

Planta prototipo para la fabricación de pellets y filamentos de impresión 3d elaborados a partir de
botellas pet posconsumo

Valentina Angel Romero, Carlos José Barrios Álvarez, Brayan Yesid Parada Martínez y Héctor
Hernando Quintero Peláez

Director

Heller Guillermo Sánchez Acevedo
Ph D. Ingeniería Mecánica

Codirector

Germán Adolfo Díaz Ramírez
Ph D. Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A la mujer que me dio la vida, que me ha acompañado en todos los momentos, que me apoyó en mis actividades: mi madre, que luchó por mí, me ayudó a crecer y formar la mujer que soy hoy en día. A mi nonita, mis tías y toda mi familia que me apoyaron fervientemente en mi carrera profesional.

A mi gran amigo, Iván. A mi cómplice de toda la carrera, Brayan. A Juan Pablo, Daniel, Juan Diego, Esperanza, Silvia y Karoll por acompañarme a disfrutar al máximo la vida universitaria. Al Coro UIS por permitirme vivir experiencias mágicas de la mano de la música y ayudarme a formar como una profesional íntegra.

A mis compañeros de trabajo de grado, que creyeron fervientemente en este proyecto e hicieron posible su realización.

Valentina Angel Romero

Para mi familia que me apoyó, especialmente a mis hermanos, Angie y Cristian que les guardo mucho aprecio, y a quién me dedicó su tiempo y cariño.

A mis amigos y compañeros que conocí en la carrera. Especialmente a Nando, Junior y Edison, haciendo de mi paso en la universidad un espacio más agradable.

Esto fue posible gracias a ustedes.

Carlos José Barrios Álvarez

Dedico este proyecto de grado a:

Mi madre que con su amor y gran esfuerzo me permitió lograr una de mis grandes metas, gracias por apoyarme y acompañarme en cada momento, enseñándome a ser perseverante pese a las dificultades y obstáculos en el camino.

A mis hermanos Yeison, Soraida, Diana y Luz Mery por su apoyo incondicional y por estar a mi lado en todo momento. A toda mi familia que de muchas maneras han aportado para que cada día sea una mejor persona y de una u otra manera me han apoyado en mis metas y sueños.

Brayan Yesid Parada Martínez

Dedico esta tesis con todo mi corazón a mi madre y a mi padre quienes siempre han creído en mí y me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios, a mi novia por siempre brindarme su mano cálida en situaciones difíciles, a todas las personas que estuvieron inmersas en el desarrollo de la tesis, a Carlos, Edison, Christian, Junior y Diego quienes me brindaron su amistad y su aprecio, agradezco especialmente a mis compañeros de grado, esta tesis ha sido posible gracias a su extraordinaria devoción, sin sus enormes esfuerzos habría sido un texto escaso y poco informativo.

Héctor Hernando Quintero Peláez

Agradecimientos

A nuestro director de trabajo de grado el profesor Heller Guillermo Sánchez y nuestro codirector German Díaz por creer con nosotros en este proyecto y acompañarnos con sus directrices para su realización.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica en cabeza del Profesor Diego Fernando Villegas y de la mano administrativa de María René.

A los técnicos de taller y mantenimiento de la universidad que nos instruyeron y ayudaron en el desarrollo del proyecto de grado: Don Fredy, Don Pedro, Don Carlos y Don Henry.

A nuestro profesores que a lo largo de la carrera nos dieron las herramientas para la ejecución de un proyecto como este y para la vida profesional.

A los profesores Ricardo Alfonso Jaimes, Adolfo León Arenas, Gilberto Parra, William Pinto y Alberto David Pertuz por su asesoría para la ejecución de este proyecto.

A nuestras familias, amigos, y compañeros de trabajo.

Este proyecto no hubiera posible sin ustedes, gracias por acompañarnos y enseñarnos en el proceso.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Formulación del problema	18
2. Objetivos	20
2.1 Objetivo general	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3. Justificación	21
4. Marco teórico	22
4.1 Referentes Teóricos.....	23
4.1.1 PET - Tereftalato de polietileno	23
4.1.2 Triturado de plástico.....	24
4.1.3 Extrusión de plástico	25
4.1.4 Peletizado	26
4.1.5 Filamento para impresión 3D.....	27
4.2 Antecedentes	27
4.2.1 Antecedentes a nivel internacional.....	28
4.2.2 Antecedentes a nivel nacional	29
5. Metodología	32
5.1 Fases del proyecto	33
5.1.1 Fase I: Concepto de planta y condiciones iniciales	33
5.1.2 Fase II: Evaluación.....	33
5.1.2.1 Caracterización	34
5.1.2.2 Modelo teórico.....	34
5.1.2.3 Análisis y resultados	34
5.1.3 Fase III: Propuesta de diseño.....	35
5.1.4 Fase IV: Intervención.....	35
6. Concepto de Planta y Condiciones	36
6.1 Condiciones iniciales.....	36

6.2	Función global y diagrama de procesos	38
6.2.1	Función Principal	38
6.2.2	Condiciones de entrada	39
6.2.3	Condiciones de salida.....	39
6.2.4	Diagrama de procesos	40
7.	Sistema Trituradora.....	42
7.1	Caracterización.....	42
7.2	Informe del análisis funcional	43
7.3	Propuesta de Diseño	46
7.3.1	Cuchillas móviles	48
7.3.2	Potencia de la trituradora.....	52
7.3.3	Selección del motor	52
7.3.4	Eje para las cuchillas móviles	52
7.3.5	Selección de las chumaceras	53
7.3.6	Eje para las cuchillas fijas	54
7.3.7	Criba	54
7.3.8	Ficha técnica.....	55
7.4	Actividades de intervención.....	56
8.	Sistema Extrusora	60
8.1	Caracterización.....	60
8.2	Modelado Teórico	63
8.2.1	Tornillo de extrusión	63
8.2.1.1	Zonas del tornillo.....	64
8.2.1.2	Flujos en el tornillo.....	65
8.2.1.3	Potencia del tornillo.....	66
8.2.1.4	Pandeo del tornillo.....	67
8.2.2	Camisa del tornillo de extrusión.....	68
8.2.3	Tornillos sujeción de la boquilla.....	68
8.2.4	Resistencias eléctricas.....	69
8.3	Informe del análisis teórico- funcional.....	69
8.4	Propuesta de Diseño	83

8.4.1	Diseño general	84
8.4.2	Selección del motor	86
8.4.3	Resistencias eléctricas	87
8.4.4	Plato rompedor	87
8.4.5	Tornillos de sujeción	88
8.4.6	Selección de rodamientos	89
8.4.7	Boquillas.....	90
8.4.8	Ficha técnica.....	90
8.5	Actividades de intervención.....	92
9.	Sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado	97
9.1	Caracterización.....	98
9.2	Informe del análisis funcional	99
9.3	Propuesta de Diseño	100
9.3.1	Enfriamiento.....	101
9.3.2	Enrollado	104
9.3.3	Peletizado	105
9.3.4	Ficha técnica.....	107
9.4	Actividades de intervención.....	108
9.4.1	General	108
9.4.2	Implementación Peletizado	111
9.4.2.1	Boquilla para pellets	111
9.4.2.2	Sistema de temperatura y control de la extrusión para el peletizado.....	112
9.4.2.3	Sistema de peletizado	113
9.4.2.4	Resultados.....	118
10.	Articulación y funcionamiento de la planta propuesta	120
10.1	Bastidor.....	121
10.2	Control	122
10.3	Análisis operativo del diseño.....	123
10.4	Proceso de manufactura.....	125
10.5	Ficha técnica.....	126
11.	Gestión del proyecto	127

