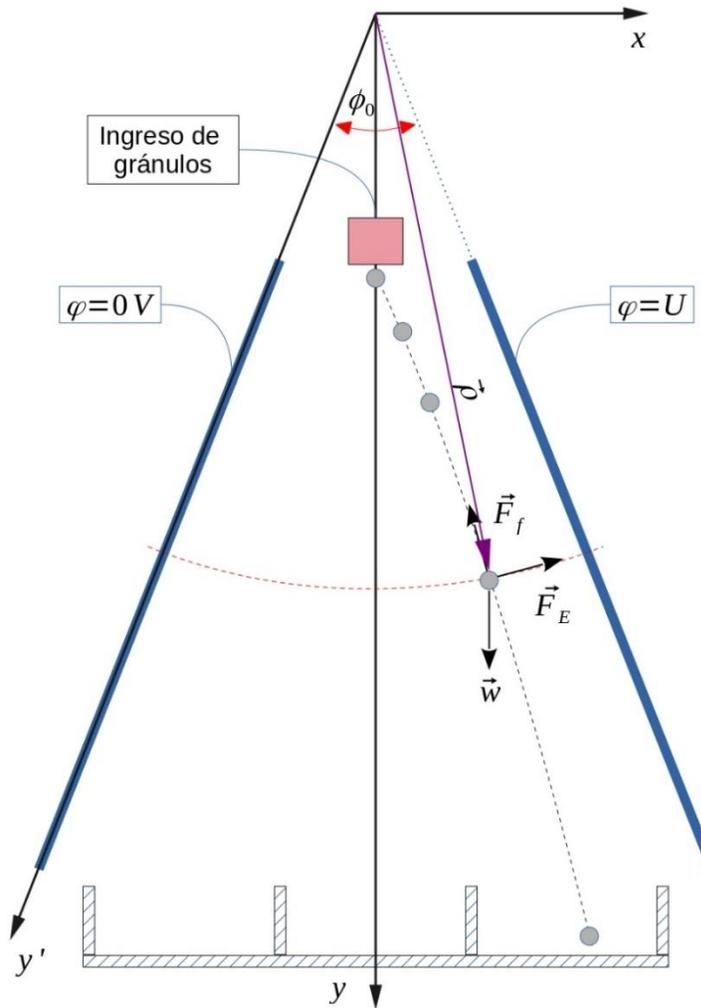


Figura 16 Diagrama de cuerpo libre de la partícula cargada

3.2 Simulación del modelo matemático

Tomando como referencia el diagrama de cuerpo libre y las fuerzas que intervienen en este. Se usó el programa SCILAB con su aplicativo “XCos” para la simulación del modelo matemático. Esta herramienta nos permitió la recopilación de los datos, dando como resultado una gráfica que describe la trayectoria de la partícula.

Para la relación de las componentes de la fuerza resultante en X y Y se tiene que para la componente en x se relacionan las siguientes fuerzas:

$$\sum F_x = F e_x - F r_x \quad (20)$$

$$m \cdot a_x = \frac{qU}{\varphi_0 \sqrt{x^2 + y^2}} \cos \tan^{-1} \left(\frac{x_i}{y_i} \right) - 6\pi\eta r v \quad (21)$$

De igual manera para la relación entre las componentes en Y obtenemos:

$$\sum F_y = F e_y + W - F r_y \quad (22)$$

$$m \cdot a_y = \frac{qU}{\varphi_0 \sqrt{x^2 + y^2}} \sin \tan^{-1} \left(\frac{x_i}{y_i} \right) + mg - 6\pi\eta r v \quad (23)$$

A partir de estas ecuaciones se obtiene el siguiente sistema dinámico que relaciona la posición de la partícula con respecto al tiempo. Dando como resultado un sistema de control de lazo cerrado.

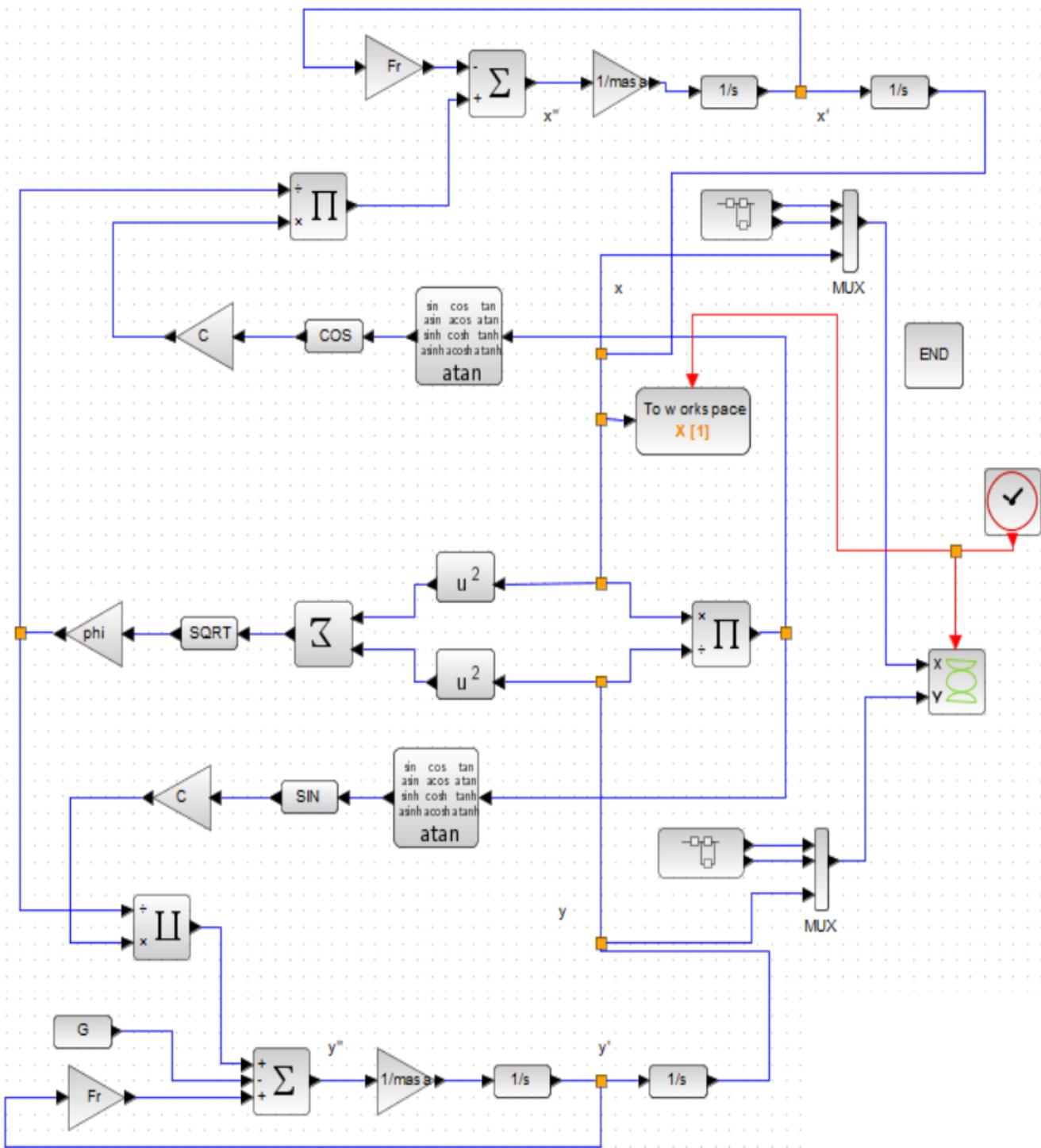


Figura 17 Esquema del modelo matemático-Scilab

Al realizar la simulación obtenemos que la orientación de la trayectoria se ve afectada directamente por el tipo de carga. Mientras que la precisión depende directamente de dos variables: voltaje y radio. El voltaje está relacionado proporcionalmente al campo eléctrico y el radio de la partícula afecta directamente a la masa teniendo como resultado un mayor requerimiento en la magnitud de fuerza para su desplazamiento.

3.3 Solución numérica

La siguiente gráfica describe la trayectoria de una partícula que se tomó como referencia. Sus parámetros iniciales tienen afectaciones en su recorrido. En este caso se asignó valores fijos para relacionar los parámetros y las irregularidades que ocasionan las variaciones de las mismas.

Para una partícula de carga negativa se tiene una posición final estimada de $-0.25 \leq x \leq -0.1$ tomando como referencia que las unidades de medidas están descritas en metros. Asignamos el valor de 3.1 mm para el radio de la partícula de prueba sometida a un voltaje de 35 kV obteniendo la figura 18.

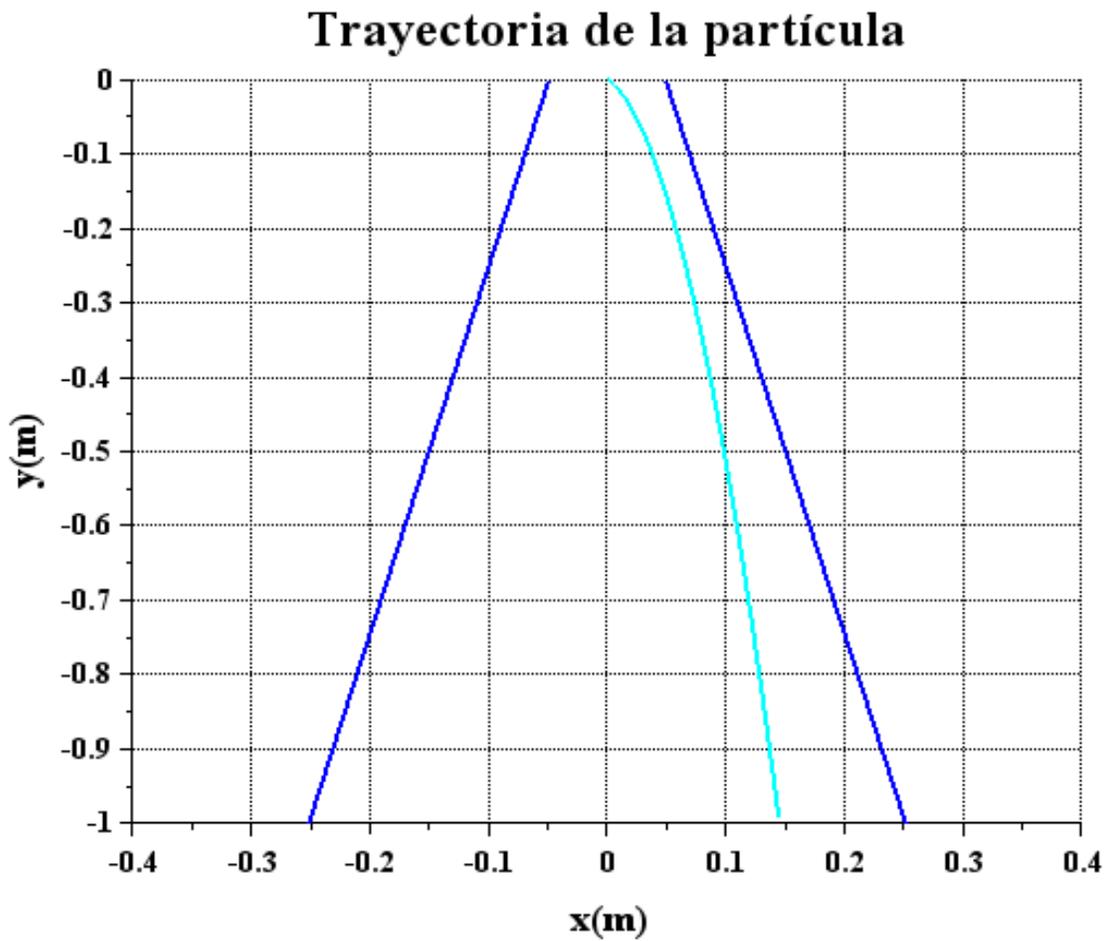


Figura 18 Partícula negativa a 35kV

La partícula de prueba fue sometida a cambios de tensión para observar el efecto de este parámetro en la trayectoria final. Para valores cercanos a 0 V, tenemos la aproximación $x=0$ para su posición final. Mientras que para valores excedentes de 60 kV se obtiene una posición final de $x \geq 0.25$ saliendo del rango estimado de llegada para este eje.

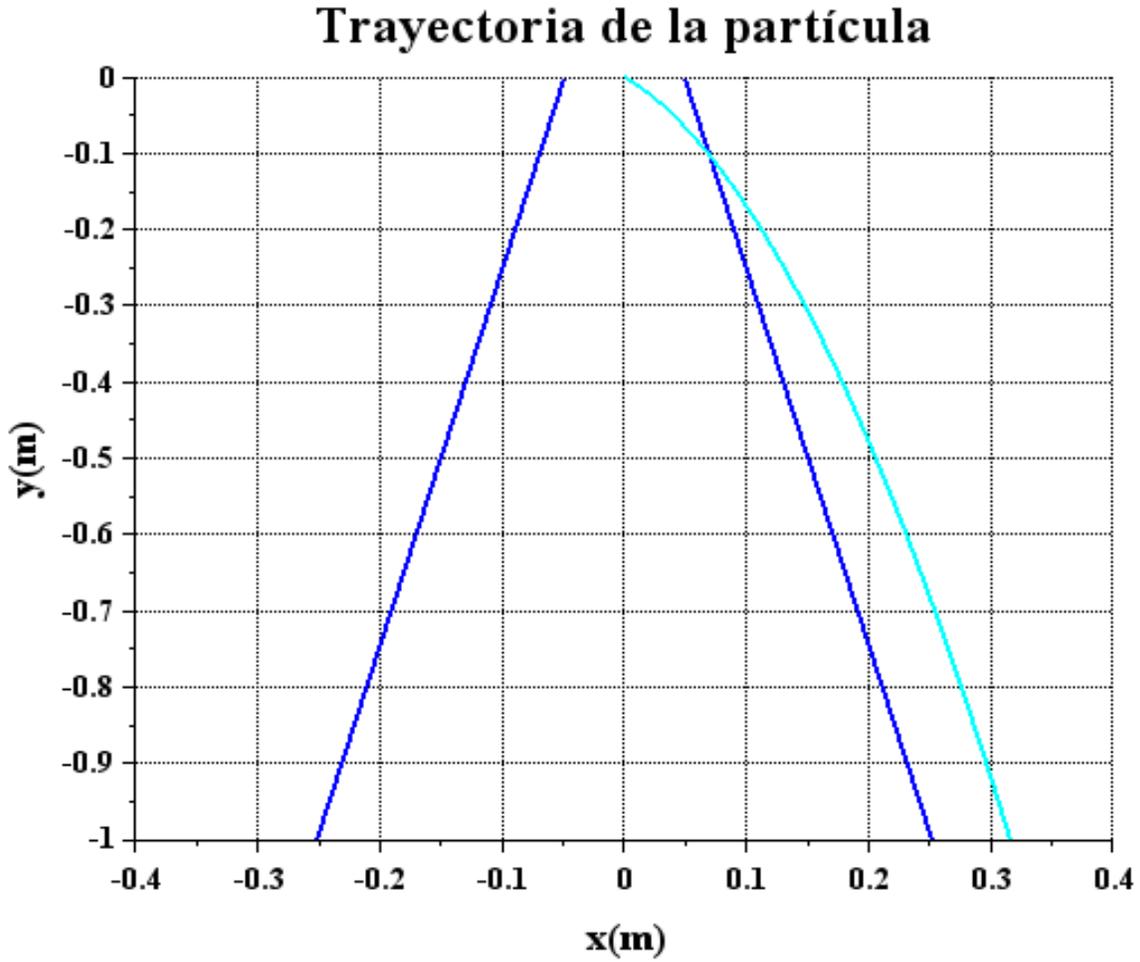


Figura 19 Partícula negativa a 70 kV

Tomando como referencia la misma partícula, se estableció un valor constante de 35 kV para el análisis del parámetro del radio. Para valores aproximados a 0 mm se obtiene una posición final de $x \leq -0.5$. Mientras que al existir un aumento en su radio se tiende a tener una posición que tiende a 0. Dando como resultado que no existe el tiempo suficiente para que el campo afecte su trayectoria dentro del tramo establecido.

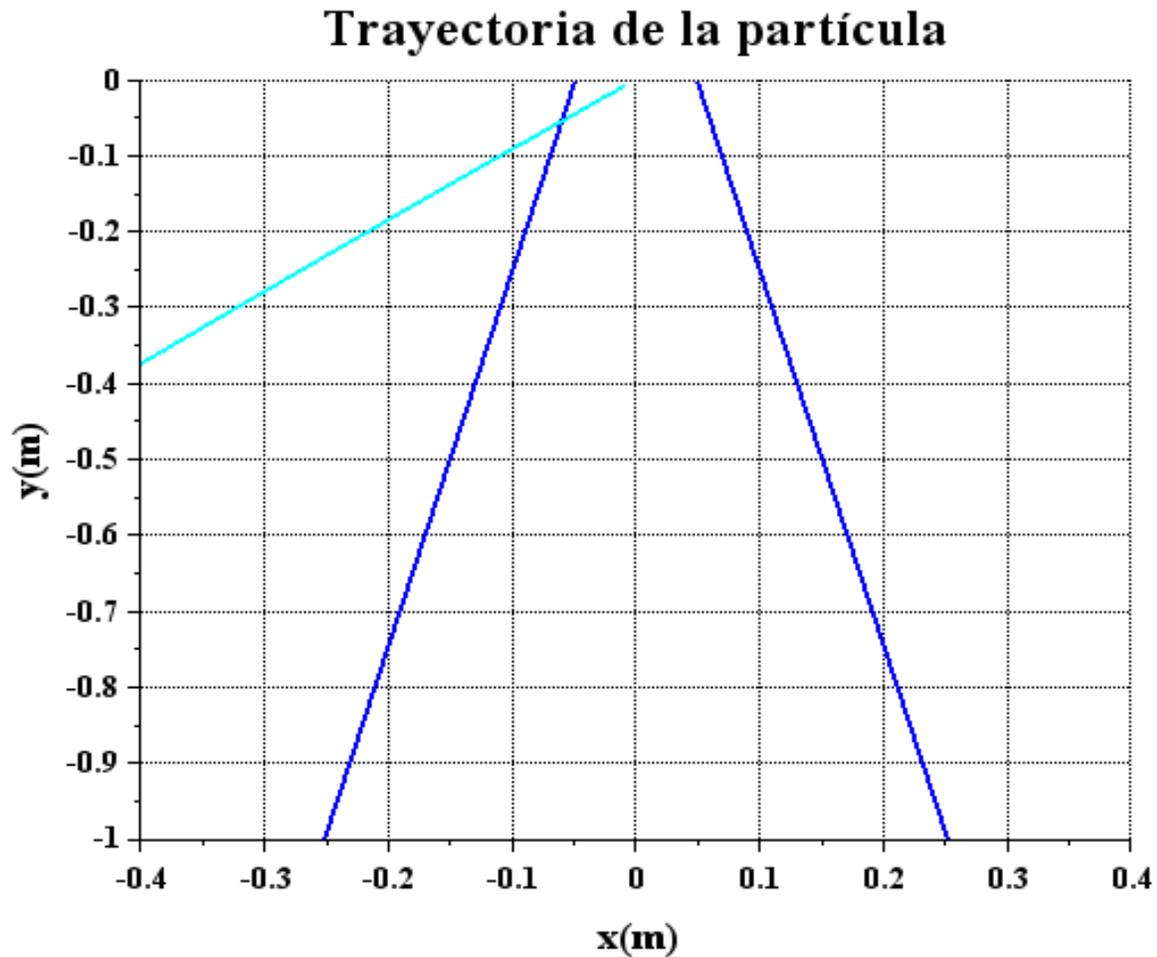


Figura 20 Partícula negativa con radio de 0.15 mm

Dos de los parámetros a tomar en consideración, son el tipo de carga y la magnitud de la carga. Estableciendo un voltaje de 35kV para una partícula de 3.1 mm de radio. Se obtiene que el tipo de carga afecta en la dirección de la trayectoria, es decir, el tipo de carga define el eje de las abscisas que tendrá como posición final la partícula. Mientras la magnitud de la carga influye en la precisión de su punto de llegada.

Trayectoria de la partícula

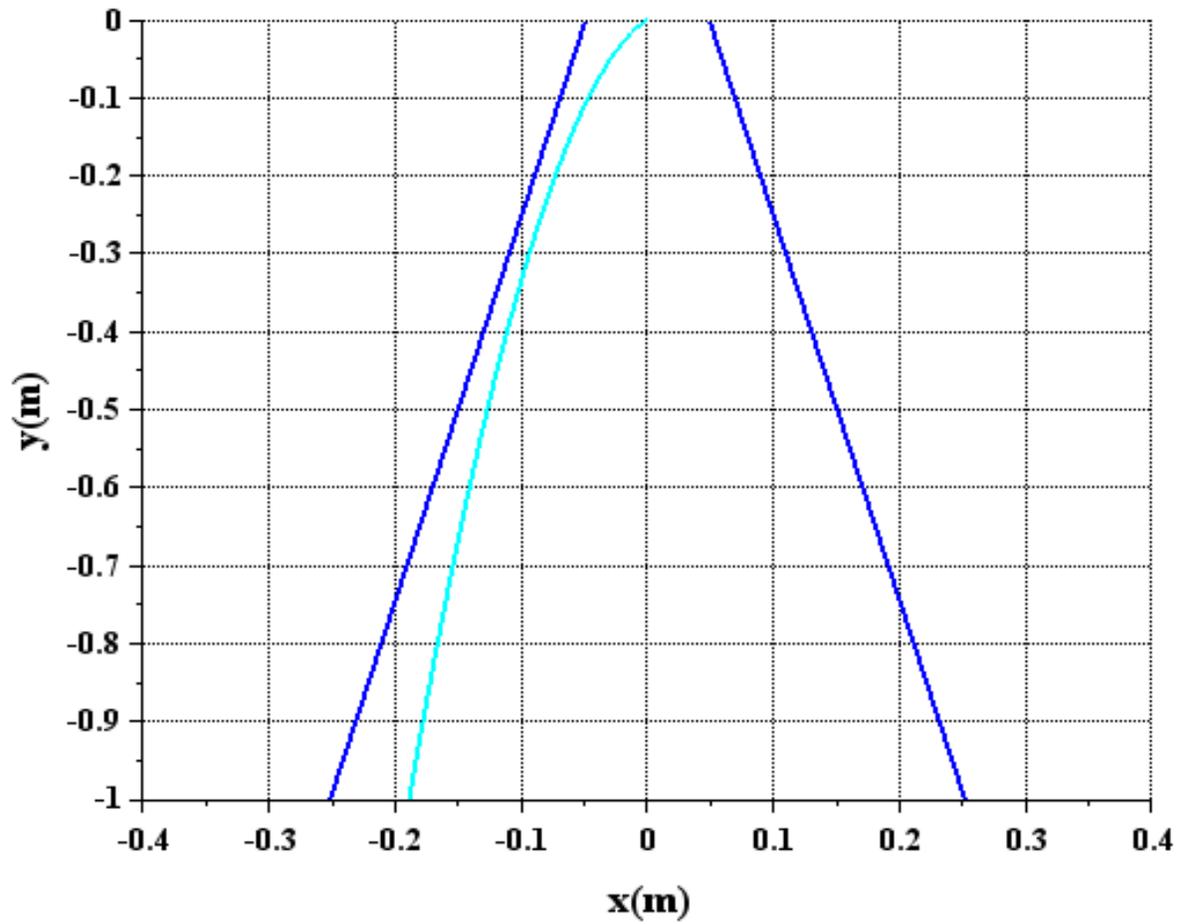


Figura 21 Partícula negativa con carga de $11nQ$

Para describir el comportamiento de los parámetros se realizó una tabulación de los datos. Se definió un punto referencial para relacionarlo con el punto final de llegada de la partícula.