12.	Costos.....	129
13.	Conclusiones.....	132
14.	Recomendaciones de mejora.....	134
	Referencias Bibliográficas	136

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Trituradora de único eje y par de ejes	25
Figura 2. Zonas del tornillo.....	26
Figura 3. Geometría de granulado según el tipo de peletizadora.....	27
Figura 4. Antecedentes internacionales: Plantas a pequeña escala.....	29
Figura 5. Antecedentes internacionales: Corte peletizado	29
Figura 6. Antecedentes Nacionales: Trituradora y Extrusora.....	30
Figura 7. Diseños nacionales máquinas de transformación de plástico.....	31
Figura 8. Metodología del proyecto.....	32
Figura 9. Planta ubicada en el Laboratorio de mantenimiento	36
Figura 10. Diagrama de bloques – caja negra.....	38
Figura 11. Diagrama de procesos, caja gris, de la planta prototipo.....	41
Figura 12. Subsistemas de la trituradora.....	43
Figura 13. Subsistema de cuchillas fijas y móviles	44
Figura 14. Tamaño de diferentes hojuelas en el triturado.....	45
Figura 15. Ficha técnica Trituradora del laboratorio	46
Figura 16. Ensamble trituradora diseño propuesto Modelo CAD	47
Figura 17. Diagrama de fuerzas en una cuchilla, y D.C.L del eje de las cuchillas móviles	50
Figura 18. Detalle A interacción de los filos de las cuchillas móvil y fija de la trituradora.....	51
Figura 19. Tipos de cuchillas móviles diseñadas a 0, 7.5, 15, y 22.5°	51
Figura 20. Ficha técnica trituradora propuesta de diseño.	55
Figura 21. Resultado final de las actividades de intervención en la trituradora del laboratorio... ..	58
Figura 22. Diagrama eléctrico del motor.	59
Figura 23. Componentes y sistemas extrusora.....	60
Figura 24. Parte interna extrusora	61
Figura 25. Geometría de diseño para un tornillo extrusor.	63
Figura 26. Condiciones de operación de la extrusora con transmisión recomendada.	73

Figura 27. Ubicación del sistema eléctrico de los componentes de la extrusora	74
Figura 28. Estado los tornillos para sujeción de la boquilla y el cabezal	74
Figura 29. Robustez del cabezal y cilindro	75
Figura 30. Proceso de desarme de la extrusora y estado de sus elementos	76
Figura 31. División entre la zona de calentamiento y la parte interna de la máquina.	77
Figura 32. Modelos de aislantes.....	78
Figura 33. Etapas del material PET Extruido	78
Figura 34. Extrusión de PET virgen.	80
Figura 35. Filamento obtenido de PETG sin mezclar.....	81
Figura 36. Pieza impresa con filamento PETG + reciclado.....	82
Figura 37. Ficha técnica extrusora del laboratorio.....	83
Figura 38. Ensamble extrusora diseño propuesto Modelo CAD	84
Figura 39. Propuesta de diseño tornillo	85
Figura 40. Patrón de orificios en un plato rompedor.	88
Figura 41. Boquillas de filamento para enrollado y peletizado diseño propuesto	90
Figura 42. Ficha técnica extrusora diseño propuesto.....	91
Figura 43. Resultado final de las actividades de intervención en la extrusora del laboratorio....	95
Figura 44. Circuito eléctrico del motor de la extrusora.	96
Figura 45. Circuito eléctrico de las resistencias.....	97
Figura 46. Componentes de la enrolladora.	98
Figura 47. Motor DC de la enrolladora del laboratorio	99
Figura 48. Sistema eléctrico de la enrolladora del laboratorio	100
Figura 49. Ensamblaje enfriamiento, enrollado y peletizado diseño propuesto	101
Figura 50. Sistema de poleas para el enfriamiento de la propuesta de diseño.....	103
Figura 51. Configuración del módulo para enrollado.....	104
Figura 52. Configuración del módulo para peletizado.....	105
Figura 53. Componentes del sistema de peletizado.....	106
Figura 54. Ficha técnica Enfriamiento, enrollado y peletizado diseño propuesto	107
Figura 55. Boquilla para pellets: diseño detalle, prototipado y fabricado	111
Figura 56. Sistema para el control de T° de la resistencia eléctrica instalada	112
Figura 57. Render del sistema de peletizado implementado en el laboratorio.	113

Figura 58. CAD sistema de peletizado implementado en el laboratorio	114
Figura 59. Variación revoluciones de la cuchilla vs número de filamentos a cortar	115
Figura 60. STL para impresion 3D de base de las cuchillas	116
Figura 61. Mecanismo de corte montado en el laboratorio.	116
Figura 62. Organización componentes del sistema de peletizado.	117
Figura 63. Resultado final actividades de intervención en banco de enrollado y peletizado	118
Figura 64. Pellets extraídos del sistema implementado en el laboratorio	119
Figura 65. Ficha técnica enfriamiento, enrollado y peletizado del laboratorio	119
Figura 66. Modelo CAD del diseño propuesto de planta prototipo	120
Figura 67. Bastidor propuesta de diseño	122
Figura 68. Gráficas de las revoluciones de la extrusora, el flujo másico y la velocidad	123
Figura 69. Gráfica de funcionamiento N de la extrusora con los demás sistemas rotativos.....	124
Figura 70. Relación de la T°de salida de filamento con las revoluciones de la extrusora.	124
Figura 71. Gráfica entre las revoluciones del motor y la longitud del pellet.....	125
Figura 72. Ficha técnica planta diseño propuesto	126
Figura 73. Gestión de la planta prototipo.....	127

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del PET.....	23
Tabla 2. Propiedades del PET virgen vs. Pet Reciclado.....	24
Tabla 3. Inspección Inicial.....	37
Tabla 4. Condiciones de salida de la planta del laboratorio y el diseño propuesto.....	40
Tabla 5. Sistemas y subsistemas de la planta prototipo.....	42
Tabla 6. Evaluación primaria de la trituradora.....	44
Tabla 7. Parámetros del PET para el diseño.....	46
Tabla 8. Parametrización del N° de cuchillas, N° de filos y Longitud de la trituradora.....	49
Tabla 9. Características motorreductor de la trituradora propuesta de diseño.....	52
Tabla 10. Características principales del eje de las cuchillas móviles.....	53
Tabla 11. Selección de chumaceras para eje de cuchillas móviles.....	53
Tabla 12. Características principales del eje de las cuchillas móviles.....	54
Tabla 13. Características principales de la criba.....	54
Tabla 14. Actividades de intervención en la trituradora.....	56
Tabla 15. Ecuaciones recomendadas para las zonas del tornillo.....	64
Tabla 16. Valores geométricos medidos en la extrusora del laboratorio.....	65
Tabla 17. Ecuaciones de las constantes de flujo.....	65
Tabla 18. Datos teóricos extrusor laboratorio.....	67
Tabla 19. Resultados teóricos camisa de la extrusora.....	68
Tabla 20. Características mecánicas a con respecto al cambio de la holgura δ	70
Tabla 21. Características mecánicas con respecto al cambio de la anchura de la hélice e.....	71
Tabla 22. Comparación datos técnicos teóricos de la Extrusora laboratorio.....	71
Tabla 23. Evaluación por componentes eléctricos en la extrusora del laboratorio.....	76
Tabla 24. Comparación propiedades PET virgen vs PETG.....	81
Tabla 25. Esquema térmico usado para la extrusión de PETG + PET Reciclado.....	82
Tabla 26. Comparación datos técnicos de la extrusora del lab con la propuesta de diseño.....	86

Tabla 27. Resultados camisa del tornillo de la extrusora propuesta	86
Tabla 28. Características motorreductor de la extrusora propuesta de diseño.....	87
Tabla 29. Comparativa selección tornillos de sujeción	88
Tabla 30. Rodamientos seleccionados para tornillos propuesta de diseño	89
Tabla 31. Selección de lubricante, sello, y tolerancia de cada rodamiento.	89
Tabla 32. Actividades de intervención de la extrusora del laboratorio.....	92
Tabla 33. Condiciones iniciales para cálculo y propiedades ambientales de Bucaramanga.	102
Tabla 34. Dimensiones de la tina de enfriamiento.....	102
Tabla 35. Resultados de la transferencia de calor del enfriamiento	103
Tabla 36. Selección del motor para peletizado.	107
Tabla 37. Actividades de intervención al módulo de enfriamiento y enrollado del laboratorio	108
Tabla 38. Selección del motor para peletizado del laboratorio.....	115
Tabla 39. Costos de las fases de intervención e implementación de la planta prototipo	130

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Sistema trituradora

Apéndice B. Sistema extrusora

Apéndice C. Sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado

Apéndice D. Planos Planta propuesta de diseño

Apéndice E. Planos Implementación peletizado

Resumen

Título: Planta prototipo para la fabricación de pellets y filamentos de impresión 3d elaborados a partir de botellas pet posconsumo*

Autores: Valentina Angel Romero, Carlos José Barrios Álvarez, Brayan Yesid Parada Martínez y Héctor Hernando Quintero Peláez **

Palabras Clave: PET, Peletizado, Extrusión, Filamento, Impresión 3D, Reciclaje.

Descripción:

La planta prototipo para la fabricación de pellets y filamentos de impresión 3D elaborados a partir de botellas PET posconsumo es un proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Industrial de Santander. Se encuentra en la modalidad de trabajo de investigación en el área de Diseño.

El proyecto es un aporte desde la ingeniería mecánica al reciclaje y el aprovechamiento de residuos plásticos de tipo PET, por medio de la implementación de una máquina a escala de laboratorio que permita, desde el aula universitaria, investigar y profundizar en los conocimientos de la transformación de plástico y su reutilización. Para tal fin, aplicando las estrategias de la gestión de proyecto, se indaga, evalúa e interviene la planta PET del Laboratorio de Mantenimiento de la escuela de Ingeniería Mecánica. Además, que, se realiza una implementación de la línea de peletizado y se propone un nuevo diseño que cumple con las recomendaciones de la teoría y la industria.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Heller Guillermo Sánchez Acevedo, Ph D. Ingeniería Mecánica. Codirector Germán Adolfo Díaz Ramírez, Ph. D. Ingeniería de Materiales.

Abstract

Title: Prototype plant for the manufacture of pellets and 3D printing filaments made from post-consumer pet bottles*

Authors: Valentina Angel Romero, Carlos José Barrios Álvarez, Brayan Yesid Parada Martínez y Héctor Hernando Quintero Peláez**

Key Words: PET, Pelletized, Extrusion, Filament, 3D Printing, Recycling.

Description:

The prototype plant for the manufacture of 3D printing pellets and filaments made from post-consumer PET bottles is a degree project to obtain the degree of Mechanical Engineer at the Universidad Industrial de Santander. It is in the modality of research work in the area of Design.

The project is a contribution from mechanical engineering to the recycling and use of PET plastic waste, through the implementation of a laboratory-scale machine that allows, from the university classroom, to investigate and deepen the knowledge of plastic transformation and reuse. To this purpose, applying the strategies of project management, the PET plant of the Maintenance Laboratory of the School of Mechanical Engineering is investigated, evaluated and intervened. In addition, an implementation of the pelletizing line is carried out and a new design is proposed that complies with the recommendations of the theory and the industry.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director Heller Guillermo Sánchez Acevedo, Ph D. Mechanical Engineering. Co-director Germán Adolfo Díaz Ramírez, Ph. D. Materials Engineering.

Introducción

La ingeniería al servicio de la protección y recuperación del medio ambiente es un área de innovación en ascenso que apunta hacia la exploración de alternativas enfocadas hacia la sostenibilidad ambiental y la economía circular, esto se debe a la problemática creciente relacionada con el aprovechamiento de los residuos, especialmente los de tipo plástico. Este proyecto de grado indaga y lleva a la experiencia, desde la ingeniería mecánica, procesos de transformación de plástico encaminados hacia el aprendizaje, la evaluación y la intervención de la planta para la fabricación de pellets y filamentos ubicada en el laboratorio de mantenimiento de la Escuela de Ingeniería Mecánica, a su vez que se enfoca hacia el reciclaje de las botellas PET para generar productos que sean usados en áreas de ingeniería aplicada, como la manufactura aditiva.

En el libro se presenta de manera detallada el proceso realizado para cada uno de los tres sistemas que conforman la planta: sistema trituradora, sistema extrusora, sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado. Partiendo del reconocimiento de las condiciones iniciales de los equipos y el planteamiento de las evaluaciones teórico-funcionales, se muestran los informes de las pruebas y el diseño mecánico ideal bajo las condiciones y requerimientos del laboratorio, finalizando con las actividades de intervención a la planta actual y la implementación de una línea de peletizado.

1. Formulación del problema

En un contexto general, según National Geographic: “el rápido aumento de la producción de plástico desborda la capacidad del mundo para tratarlos.” (Parker, 2019) Esto se evidencia en que hacia “1950, el mundo producía sólo 2 millones de toneladas al año y para 2015, la producción anual se había multiplicado por casi 200, alcanzando los 381 millones de toneladas.” (Ritchie, 2018) de las cuales, “alrededor del 30% del plástico producido en todo el mundo está en uso. De la cantidad restante, se calcula que el 90,5% nunca fue reciclado, mientras que solo el 9,5% obtuvo el tratamiento correspondiente.” (Greenpeace Colombia, 2019). Es decir que, de los residuos plásticos que se produjeron, muchos pudieron terminar en océanos, ríos y zonas ambientales, afectando la fauna, la flora y el equilibrio ecosistémico.

La situación en Colombia es igual de preocupante, según el Plan nacional para la gestión sostenible se estima que cada colombiano utiliza alrededor de 26 Kg de plástico al año (MinAmbiente , 2021), lo que al día “cada hogar colombiano genera casi 4.5 kilos de plástico basura al día” (Greenpeace Colombia, 2019), para lo cual, no existe una política contundente que garantice un procesamiento adecuado del posconsumo, lo que termina generando un mayor nivel de contaminación.

Teniendo lo anterior en cuenta, surge el interés de realizar un aporte desde la ingeniería mecánica, por medio de la implementación de una máquina a escala de laboratorio que permita desde el aula universitaria, investigar y profundizar en los conocimientos en ingeniería aplicados al reciclaje y el aprovechamiento de residuos plásticos de tipo PET. El estudio se propone como

una alternativa sostenible para aprovechar el material de las botellas PET de consumo personal (250 ml – 600 ml) que se desechan en la UIS, encaminado a la profundización en ingeniería de materiales y manufactura aditiva por impresión 3D.

Para tal fin, se toma para evaluación, intervención e implementación la trituradora, la extrusora y la enrolladora recientemente adquiridas para el Laboratorio de mantenimiento de la Escuela de Ingeniería Mecánica, las cuales no se encuentra en las mejores condiciones de operación, no está totalmente articulada, ni tiene un sistema de enfriamiento estructurado, además que no cuentan con manual, ficha técnica o algún documento relacionado con las características mecánicas y de diseño de la máquina.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Implementar una planta prototipo, a escala de laboratorio ubicada en el Laboratorio de Mantenimiento de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para reciclaje de PET posconsumo, por medio de la evaluación, diseño y acondicionamiento de los procesos de triturado y extrusión, para la producción de pellets y filamento de impresión 3D.