Variable	Rango	Posición final [m]
Radio	$r \geq 10 \text{ mm}$	$x=0$
	$r < 10 \text{ mm}$	$x > 0$
Voltaje	$V \geq 60 \text{ Kv}$	$x \geq \pm 0.25$
	$V \leq 60 \text{ Kv}$	$0 \leq x \leq \pm 0.25$
Carga	$q \geq 60 \text{ nC}$	$x \geq \pm 0.25$
	$q \leq 60 \text{ nC}$	$0 \leq x \leq \pm 0.25$

Figura 22 Tabla descriptiva de parámetros

Así mismo para el análisis de otras variables como la densidad, coeficiente de fricción, el ángulo de inclinación de las placas, etc.... Se experimentó una serie de casos para comprobar sus afectaciones en la trayectoria de la partícula.

3.4 Planteamiento de pruebas

Para realizar una correcta depuración de datos se planteó una serie de casos de prueba. En cada caso se toman como parámetros iniciales a la densidad, ángulo de inclinación del electrodo, coeficiente de resistencia del aire y voltaje.

Caso 1

Se realizó una modificación en la densidad del plástico, a partir del tipo de polímero a utilizar la densidad del mismo varía. En este caso se le asignó un valor de $1300 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$ Se trabaja con una variedad de polímeros debido a que lo se busca es una separación de los mismos. Para esto se tomó un ángulo de inclinación de los electrodos de 10° siendo este insuficiente para obtener una posición adecuada de llegada.

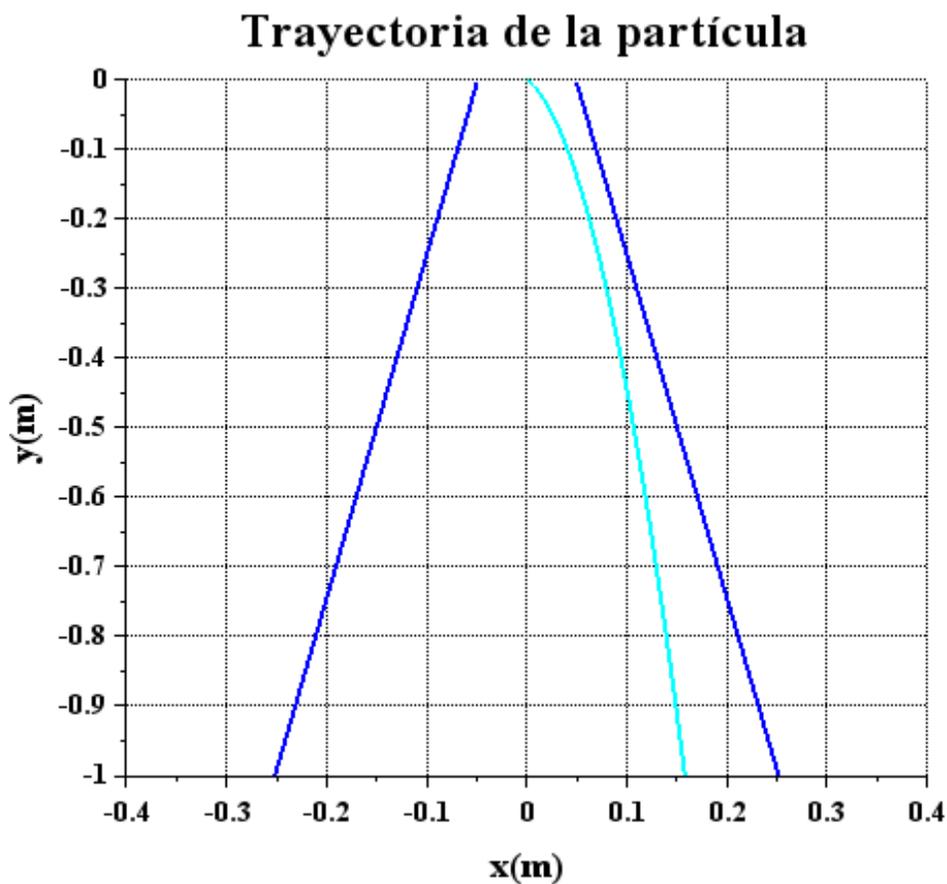


Figura 23 Trayectoria - Caso 1

Caso 2

Se realizó un aumento en el voltaje a 35kV y un aumento en la densidad del polímero a $1500 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$. Manteniendo el ángulo de inclinación de los electros se obtuvo la posición final deseada para este caso. Determinando una relación entre el voltaje y la densidad del polímero.

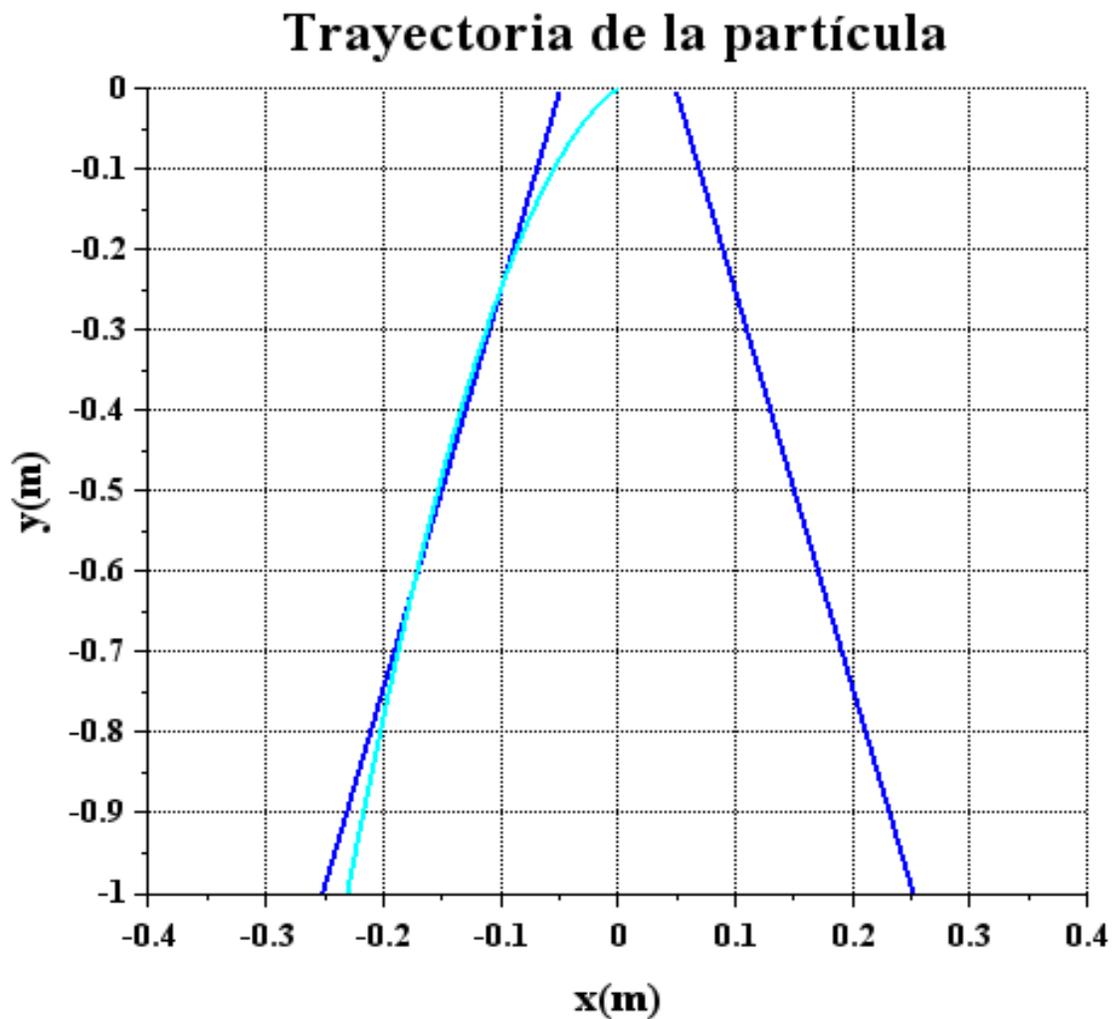


Figura 24 Trayectoria - Caso 2

Caso 3

Al ajustar el ángulo de inclinación de 10° a 15° se obtiene un cambio del coeficiente de fricción de 1.813×10^{-3} a 2×10^{-3} . Se obtiene una posición en $x=0.251$ entrando en los valores requeridos sin embargo la trayectoria de la partícula sobrepasa las limitaciones de nuestro modelo. Todo esto manteniendo los valores del voltaje y densidad del caso anterior.