2.2 Objetivos específicos

- Proponer un diseño mecánico mejorado, a escala de laboratorio, de un sistema de triturado para botellas PET posconsumo, a partir de los requerimientos y las condiciones de diseño obtenidos de un análisis funcional de los parámetros de operación de corte y el tamaño de la hojuela realizado a la trituradora existente en el Laboratorio de Mantenimiento de la Escuela de Ingeniería mecánica.
- Proponer un diseño mecánico mejorado, a escala de laboratorio, de un sistema extrusor de tornillo y un sistema de producción de filamento para botellas PET posconsumo, a partir de los requerimientos y las condiciones de diseño obtenidas del análisis teórico - funcional de los parámetros de operación y la topología de la máquina existente en el Laboratorio de Mantenimiento de la Escuela de Ingeniería mecánica.

- Implementar las mejoras obtenidas a partir del informe del análisis teórico-funcional y las propuestas de diseño, para obtener una planta prototipo, a escala de laboratorio, en condiciones de operación.
- Diseñar y construir, a escala de laboratorio, un sistema de producción de pellets conformado por un cabezal, un subsistema de corte y un subsistema de enfriamiento, que se acople al sistema extrusor de tornillo del Laboratorio de mantenimiento de la EIM.
- Gestionar el diseño y el montaje de los subsistemas de triturado, extrusión, producción de pellets y producción de filamento en un conjunto que funcione como planta prototipo, a escala de laboratorio, por medio de la articulación del equipo de trabajo y los elementos de continuidad.

3. Justificación

La implementación de una planta prototipo que permita el reciclaje y reutilización de un plástico de uso común como el PET de las botellas de consumo personal, es un proyecto que contribuye a la formación profesional, así como el desarrollo de la comunidad universitaria UIS. Esto se debe a que se formula una alternativa desde la ingeniería para el aprovechamiento de un residuo que se genera dentro del campus, además que invita a una mayor conciencia acerca de la clasificación de los residuos y los beneficios de futuros procesos de transformación de la materia.

De igual modo permite que, desde el aula, a escala de laboratorio, se beneficie el aprendizaje acerca de las máquinas que conforman la planta y vinculan las diversas ciencias que

se estudian a lo largo de la formación profesional, como lo es la mecánica de sólidos, la mecánica de máquinas, la termodinámica, la transferencia de calor, los materiales y la mecatrónica. A su vez que, se profundiza en procesos de manufactura y mantenimiento de la transformación del plástico.

Ahora bien, como sociedad en general, el manejo de los envases PET posconsumo conllevan una responsabilidad social, política, industrial y económica que representa cambios a futuro y en la actualidad, no sólo en el ámbito de la consciencia ambiental sino también en el desarrollo de tecnologías y metodologías sostenibles que permitan recuperar el medio ambiente y retrasar los efectos de los daños causados. El PET transformado en pellet o en filamento funciona como materia prima para nuevos procesos de manufactura. En el caso del pellet, se puede emplear en la fabricación de nuevas botellas o en prótesis médicas, así como un gran número de aplicaciones en fibras o piezas especiales para la industria agrícola, textil y en la eléctrica y la electrónica. En el caso del filamento para impresión 3D, posibilita los beneficios de la manufactura aditiva a pequeña escala: prototipos de modelos de ingeniería, aplicaciones en el diseño gráfico o arquitectura, en procesos de investigación o elementos de uso industrial.

4. Marco teórico

Una planta de procesamiento de plástico se conforma de la articulación de diversos sistemas mecánicos: triturado, extrusión, enrollado, enfriamiento, entre otros., que conllevan tareas de diseño de evaluación de alternativas y conceptos teóricos de la ingeniería, aplicada a la función principal y los requerimientos. Para tal fin, se presentan los referentes teóricos y antecedentes.

4.1 Referentes Teóricos

En primer lugar, se presentan los referentes teóricos como la caracterización del PET, los principales procesos de la planta y sus producidos: filamento para impresión 3D y pellets.

4.1.1 PET - Tereftalato de polietileno

El tereftalato de polietileno, conocido comúnmente como PET, es un termoplástico semicristalino que se obtiene mediante un proceso de polimerización de ácido tereftálico y monoetilenglicol. (Acoplásticos, 2022) Es un material no renovable fabricado a partir de derivados del petróleo o del gas natural que acepta perfectamente su reciclado. Sus características son la pureza, la alta resistencia al desgaste, la tenacidad, la maleabilidad y la resistencia química, además que no es tóxico y tiene alta compatibilidad con otros materiales. (Canale, 2015), esto permite que sea empleado en procesos de transformación de plástico como extrusión, inyección – soplado y termoformado (MinAmbiente, 2004). Sus propiedades se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Propiedades del PET

PROPIEDAD	VALOR
Peso molecular	192 g/mol ^a
Densidad	1.4 g/cm^3 ^a
Dureza rockwell R	105 – 125 ^c
T° de transición vítrea	69 – 115 $^{\circ}C$ ^a
Elongación %	3.5 – 5.83 % ^c
Resistencia a la tracción	90 MPa ^c
Resistencia a la rotura	95.0 MPa ^c
Resistencia la impacto	82 KJ/m^2 ^d

Nota: Recopilado ^a (Awaja & Pavel, 2005) ^b (García Sánchez, 2017) ^c (MatWEB, 2022) ^d (Lork Industrial SL, 2022)

No obstante, a pesar de sus excelentes características para ser reciclado, el historial térmico que tiene el material al momento de su reutilización representa cambios en el rendimiento térmico, evidente en la tabla 2. Esto conlleva a que las características del PET reciclado, denominado RPET,

varíen al igual que su proceso de transformación, por tanto, su aprovechamiento no puede ser del 100%, debe mezclarse en una proporción con el material virgen.

Tabla 2.

Propiedades del PET virgen vs. Pet Reciclado

PROPIEDAD	<i>PET Virgen</i>	<i>RPET</i>
Densidad	1.4 g/cm ³ ^a	1.27 g/cm ³ ^d
Dureza rockwell R	105 – 125 ^c	105 ^d
T° de transición vítrea [<i>T_g</i>]	80 – 115 °C ^a	70 – 80 °C ^e
T° de fusión [<i>T_m</i>]	256 – 271 °C ^b	235 – 245 °C ^e
Resistencia a la flexión	135 MPa ^c	70.6 MPa ^d
Módulo de flexión	3500 MPa ^c	2148 MPa ^d
Elongación última %	20 % ^c	120% ^d
Resistencia a la tracción	90 MPa ^c	50 MPa ^d

Nota: Propiedades del Pet Reciclado tomado de de ^a (Awaja & Pavel, 2005) ^b (García Sánchez, 2017) ^c (MatWEB, 2022) ^d (Material Data Center, 2022) ^e (Kiliç & Yilmaz, 2020)

De acuerdo con algunos estudios sobre la proporción correcta entre el PET virgen y RPET, entre mayor sea la presencia de plástico reciclado menos estables serán sus propiedades fisicomecánicas. Las mejores características se obtienen entre 7 partes de PET virgen a 3 partes de RPET a 9 partes de PET virgen a 1 parte de RPET (Gomez, et al. 2014)

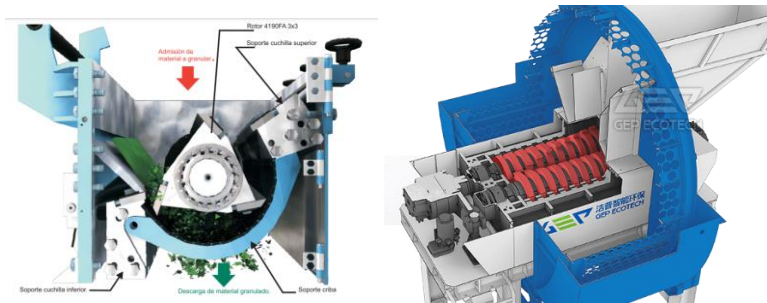
4.1.2 Triturado de plástico

Para una correcta transformación y aprovechamiento de los plásticos es imprescindible triturarlos hasta el tamaño requerido para la necesidad de extrusión. Esto se logra por medio de sistemas mecánicos como cuchillas, molinos de martillos, de cizalla o de gránulos (Compactor Management Company, 2022). Así mismo, para este proyecto de grado se estudia una trituradora de tipo cuchilla donde, el giro constante de las cuchillas mezcla, tritura y muele los residuos de plástico, logrando una mezcla homogénea que facilitan el proceso de reciclaje (Sandoya & Macias,

2021). Entre las posibles configuraciones de estos sistemas de triturado pueden ir entre un eje (Figura 1, izq.), dos ejes (Figura 1. dcha.) hasta cuatro ejes de acuerdo con el tamaño del material a triturar.

Figura 1.

Trituradora de único eje y par de ejes



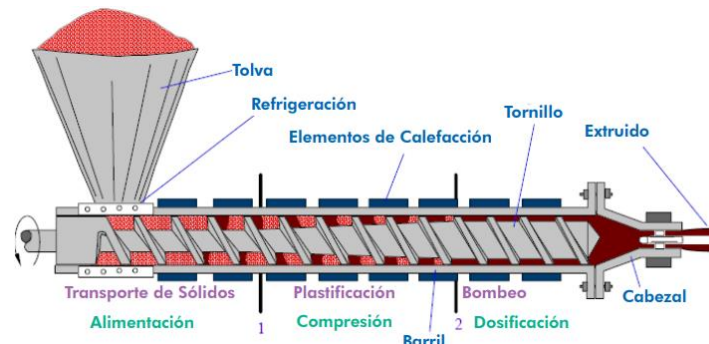
Nota: (Izq.) Trituradora único eje, tomado de (Cardenas, Shomar, & Solorio, 2012). (dcha.) Trituradora par de ejes, tomado de (GEP EcoTech, 2022)

4.1.3 Extrusión de plástico

Es el proceso de transformación de plástico que emplea el comportamiento térmico del material, trabajando entre su temperatura vítrea [T_g] y su temperatura de fusión [T_m], para obtener cambios en la forma y en las propiedades físicas. Consiste en ejercer presión y calor de una forma continua y uniforme para obtener el estado plástico del material, y moldearlo por medio de cabezal con boquilla de una geometría específica (Beltrán & Marcilla, 2012). Esto se logra a través de un tornillo sin fin y un cilindro de suministro de calor, concepto que se evidencia en la Figura 2. Está dividido en tres zonas geométricas de acuerdo la etapa del proceso: alimentación, en el ingreso del material y el comienzo del calentamiento: transición, la compresión del fluido y dosificación, donde alcanza su temperatura vítrea y se moldea para la salida por la boquilla.

Figura 2.

Zonas del tornillo.



Nota: Tomado de (Bornacelli & Gutiérrez, 2008)

Ahora bien, en la industria se emplean con más frecuencia las extrusoras de tornillo gracias a su universalidad de aplicación, gran producción, grado de automatización, y continuidad del proceso (Savgorodny V. K., 1978). Las cuales, tiene a su vez, gran variedad de parámetros de funcionamiento como la cantidad de materia, el tipo de material, el tipo de suministro de energía, las opciones de transformación de la potencia, el método de calentamiento, el método de enfriamiento en el postproceso, el modo de enrollado o de corte, entre otros.

4.1.4 Peletizado

Es el proceso de moldear un material en forma de pellets, que típicamente tienen forma de disco y son producidos en una cortadora de placa o son cilindros en ángulo recto que se fabrican en una línea de cadenas o hebras. (ColorPlastic, 2021). Son la opción de geometría preferida para moldeado por inyección, extrusión de perfiles, y mezcladores que reintroducen recuperados de desperdicios en los procesos con material virgen, convirtiéndolo en uno de los procesos más efectivos para el reciclaje. Hay tres alternativas que se consideran para la producción de pellets: peletizadoras de hebras o filamentos, peletizadoras de anillos de agua, y peletizadoras bajo agua. (Gester, 2020). En cada una de ellas, se obtienen pellets de diversa geometría, como se observa en

la Figura 3, y se definen de acuerdo con la disponibilidad de los equipos, el presupuesto, el espacio, el costo de mantenimiento y el requerimiento de material.

Figura 3.

Geometría de granulado según el tipo de peletizadora



Nota: (izq.) Pellets tipo filamento, son cilíndricos y planos. (centro) Pellets por anillo de agua, son discos redondeado. (dcha.) Pellets bajo agua, son esféricos y de mayor densidad. Tomado de (Plastics Technology, 2019)

4.1.5 Filamento para impresión 3D

La tecnología de impresión 3D permite más posibilidades de crear estructuras complejas a pequeña escala (Mikula, Skrzypczak, Izydorczyk, & al., 2021), dada la simplicidad, rapidez y bajo costo que conlleva la implementación de esta tecnología. En ella, se emplea una gran variedad de materiales como el PLA, el PETG, el TPU y el ABS; que se eligen de acuerdo con la funcionalidad del producto final (Bordignon, Iglesias, & Hahn, 2018), y las propiedades requeridas: elasticidad, resistencia, dureza, color, acabado, etc. En el caso de los materiales reciclados, la mezcla en proporción con el material virgen permite que sea apto para impresión 3D siempre y cuando manejen un diámetro constante y tenga un esquema térmico adecuado. El PET es de lo plásticos que más se reutilizan para procesos de manufactura aditiva, debido a sus propiedades elásticas y de resistencia, además su compatibilidad con elementos de sector alimenticio y farmacéutico.

4.2 Antecedentes

Parte del proceso de diseño en ingeniería mecánica corresponde al análisis de alternativas y la revisión bibliográfica que busca establecer alcances, mejoras y referentes. Esto se gestiona a

distintos niveles de acuerdo con las necesidades, el contexto social, el tamaño de la población, la ubicación, el nivel de avance tecnológico, etc.

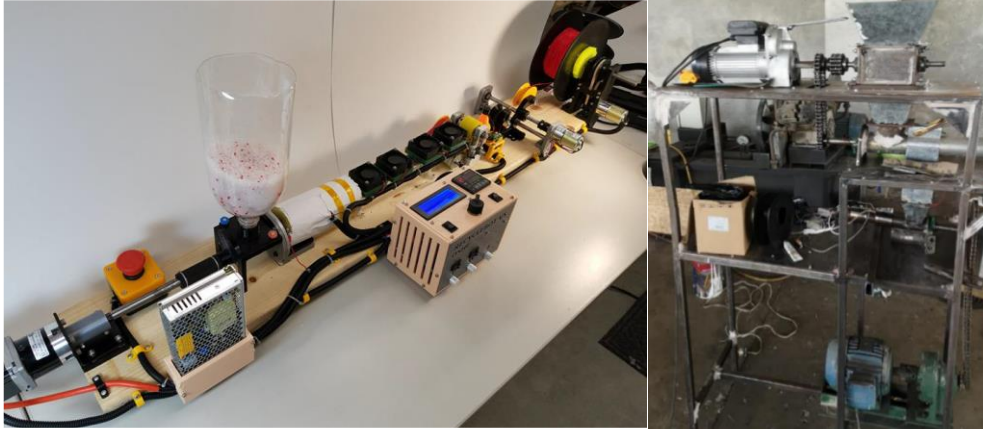
4.2.1 Antecedentes a nivel internacional

El interés por el aprovechamiento de residuos plásticos por medio del triturado, la extrusión y el peletizado a pequeña escala; es creciente y experimental. Desde el ámbito internacional, se proponen alternativas diversas y asequibles. Entre ellas, se encuentra el RepRapable Recyclebot (Woern, McCaslin, Pringle, & Pearce, 2018) que es un extrusor de plástico posconsumo capaz de fabricar filamento de impresión 3D de calidad comercial, Figura 4. El diseño del dispositivo aprovecha la metodología del hardware de open source, donde se rescata la búsqueda de una interacción de usuario-máquina sencilla que optimice el procesamiento del plástico por medio de la implementación de un diseño modular, que pueda convertirse o reemplazarse para satisfacer las necesidades específicas.