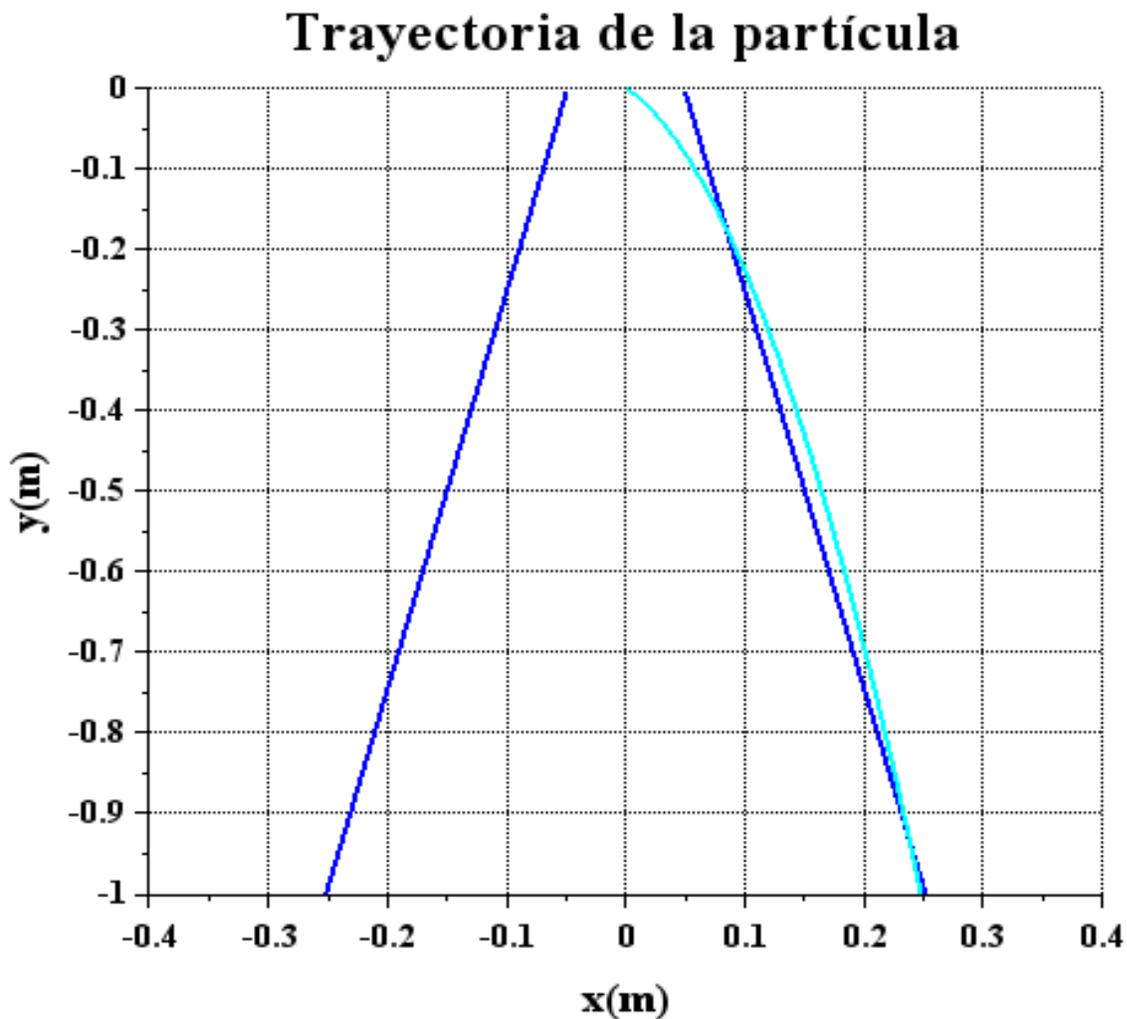


Figura 25 Trayectoria - Caso 3

Caso 4

Aumentando el voltaje de 35kV a 40kV, pero manteniendo los valores de densidad, ángulo de inclinación y coeficiente de resistencia del medio. Se obtiene una posición de $x=0.16$ llegando a límite establecido, sin embargo, las limitaciones físicas del espacio que ocupan los contenedores pueden no ser suficiente para la posición deseada.

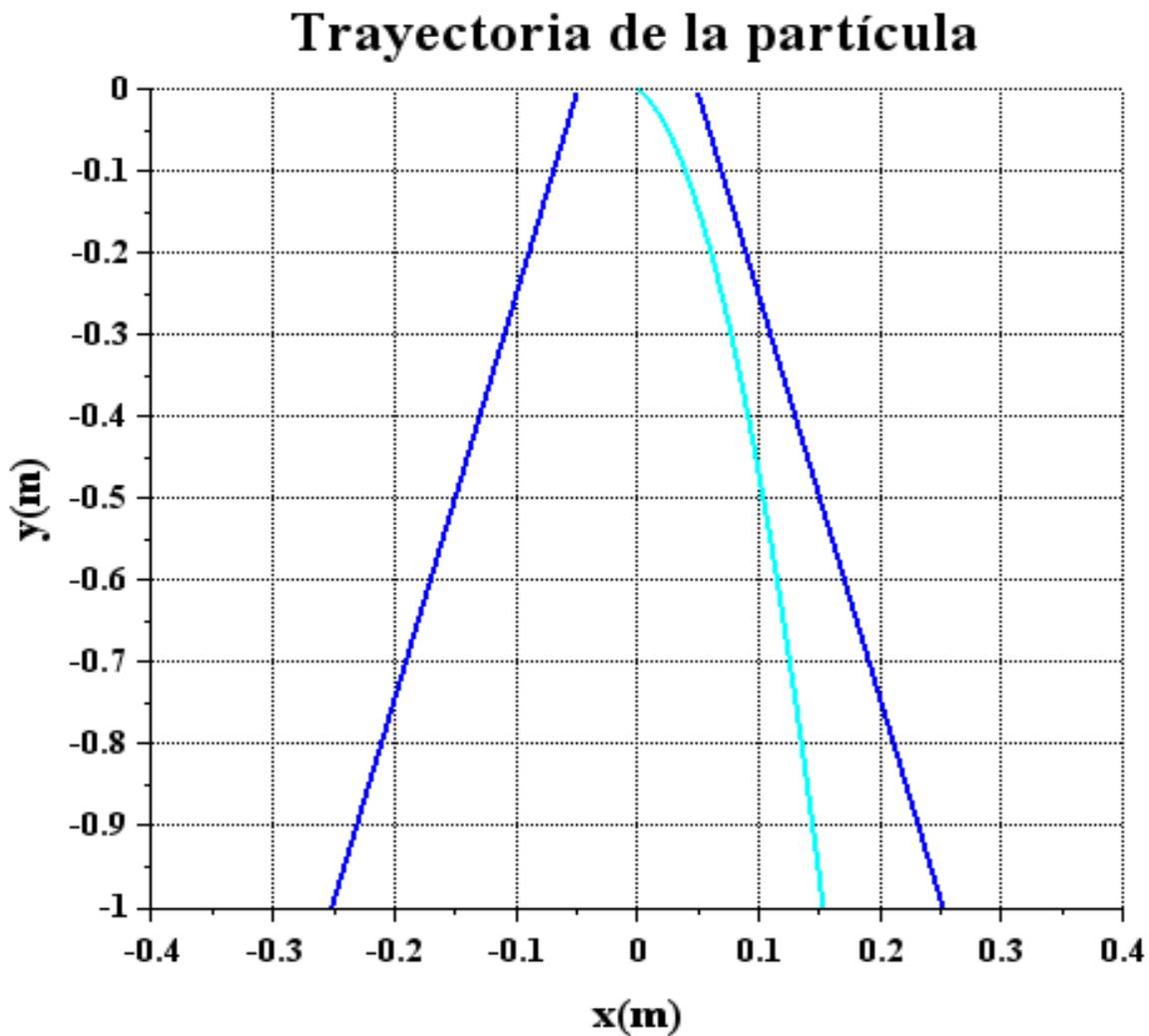


Figura 26 Trayectoria - Caso 4

Caso 5

Se incremento el ángulo de inclinación de los electros de 15° a 20° manteniendo el valor del voltaje de 40Kv. Cambiando la densidad de $1500 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$ a $1200 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$ y el coeficiente de fricción de 2×10^{-3} a 1.65×10^{-3} . Obteniendo una posición de $x = -1.6$

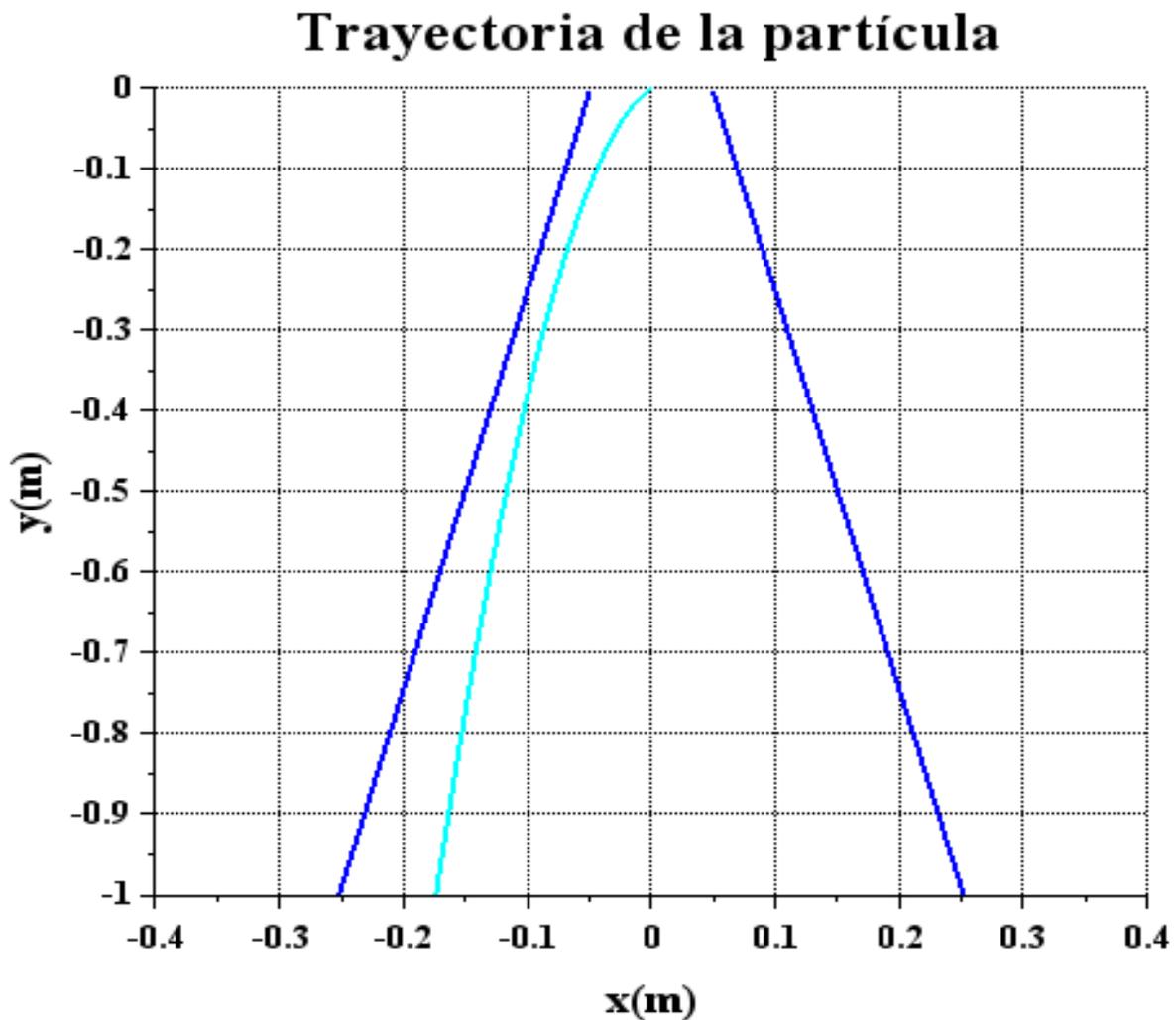


Figura 27 Trayectoria - Caso 5

Caso 6

Para este caso se mantuvo los valores del caso 5 pero se cambió el voltaje de los electrodos de 40Kv a 20 Kv. La partícula alcanzo una posición final de $x = 0.1$ al igual que en el caso 4 la partícula se encuentra en el límite de separación pudiendo esto afectar en el proceso físico.

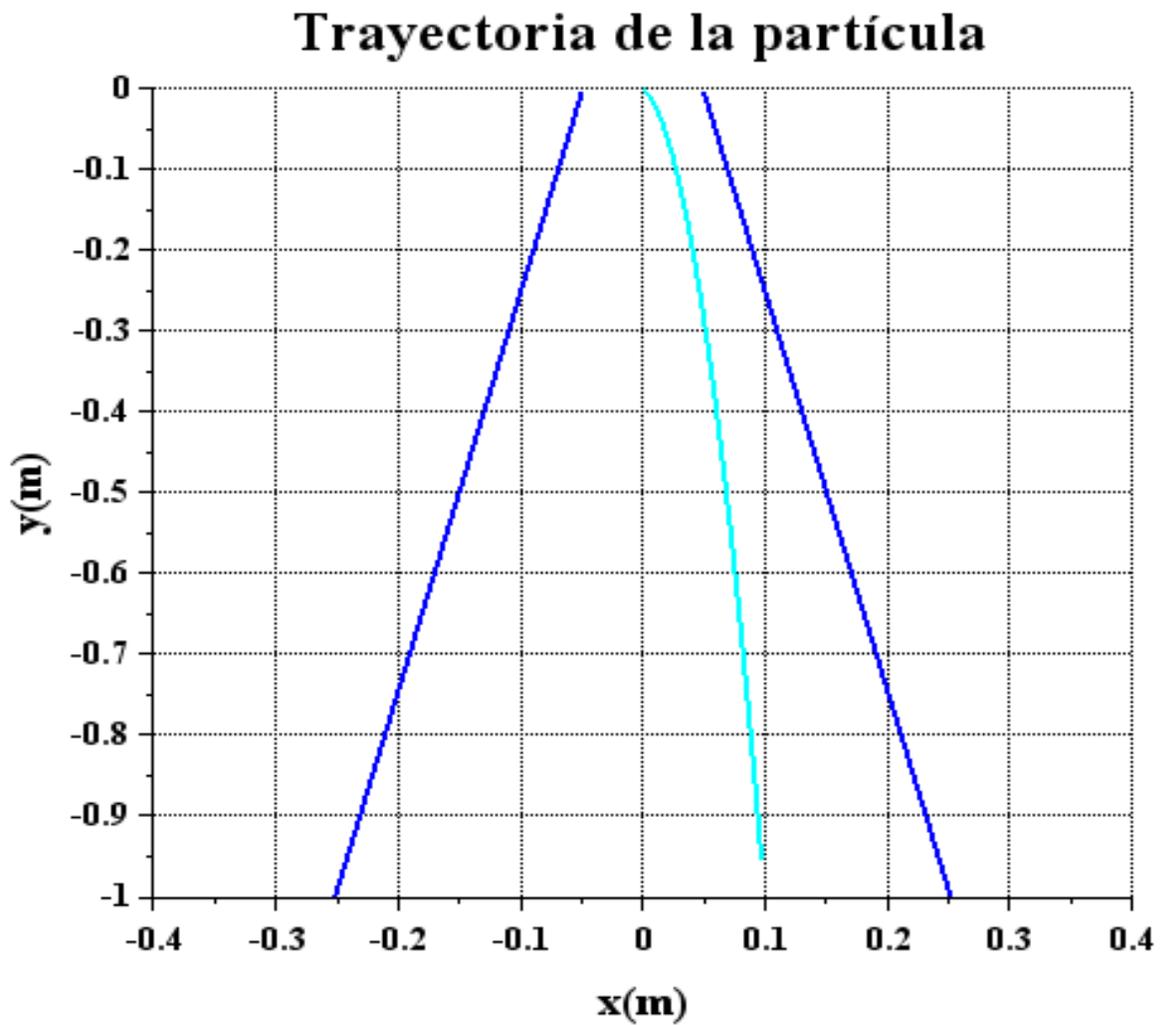


Figura 28 Trayectoria caso 6

Se realizo una recopilación de cada uno de los casos con sus parámetros específicos para su mejor comprensión y análisis. En la figura 29 se ve las afectaciones de cada parámetro según el caso. Obteniendo así los siguientes resultados.

Parametros		Caso 1	Caso 2	Caso 3
Voltaje	[KV]	25	35	35
Carga	[μq]	2,48E-02	2,48E-02	-3,40E-02
Angulo	Grados°	10	10	15
Densidad	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	1300	1500	1500
Coeficiente de friccion		1,81E-05	1,81E-05	2,00E-05
Posicion	[m]	0,16±0,01	0,24±0,01	0,251±0,01

Figura 29 a Tabla descriptiva de casos experimentales

Parametros		Caso 4	Caso 5	Caso 6
Voltaje	[KV]	40	40	25
Carga	[μq]	2,32E-02	-2,98E-02	0,022
Angulo	Grados°	15	20	20
Densidad	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	1500	1200	1200
Coeficiente de friccion		2,00E-05	1,65E-05	1,65E-05
Posicion	[m]	0,16±0,01	1,6±0,01	0,1±0,01

Figura 29 b Tabla descriptiva de casos experimentales

3.5 Diseño de un sistema de monitoreo de separadores electrostáticos

Para el diseño del sistema de monitoreo se hizo uso del software TIA PORTAL. Simulando un PLC para el control del sistema y un HMI para la interfaz del panel de control. Mediante el lenguaje de programación “Ladder” se realizó la configuración de sus compuertas lógicas.

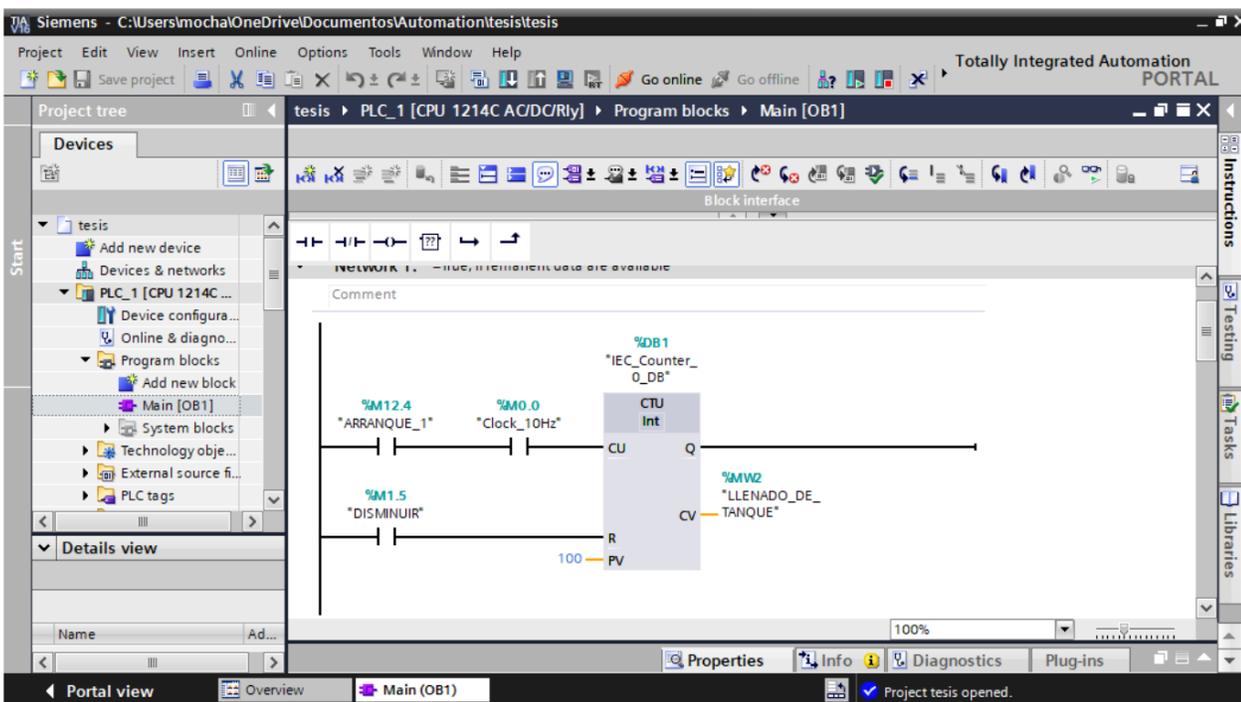


Figura 30 Relación de compuertas lógicas del sistema SCADA

El sistema empieza a partir de la llegada de los gránulos de los polímeros a la banda transportadora. Mediante el encendido del motor se genera el movimiento de la banda transportadora. El motor se describe como una señal de salida y punto inicial del proceso de separación.

Al momento de separar los plásticos se debe controlar la intensidad de los electrodos encargados de generar el campo eléctrico. Asociamos este parámetro como una señal de salida.

Para el almacenamiento de los gránulos de plástico se necesita de tres contenedores. Cada uno de estos corresponde al tipo de carga que obtuvieron mediante el proceso de carga. Los sensores de los contenedores son una señal de entrada en el proceso de separación. Mientras que las compuertas de los mismos cuentan como señales de salida como etapa final del proceso.

3.6 Elementos del sistema de control

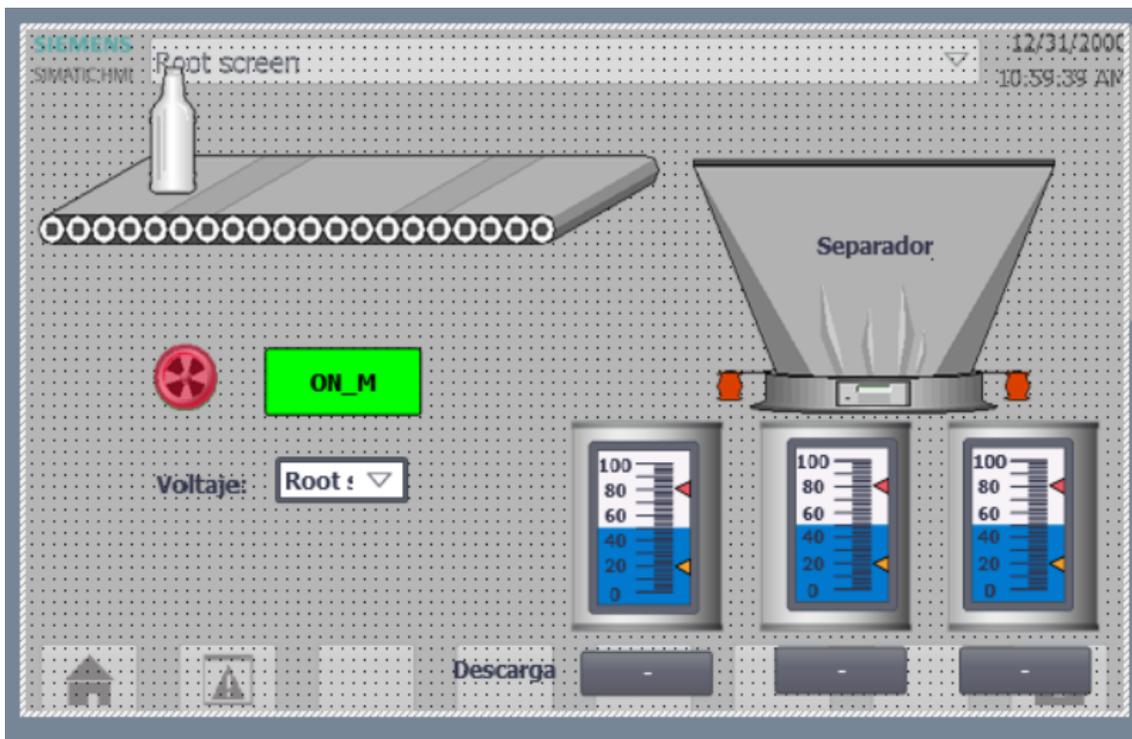


Figura 31 Diseño del sistema HDI

Para identificar los elementos de control del sistema se debe delimitar las etapas del proceso para su estudio. Se establece la etapa final del proceso de carga como punto inicial de mi proceso de análisis. Definiendo este como el proceso de separación hasta su etapa de almacenamiento. Para su correcta observación se expone los siguientes elementos.

Contenedores. - Permite el almacenamiento de los gránulos separados según el tipo de polímero.

Banda transportadora. - Genera el movimiento de los gránulos antes de su separación en base al movimiento de un motor.

Botones de encendido. – Pulsador eléctrico que inicia el movimiento de los polímeros granulados.

Botones de vaciado. – Pulsador que controla el vaciado de los polímeros almacenados dentro de los contenedores.

Electrodos. – Generan un campo eléctrico mediante una diferencia de potencia controlada por el PLC.

Parada de emergencia. – Pulsador encargado de interrumpir los suministros de energía para suspender todos los procesos.

Luces de alerta. – Indica que se ha llegado a la capacidad máxima de un contenedor.