De igual modo, se establecen referentes importantes para el diseño articulado de una planta para procesamiento de plástico donde se plantea un análisis conceptual para definir sus componentes principales y subsistemas, seguido del dimensionamiento, selección de materiales y mecanismos empleados apoyados en la confiabilidad y la seguridad para el operario (Sandoya & Macias, 2021). En la Figura 4 se puede evidenciar su propuesta de planta a escala de laboratorio. Se concluye que la parte más crítica de la planta es el tornillo extrusor, donde ocurre el proceso térmico de transformación del plástico. Para realizar su diseño de forma correcta, (Parra, 2017) en su diseño a pequeña escala, propone el uso de las ecuaciones que establece (Savgorodny V. K., 1978) para tornillos de extrusión.

Figura 4.

Antecedentes internacionales: Plantas a pequeña escala

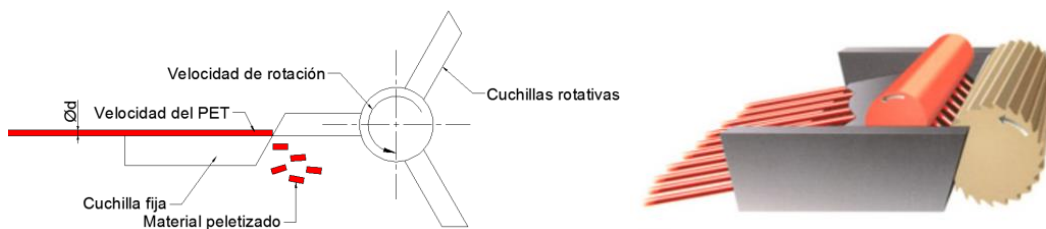


Nota: (izq) Planta para procesamiento de plástico en Ecuador, tomado de (Sandoya & Macias, 2021) (dcha.) RepRapable Recyclebot USA, tomado de (Woern, McCaslin, Pringle, & Pearce, 2018)

Por otra parte, para el peletizado (Cobos Maldonado, 2011) plantea diversas alternativas de corte para el peletizado de acuerdo con la teoría de (Morton-Jones, 1997), en la Figura 5 izq. se observa el corte por cuchilla sencilla en rotación y en la derecha se presenta el rotor de corte. Cada una responde a necesidades de costo, requerimiento y escala.

Figura 5.

Antecedentes internacionales: Corte peletizado



Nota: (izq) Corte por cuchilla en Ecuador, tomado de (Cobos Maldonado, 2011) (dcha.) Corte por rodillo, según Morton- Jones, tomado de (Morton-Jones, 1997)

4.2.2 Antecedentes a nivel nacional

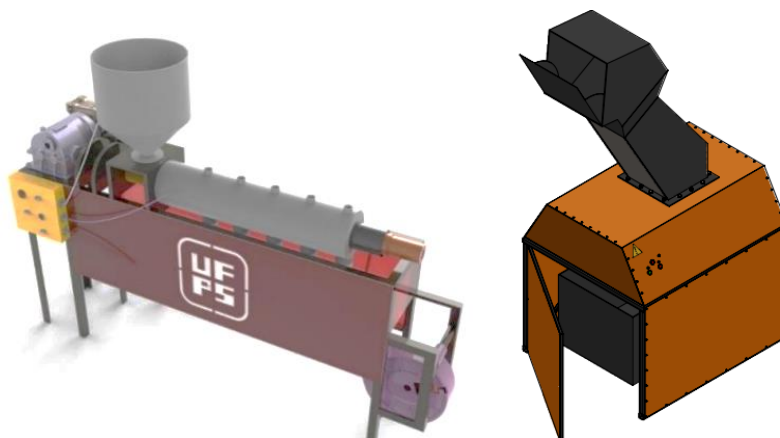
En Colombia, desde la academia de la educación superior y los procesos de investigación en las empresas, ha sido creciente los estudios acerca de los procesos de transformación de

plásticos en la búsqueda para mitigar los efectos medioambientales. Esto teniendo en cuenta los diversos tipos de plásticos y los requerimientos fisicomecánicos que conlleva su procesamiento, además de la escala de trabajo y el propósito final del material aprovechado.

Por ejemplo, en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, la industria de la producción de mangueras en colaboración con la Universidad de Francisco de Paula Santander, requería de una forma de reutilización de material que permitiera aumentar la producción a bajo costo, para lo cual se presenta el diseño de una máquina extrusora de único tornillo (Barbosa, 2017); que permite explorar de primera mano los procesos de transformación térmica y física del plástico, se muestra en Figura 6 dcha. Desde otra perspectiva, Recuplast S.A.S en convenio con la Universidad Libre (Gaitan, 2018), emplea ingeniería inversa sobre los modelos industriales para extraer sus principios físicos, su forma, su funcionalidad y aplicarlos a sus requerimientos por medio del diseño modular, en la Figura 6 izq. se muestran los resultados.

Figura 6.

Antecedentes Nacionales: Trituradora y Extrusora

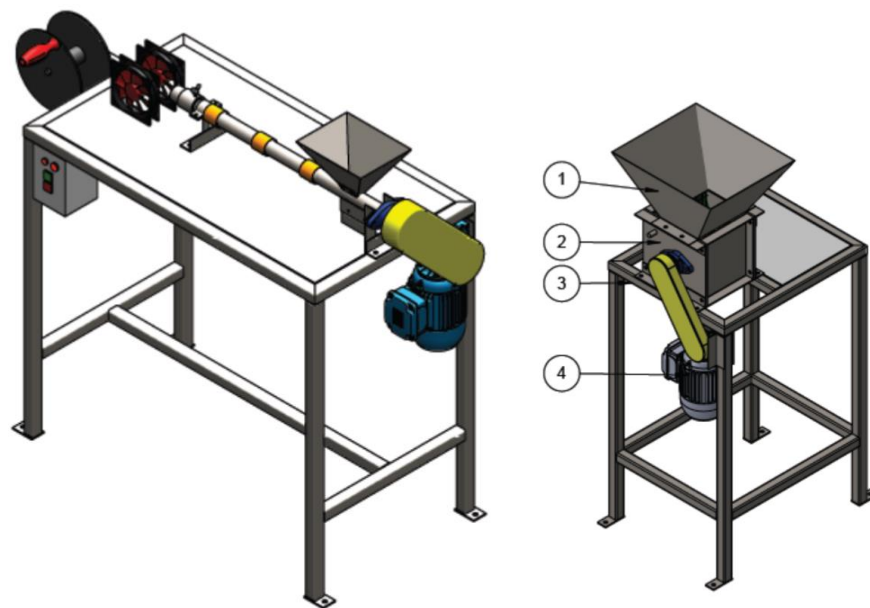


Nota: (izq) Modelo CAD del molino triturador para polímeros termoplásticos, tomado de (Gaitan, 2018) (dcha.) Extrusora de plástico para los productores de mangueras de Ocaña, tomado de (Barbosa, 2017)

En diversas partes del país se han enfocado en crear propuestas, desde el diseño mecánico, de máquinas recicladoras y transformadoras de plástico, como trituradoras (Acosta & Martínez, 2014) y extrusoras (Piñeros & Acosta, 2019). A nivel local, lo más cercano es el estudio de una planta de procesamiento de plástico realizado en las Unidades Tecnológicas de Santander (Galán & Ojeda, 2020), se presenta en la Figura 7. Sin embargo, muy pocos de estos esfuerzos se han hecho tangibles, la mayoría de los estudios terminan en validaciones con software y estudios de viabilidad en costos.