Capítulo 4

4.1 Sistema scada

4.1.1 Diseño P&id

Se define a un p&id como un diagrama que describe la relación que existe entre las entradas y salidas de los componentes de un proceso físico. Permite reconocer el alcance de cada proceso, tener un análisis de riesgo y la operabilidad de cada uno.

Para el diseño del sistema scada empezamos con un diagrama p&id del proceso de separación. Se toma como punto de partida la etapa final del proceso de carga en donde se obtiene el polímero triturado, estéril y cargado. Y se tiene el vaciado de los contenedores como etapa final del proceso de la separación.

Se debe conocer que el plástico granulado del proceso de carga está llegando al proceso de separación. Para obtener esta información se hace uso de un sensor capacitivo “Npn 6 a 36v DC de 1-10mm”. Este sensor estará encargado de reconocer la entrada del proceso y permitiría habilitar la transportación del mismo mediante la banda transportadora. La banda transportadora se acciona mediante la condición del sensor y un botón encargado del inicio del proceso. Estos se conectan mediante una señal eléctrica, siendo ambas señales de entrada al PLC. Los plásticos granulados se movilizan sobre la banda transportadora. Esta banda está conectado a un motor y este a su vez a un regulador de velocidad. Siendo el regulador la señal de salida del PLC para el control del motor.

Una vez que se ingresa al separador son los electrodos los encargados de realizar la separación según el tipo de polímero que se tiene. El PLC proporciona una señal de salida que se conecta a cada electrodo, este es el encargo de administrar el voltaje de entre 25kV a 35kV. Esta diferencia de potencial produce la desviación de la trayectoria

del polímero para su separación.

Al llegar al contenedor correspondiente un sensor capacitivo nos indicara el nivel de llenado del mismo. Este sensor este encargado de dos funciones dentro del sistema. Su primera función es indicar si aun existe capacidad para seguir llenando los contenedores con plásticos granulados. Mientras que su segunda función, consiste en enviar una señal de alerta cuando se encuentre en su máxima capacidad. Esto para frenar la llegada de plásticos al separador y así evitar un desbordamiento del contenedor. Para complemente del proceso se tiene los botones de vaciados encargados de la apertura de los contenedores, permitiendo así la liberación de la carga. Estos se conectan como señales de entrada al PLC.

4.1.2 Administración de usuarios

Dentro de un sistema scada es necesario segmentar el control de los procesos y la información de cada uno de estos. Se designa y limita a cada usuario según su función y la necesidad de este para determinado proceso. Esto con la finalidad de tener un registro y control que permita garantizar la seguridad del proceso y su productividad.

Para nuestro proceso de separación se designa un usuario que permita generar estos registros. Definimos a nuestro usuario como “Invitado” y se le asigna una contraseña de “123456”. Se configura los botones para que al momento de intentar acceder a cualquiera se abra la pestaña de ingreso. Al igual que cualquier sistema en caso de coincidir se ingresará sin restricciones. En caso de ingresar una contraseña errónea el mismo sistema arrojará un aviso sobre el mismo y no permitirá el acceso.

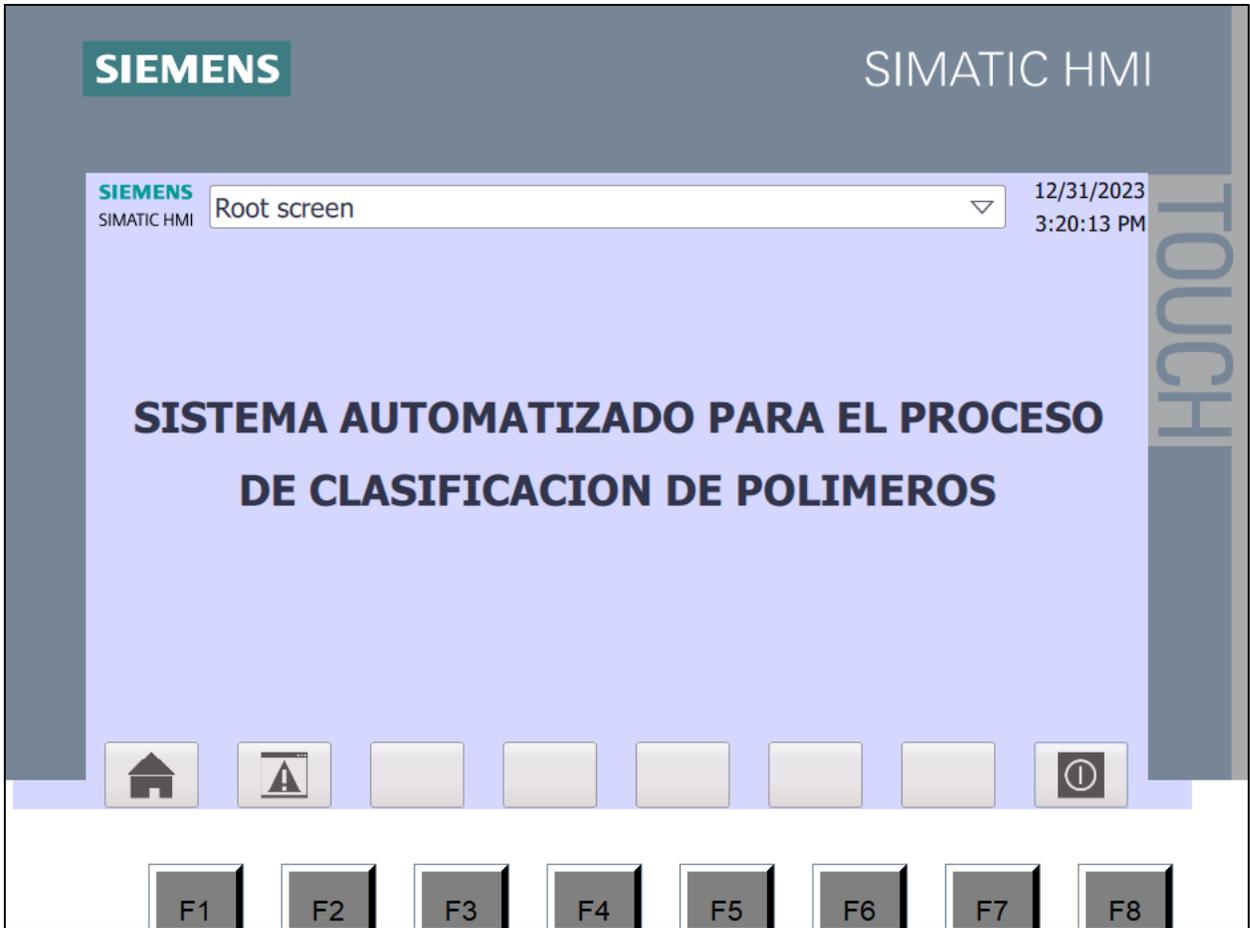


Figura 34 Interfaz principal de usuario

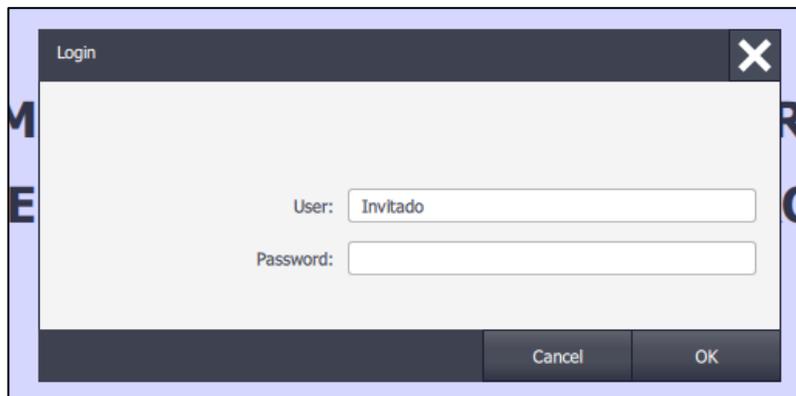


Figura 35 Ingreso de usuario

Active system events				
No.	Time	Date	Text	
\$ 260014	6:40:08 PM	12/31/2023	User 'Invitado' has failed to log on successfully 6 times. The user has been logged out and assigned to group 'Unauthorized'.	
\$ 260000	6:40:08 PM	12/31/2023	Invalid password or user name. Logon has failed.	

Figura 36 Advertencia de usuario incorrecto

4.1.3 Interfaz de separación

Se separo la interfaz en tres secciones según su voltaje. Al tratarse de plástico granulado no se puede tener una medida exacta de cada uno de estos. El proceso de separación depende de varios factores dentro de los que se involucra el radio de la partícula. Por lo que debe existir un valor de voltaje específico según la necesidad que genere la media del radio del polímero. Se diseño los bonotes que se encuentran por defecto para este cambio de interfaz. Siendo “F1” la interfaz que permite la alimentación de los electrodos a 35 KV, “F2” alimenta los electrodos a 30 KV y “F3” alimenta los electrodos a 25KV.

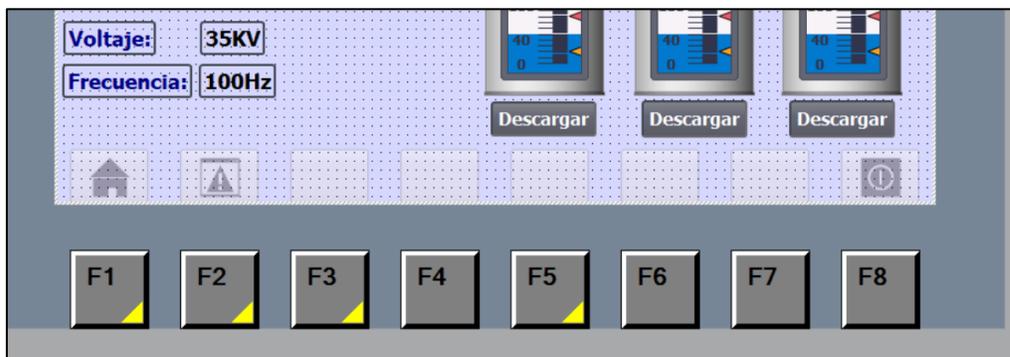


Figura 37 Botones designados para cambio de interfaz

Para la simulación de este proceso se designa el botón “INICIO” como una condición y señal de entrada para el PLC. Estas junto al sensor de presencia permiten accionar el motor. Como señal de salida se tiene una alerta para indicar que el proceso se esta desarrollando. Al llenarse los contenedores el sensor de presencia de cada uno de estos se activa, siendo este una señal de entrada al PLC, enviando una señal para el paro del motor. Para reiniciar los valores del proceso es necesario el vaciado de los contenedores.

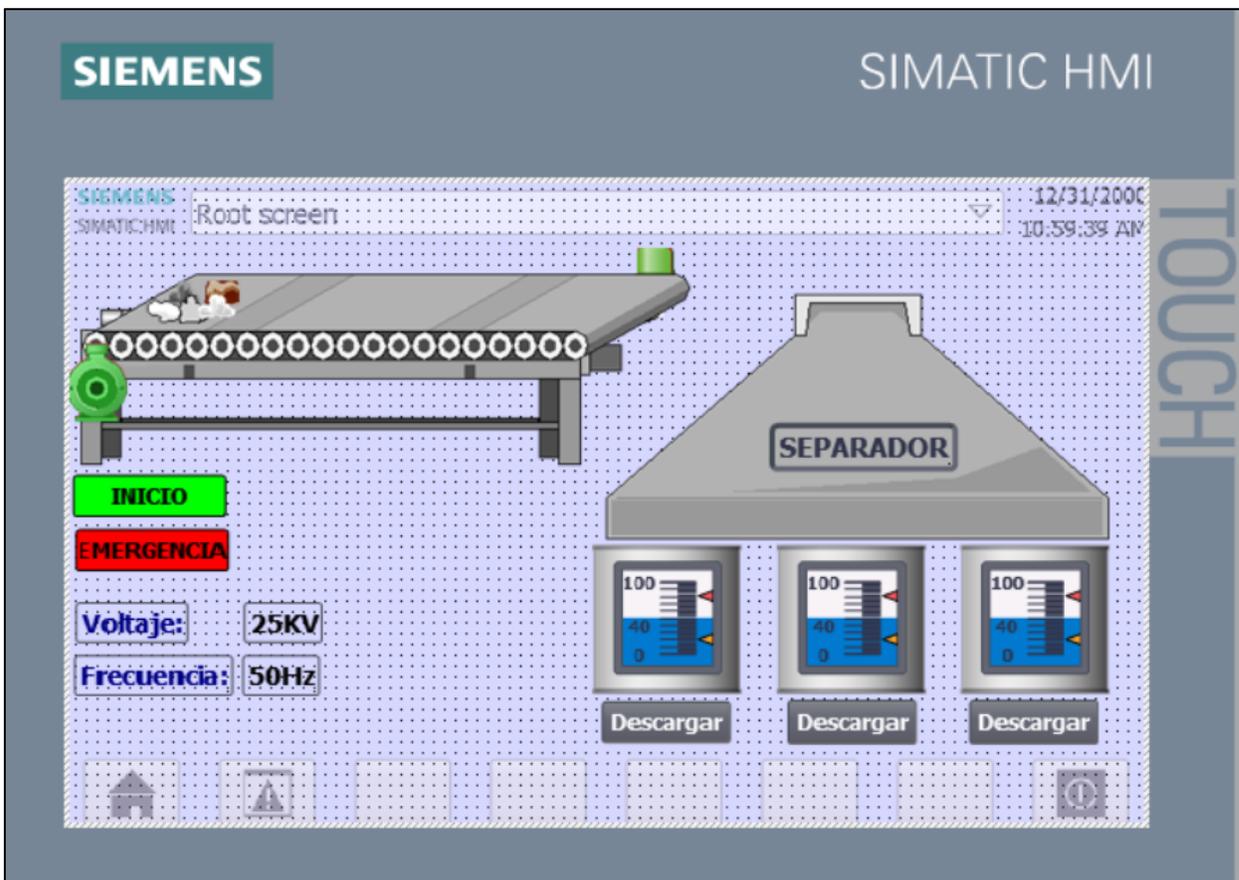


Figura 38 Interfaz de proceso de separación

4.1.4 Registros de datos

El registro de los datos es necesario para analizar la productividad el correcto funcionamiento de los procesos. Estos datos también sirven como indicadores para el mantenimiento preventivo de los equipos. El acceso a esta información está limitado según los permisos del usuario.

Para acceder a esta interfaz se designó al botón “F5”. En esta interfaz se tiene la variable de voltaje y frecuencia. Ambas son las señales de salida que obtiene el PLC del motor y los electrodos. Los utilizamos “” para mostrar los datos que obtenemos mediante las variables del proceso De igual manera tenemos el registro de cada una de las descargas. Las subidas y bajadas como se muestra en la figura 4. muestran el inicio y el final del proceso siendo esta la descarga de los contenedores.

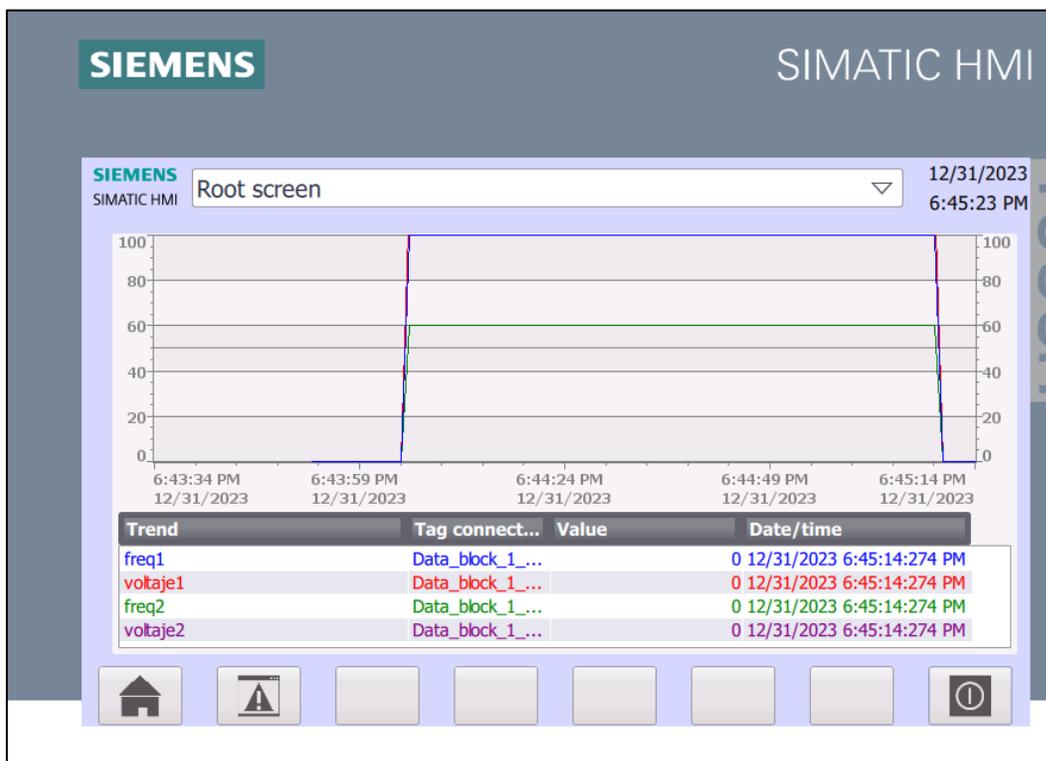


Figura 39 Interfaz de registro de datos

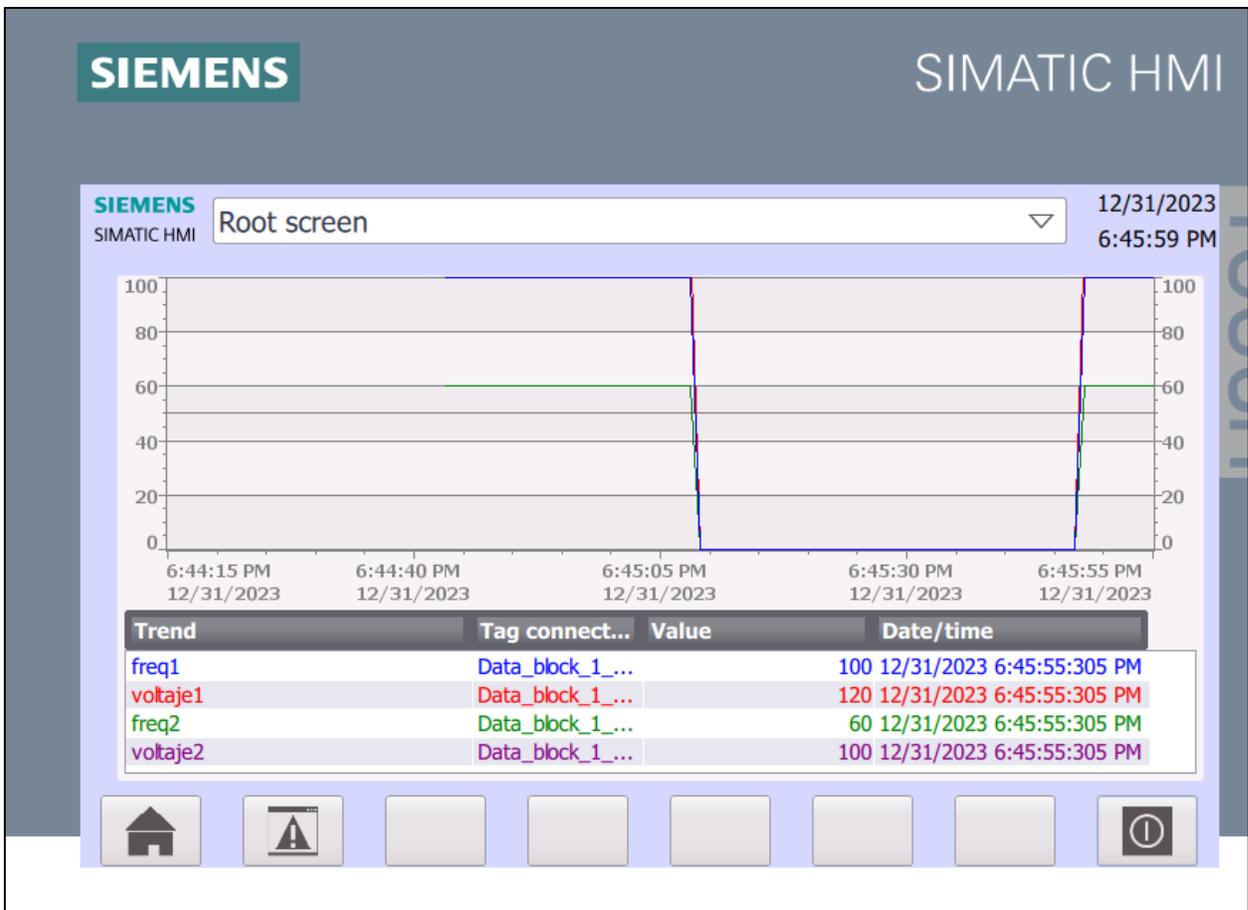


Figura 40 Interfaz de registro de datos

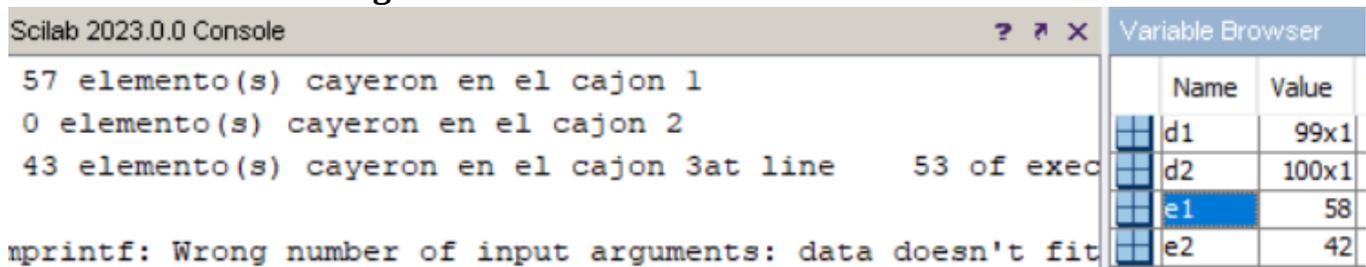
4.2 Resultados

Para definir la productividad del sistema, se relaciona la cantidad de partículas que ingresan con respecto a la cantidad de partículas que llegan a la posición esperada. Existen tres compartimientos de llegada, siendo de $-0.25 \leq x \leq -0.1$ el rango de posición final para las partículas con carga negativa. En el segundo rango de $-0.1 < x < 0.1$ se obtienen las partículas con poca carga eléctrica. El tercer compartimiento comprende de $0.1 < x < 0.25$ destinado para partículas con carga positiva.