Figura 7.

Diseños nacionales máquinas de transformación de plástico



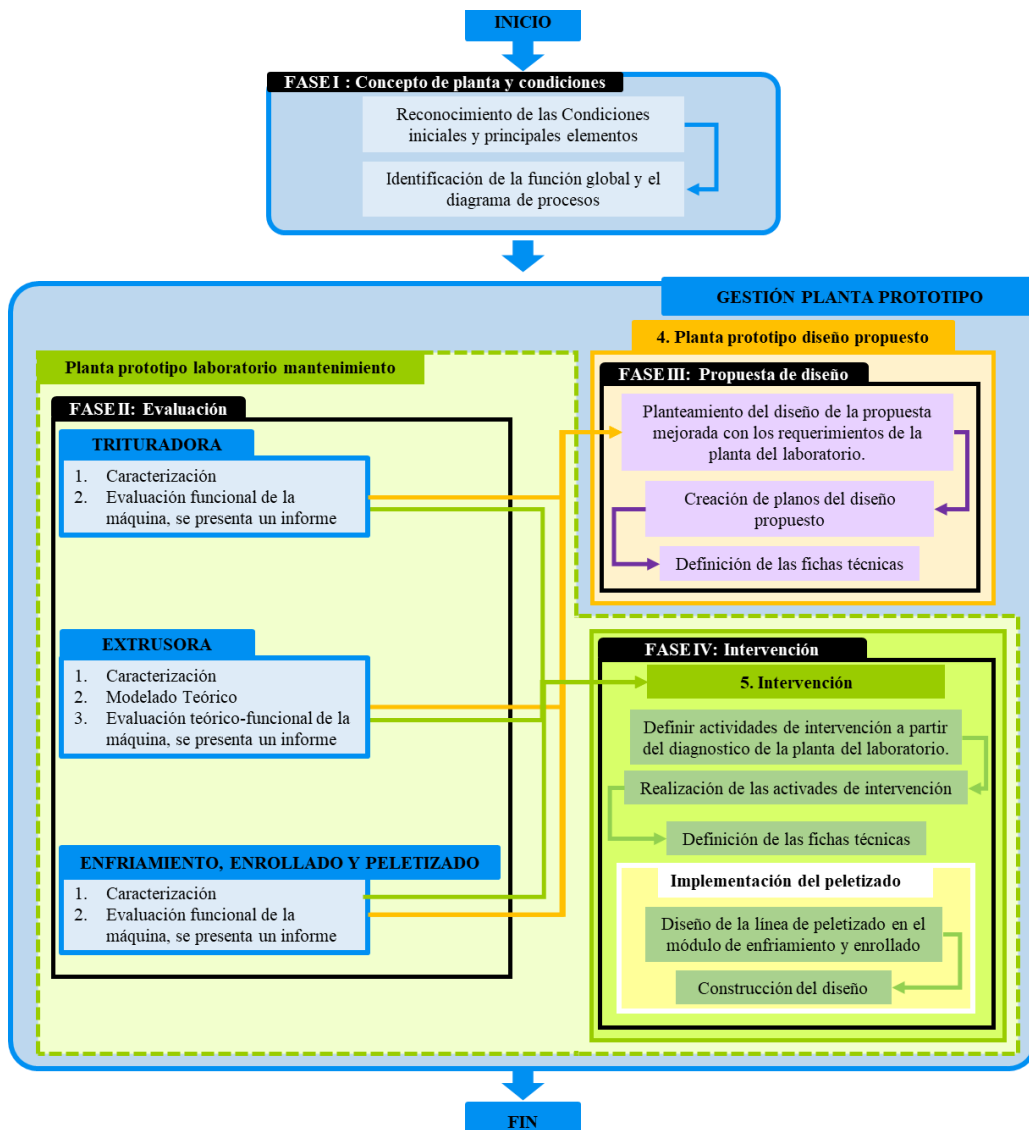
Nota: Modelo planta UTS, tomado de (Galán & Ojeda, 2020)

5. Metodología

La metodología del proyecto se plantea desde la implementación de una planta prototipo para la producción de pellets y filamentos que parte de una máquina ya existente en el Laboratorio de mantenimiento, de la que no se tienen conocimientos técnicos acerca de su funcionamiento y su diseño, además que es de segunda. En la Figura 8, se presentan las fases y el orden de las actividades para llevar el cumplimiento de los objetivos específicos.

Figura 8.

Metodología del proyecto



Se da inicio el proyecto desde una etapa preliminar (fase I) donde se contextualiza y se hace un reconocimiento de las condiciones iniciales de los equipos para identificar el alcance de las fases de evaluación e intervención, y tener una vista general de los elementos a diseñar en la propuesta. Las fases II, III y IV se desarrollaron en el marco de la gestión de la planta prototipo, por medio de estrategias creadas a partir de la metodología de los *Fundamentos de la dirección y gestión de proyectos* de (Poveda, González, & Gómez-Senent, 2011) que hacen alusión a los aspectos organizativos, de ejecución, toma de decisiones, seguimiento de las actividades y tareas administrativas que implica la realización de un proyecto de ingeniería aplicada y que se acoplaron a las condiciones y requerimientos de nuestro proyecto.

5.1 Fases del proyecto

5.1.1 Fase I: Concepto de planta y condiciones iniciales

Definir el diseño conceptual de una planta de transformación de plásticos a partir del análisis de caja negra que relaciona la función principal con las condiciones de entrada y de salida. Esto permite establecer un análisis general de las condiciones iniciales del equipo y un reconocimiento de los principales elementos que lo componen, de modo que se realiza un diagrama de procesos con el que se determinan las actividades para la evaluación teórico-funcional de la máquina, el diseño propio y la implementación de la línea de peletizado.

5.1.2 Fase II: Evaluación

A partir de las condiciones iniciales del conjunto de máquinas, se debe llevar a cabo un análisis teórico y funcional que permita diagnosticar las condiciones de operación de los equipos, su capacidad de producción y el estado de los elementos que lo componen, así como sus parámetros

de diseño. Al final se obtiene un informe y una ficha técnica de cada máquina. Para tal fin se plantean tres pasos a seguir:

5.1.2.1 Caracterización

- Determinar los parámetros básicos de los elementos de la máquina: tipo de tornillo, tipo de resistencias, tipo de trituradora, tipo de enrollado, tipo de alimentación energética, tipo de control, etc.
- Revisión del control y la electrónica.
- Dimensionar los principales componentes de cada subsistema de la planta. Realizar el desmonte de la máquina.

5.1.2.2 Modelo teórico

- Realizar un modelado matemático en el programa EES (Equation Engineering Solver) de los diferentes procesos que ocurren en la planta a través de elementos como la transferencia de calor, la termodinámica, el diseño mecánico y la mecánica de fluidos.

5.1.2.3 Análisis y resultados

- Realizar el análisis funcional a la trituradora para determinar valores de operación: flujo másico, tamaño de la hojuela producida y potencia consumida.
- Realizar el análisis teórico-funcional de la extrusora para determinar los datos de funcionamiento: potencia, flujo másico, revoluciones.
- Determinar valores de operación del sistema enfriamiento y enrollado del filamento para determinar la velocidad de trabajo.