Se como referencia los valores de la figura 3.2.5 y se considera una variabilidad tanto de carga adquirida como del radio medio de los fragmentos triturados. En el primer caso esta variabilidad está relacionada con un número muy grande factores controlables y no controlables como las condiciones atmosféricas. En el segundo caso, la variabilidad está asociada con el desgaste del filo de la cuchilla de la trituradora entre otros factores. Para tomar en cuenta la variabilidad se considera que los valores nominales se dispersan en un 5%. La diferencia de potencial entre las placas se tomó como constante. Sin embargo, se realizó una serie de pruebas simuladas para determinar los valores óptimos.

Para partículas con un radio medio de 2.85 mm se determinó un valor de tensión de 35 kV. A pesar de que el valor de carga eléctrica cambia según el parámetro del radio debido a su relación proporcional. Se obtuvo resultados de 58 partículas cargadas negativamente y 42 partículas cargadas positivamente que llegaron a las posiciones estimas. En el contenedor para cargas positivas se obtuvo 57 partículas mientras que para el contenedor de cargas negativas se obtuvo 43 partículas. Con estos datos se obtiene un error de 1% para dichos parámetros de medición.

Figura 32 Efectividad a 35 KV – 2.85 mm



Para el segundo caso se define un radio promedio de 2.801 mm. En este se ingresan 54 partículas con carga negativa teniendo una llegada de 54 partículas. Se ingresan 46 partículas de cargas positivas y se obtiene una llegada de 46 partículas. Dando como resultado un 0% de error para estos valores.

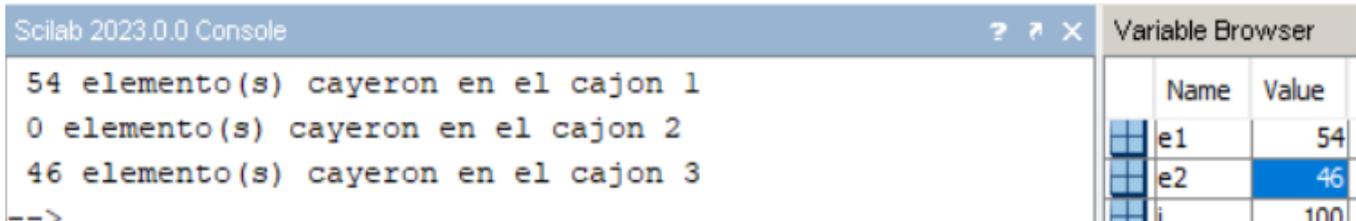


Figura 33 Efectividad a 35 KV – 2.801 mm

4.3 Conclusión

Se obtiene una relación proporcional entre los parámetros del voltaje y el radio de la partícula que describen nuestra efectividad. Siendo el voltaje un valor constante, es decir, sin variabilidad. El radio sería el parámetro sujeto a análisis en el proceso de corte.

En los casos de prueba obtenemos diferentes resultados según la diferencia de valores que se tiene caso a caso. Existe una concordancia entre el ángulo de inclinación de los electrodos y su potencial eléctrico. En casos donde existe un aumento en su distancia radial y una disminución en el voltaje de los electrodos, se tiene una posición en el límite permitido de llegada.

La variación del coeficiente de fricción y la densidad de polímero tuvo una mínima alteración en la trayectoria del plástico granulado en los diferentes casos analizados. Descartando condiciones externas que tienen una afectación despreciable para la trayectoria de la partícula.

Aunque el aumento del voltaje generaría una fuerza eléctrica suficiente para forzar a la partícula a llegar a la posición correspondiente. Se generaría un mayor consumo produciendo un desperdicio energético. Por lo cual se define valores de 2.82 mm para el radio de la partícula, teniendo en consideración 35kv como potencial del electrodo. Estos para mantener un porcentaje mínimo de error.

Bibliografía

1. Alvarez, R. (2009). *Bases físicas de la luz*. Medica panamericana.
2. Alyani, I., & Aduwati, S. (2021). *Antenna in 6G Wireless communication system: Specification, challenges, and research directions*.
3. ambiente, M. d. (2019). *Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos*. Santa Elena: 2019.
4. Ferreira, T. (18 de Junio de 2021). Anatel aprueba el Plan de uso del espectro y tiene la intención de regular 6G a partir de 2025. Brasil.
5. Garay, V. (2005). *Guía de fibra óptica*. Santiago.
6. Garcia, N. N. (s.f.). *Propuesta para la administración de la gestión integral y manejo de los desechos sólidos en el canto Santa Elena*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Santa Elena.
7. Gonzales, A. (18 de Diciembre de 2007). ¿Que es la luz? La habana, Cuba.
8. óptica, L. A. (2014). *The Fiber Optic Association*.
9. Sandoval, G., Oloarte, R., Sanchez, H., & Flores, F. (diciembre de 2013). Libro de memorias. Tampico, Mexico.
10. Silveria Avm, C. M. (2017). Process Safety and Environmental Protection. En T. I. Engineers, *Application of tribo-electrostatic separation in the recycling of plastic wastes*. Santa Maria: The Institution of Chemical Engineers.
11. Soares. (2020).
12. Thami Zeghloul, A. M. (2016). Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics. *Journal electrostatics fundamentals, application and hazards*.
13. Wessim Aksa, K. M. (2013). Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from. 5-6.
14. Yufei Quin, K. G. (2021). Particle trajectory model for tribo-electrostatic separating mixed. *ScienceDirect*.

Anexos

Anexo 1. Presupuesto

	Empresa:	Precio	Capacidad
	Zhengzhou Yatai Energy	42000\$	300 Kg/h
	Henan Zhengyang Machinery	50000\$	500 Kg/h
	Nanjing Sure Origin Environmental	40000\$	400 Kg/h
	Shijiazhuang Jiarun Technology	58110\$	2 T/h
	Zhengzhou Yuxi Machinery	25400\$	300 Kg/h

Figura 34 Precios del mercado

Anexo 2. Extracto de código.

Código Pscilab

```
clear, clc
loadXcosLibs(); loadScicos();

importXcosDiagram("C:\Users\mocha\OneDrive\Documentos\tesis\Eschema.zcos")

typeof(scs_m) //The diagram data structure

C1=0;C2=0;C3=0,e1=0,e2=0,d1=0,d2=0;

scs_m.props.context;

for i=1:2

context.phi = 10*%pi/180;
context.densidad = 1300e3;
context.radio = (3.1+abs(rand()))*1e-3;
context.U = 35e3;
context.Relacion_carga_masa = (5+rand())*1e-9;
context.Volumen = (4*%pi*context.radio^3)/3;
context.masa = context.densidad*context.Volumen;
context.Q_carga = (grand(1,1,"bin",1,0.5)*2-1)*context.Relacion_carga_masa/context.masa;
context.G = (4*%pi*context.densidad*9.8*(context.radio)^3)/3;
context.n = 1.65e-5;
context.Fr = 6*%pi*context.n*context.radio;
```

```
context.C = context.Q_carga*context.U;
```

```
scicos_simulate(scs_m,context);
```

```
X values
```

```
x(i,1) = ans;
```

```
m(i,1) = context.masa;
```

```
q(i,1) = context.Q_carga;
```

```
r(i,1) = context.radio;
```

```
if (q(i,1)<0) then
```

```
  e1=e1+1;
```

```
  d1(i,1)=q(i,1)
```

```
else (q(i,1)>0)
```

```
  e2=e2+1;
```

```
  d2(i,1)=q(i,1)
```

```
end
```

```
if (x(i,1)>-0.26)&(x(i,1)<-0.09) then
```

```
  C1(i,1)=x(i,1);
```

```
elseif (x(i,1)>-0.09)&(x(i,1)<0.09) then
```

```
  C2(i,1)=x(i,1);
```

```
else (x(i,1)>0.09)&(x(i,1)<0.26)
```

```
  C3(i,1)=x(i,1);
```

```
end
```

```
end
```

```
printf (" %i elemento(s) cayeron en el cajon 1\n",nnz(C1))
```

```
printf (" %i elemento(s) cayeron en el cajon 2\n",nnz(C2))
```

```
printf (" %i elemento(s) cayeron en el cajon 3",nnz(C3))
```

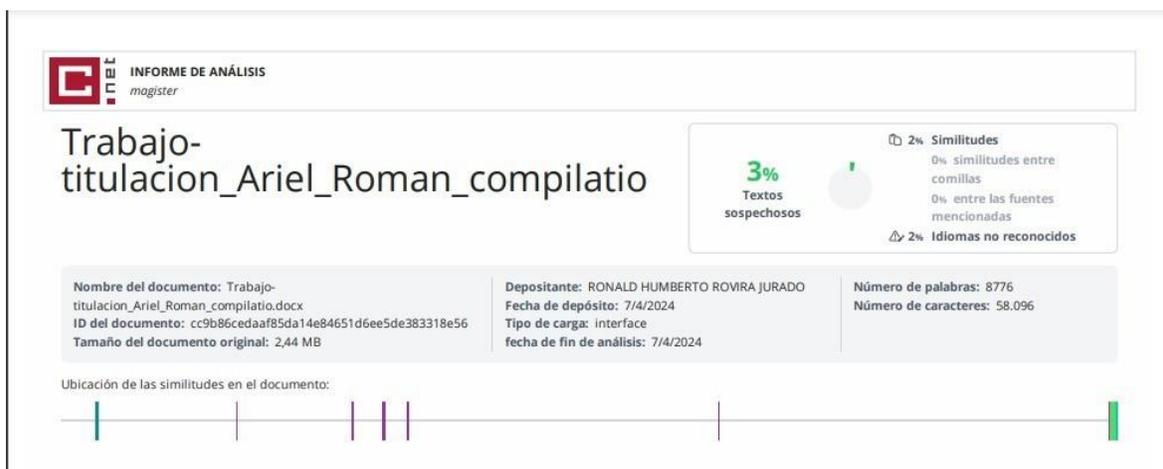
Anexo 3. Resultado de la revisión del trabajo en la plataforma Urkund.

La Libertad, 8 de abril del 2024

Ing. Jose Sánchez Aquino, Mgtr.
Director de la carrera
Electrónica y Telecomunicaciones

Estimado ingeniero Sánchez,

Cumplo con informar los resultados obtenidos tras llevar a cabo la revisión de coincidencias con fuentes externas utilizando el software "Compilatio", referente al trabajo de titulación titulado "Modelado de un sistema SCADA para la automatización de un separador de polímeros mediante el uso de triboelectricidad aplicado en el proceso del tratamiento de desechos sólidos en la provincia de Santa Elena", elaborado por Ariel Enrique Román Lainez, estudiante de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones. Me complace informar que el porcentaje de coincidencias detectadas fue del 3%, según lo evidencia la imagen adjunta.



Quedo a su disposición para cualquier consulta adicional.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**RONALD HUMBERTO
ROVIRA JURADO**

Ing. Ronald H. Rovira, Ph.D.
Tutor del trabajo

Anexo 4. Aplicativos empleados

Para realizar las simulaciones es necesario el uso de diferentes herramientas debido a que se plantea simular un modelo matemático y un modelo funcional de los procesos. Se hace uso de distintos softwares que cumplan con los requerimientos para generar y vincular las simulaciones.

Scilab

Se trata de un software libre creado por Scilab Enterprises para el análisis numérico y estadística, así mismo, como el diseño de sistemas dinámicos. Este software nos permite tanto manipular modelados matemáticos como examinar estadísticamente sus resultados.

Tia portal

Es un software diseñado por la empresa Siemens que proporciona un entorno virtual para simular el diagrama esquemático de un proceso. Nos permite controlar y supervisar a nivel administrativo sus etapas y realizar un diagnóstico de cada una. Se hace uso de este software debido a las herramientas y la variedad de equipos(simulados) que incorpora para la simulación de procesos.