5.1.3 Fase III: Propuesta de diseño

Se usa la metodología del proceso básico de diseño PBD a partir de los resultados de las fases anteriores, donde se estableció el diseño de concepto, se definieron los requerimientos de cada máquina y mediante el funcionamiento de los equipos se evidenciaron sus puntos críticos y las cosas por mejorar. Para el diseño en detalle, se busca y aplica la teoría para la trituradora, la extrusora y el sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado, para ser consignado en las memorias de cálculo y modelarlo usando el software SolidWorks. Finalmente, se realizan los planos de fabricación con las especificaciones.

5.1.4 Fase IV: Intervención

Esta fase se divide en dos etapas: actividades de intervención a los sistemas ya existentes en la máquina del laboratorio e implementación de la línea de peletizado al módulo de enfriamiento y enrollado. Para la primera etapa, teniendo en cuenta los resultados de la evaluación y las conclusiones de la propuesta de diseño se definen cuáles deben ser las actividades de intervención a la planta acorde con el alcance y el presupuesto del proyecto. Para la segunda etapa, se debe realizar un diseño acoplable al módulo existente por medio de la metodología del diseño del PBD: diseño de detalle, para la obtención de los planos, y prototipado y construcción, por medio de la manufactura de los elementos y las pruebas de funcionamiento.

6. Concepto de Planta y Condiciones

Como primera fase del proyecto se expone el diseño de concepto de la planta general, donde se establecen las condiciones iniciales de la máquina del Laboratorio de Mantenimiento, los parámetros principales y los elementos que definen las características básicas para el diseño.

6.1 Condiciones iniciales

La máquina ubicada en el Laboratorio de Mantenimiento de Ingeniería Mecánica se compone de tres módulos: triturado, extrusión y enrollado. Es segunda mano y no cuenta con manual, ficha técnica o algún documento relacionado con las características mecánicas y de montaje de la máquina. En la Figura 9 se muestra la planta como se recibió.

Figura 9.

Planta ubicada en el Laboratorio de mantenimiento



A continuación, en la Tabla 3, se presentan los módulos de la planta, sus componentes, las observaciones generales de la inspección que se realizó y una fotografía.

Tabla 3.

Inspección Inicial

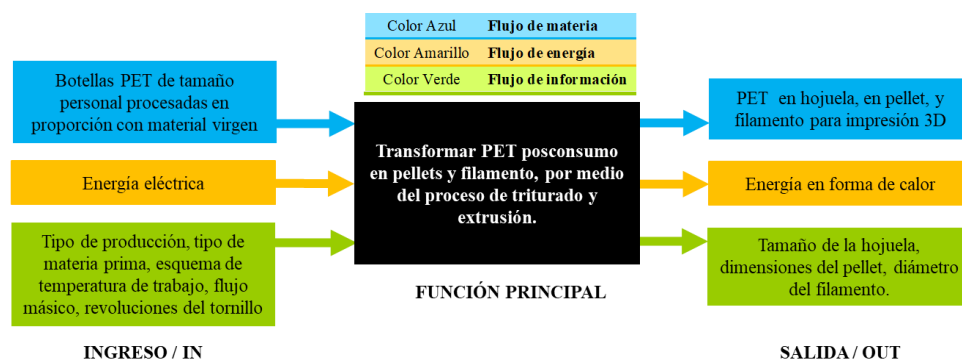
Nombre	Componentes	Inspección inicial	Fotografía
<p>TRITURADORA Único eje, bajas revoluciones</p>	<p>Motor, la cámara de trituración con tolva y la caja de control con inversor.</p>	<p>Se observa óxido en las cuchillas, que puede producir un cambio de composición química del material procesado; falta de caja eléctrica propia con algún tipo de protección eléctrica, la maquina podría atorarse y sobrecalentarse.</p>	
<p>EXTRUSORA Tipo único tornillo</p>	<p>Motor, reductor de velocidad, tolva, tornillo con camisa, resistencias, cabezal, variador de frecuencia y caja de control de temperaturas.</p>	<p>Se observan problemas en la altura de la entrada de la tolva, en el ancho del acople de la boquilla con la camisa del tornillo, es demasiado robusta para calentarse, el sistema eléctrico es de difícil alcance. Falta una limpieza y mantenimiento general.</p>	
<p>ENROLLADO Y ENFRIAMIENTO</p>	<p>Motor, tensor de filamento, transmisión para enrollar y caja de control</p>	<p>Se observa que no hay un método de enfriamiento concreto y la distancia en la mesa es muy corta para garantizar un correcto enfriamiento por convección natural, además, las poleas están en exposición directa con el operario. El rodillo con tensor para el filamento es muy pesado, podría aplastar el filamento su paso.</p>	

6.2 Función global y diagrama de procesos

El diseño de concepto general de una planta para la producción de pellets y filamentos, parte de la función principal, las características de la materia prima y las condiciones de salida del producto; para establecer los flujos de materia, de energía y de información que determinan los sistemas y subsistemas de los elementos mecánicos y de control que componen la planta. Para tal fin, se emplea el diagrama de bloques de caja negra, como el modelo básico de funcionamiento de la planta. En la Figura 10 se muestra por color el tipo de elemento que se transforma en la máquina.

Figura 10.

Diagrama de bloques – caja negra



6.2.1 Función Principal

Transformar PET posconsumo en pellets y filamento para impresión 3D, por medio de un proceso de triturado y extrusión. Esta se cumple por medio de la articulación en serie de la trituradora, la extrusora y el sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado. Según el proceso que se realiza, sea peletizado o producción de filamento, se acopla una boquilla al cabezal de la máquina extrusora. En el caso del peletizado, son múltiples agujeros de salida de material en estado plástico que luego del enfriamiento pasan a un sistema de corte que produce pellets. Para el caso de la producción de filamento, se compone de una boquilla con único orificio de salida,

correspondiente al diámetro del filamento: 1,75 mm, el hilo pasa a través de una guía hacia un sistema de poleas para el enfriamiento y luego, para el enrollado en carrete.

6.2.2 Condiciones de entrada

Al sistema ingresan tres elementos: la materia prima, la energía eléctrica y la información. En primer lugar, la materia prima son las botellas PET de consumo personal (250 ml – 600 ml) procesadas: sin tapa, etiqueta o sello de seguridad, deben estar lavadas (en agua fría y agua caliente), libres de cualquier residuo y aplastadas. Se debe tener en cuenta que el material que ingresa a la planta debe estar previamente clasificados de acuerdo con sus propiedades físicas: por color, densidad, fabricante, forma y tamaño. Una vez obtenido el material reciclado triturado, debe realizarse la mezcla con el material virgen para el ingreso a la extrusora, debido al historial térmico del material. Para esta planta prototipo se manejará 8 partes de material virgen por 2 partes de material reciclado.

Ahora bien, la energía eléctrica alimenta directamente los sistemas de control, de transmisión de potencia de la máquina y las resistencias térmicas. En los sistemas de información, donde se definen las condiciones de operación de acuerdo con el tipo de proceso que se realiza, ya sea peletizado o filamento, se define el esquema de temperaturas de trabajo, el flujo másico, las revoluciones del tornillo y la máquina que va conectada luego del proceso de extrusión.

6.2.3 Condiciones de salida

El PET, que ingresa como botella y material virgen, realizado el proceso de transformación, se convierte en hojuela, filamento o pellets. En la Tabla 4 se muestra la característica principal de salida de los productos de acuerdo con la planta que lo procesa.

Tabla 4.

Condiciones de salida de la planta del laboratorio y el diseño propuesto

	Planta laboratorio	Planta diseño propuesto
Triturado	Tiras de 8mmx20mm*	Hojuela de 8mmx8mm
Filamento	Ø 1,75 mm	Ø 1,75 mm
Pellets	Ø 4mm	Ø 4mm x 2-5 mm

*Nota: *El tamaño de las tiras de triturado de la planta de laboratorio no es constante, varían debido a la forma del filo de las cuchillas. El dato suministrado es una media aproximada.*

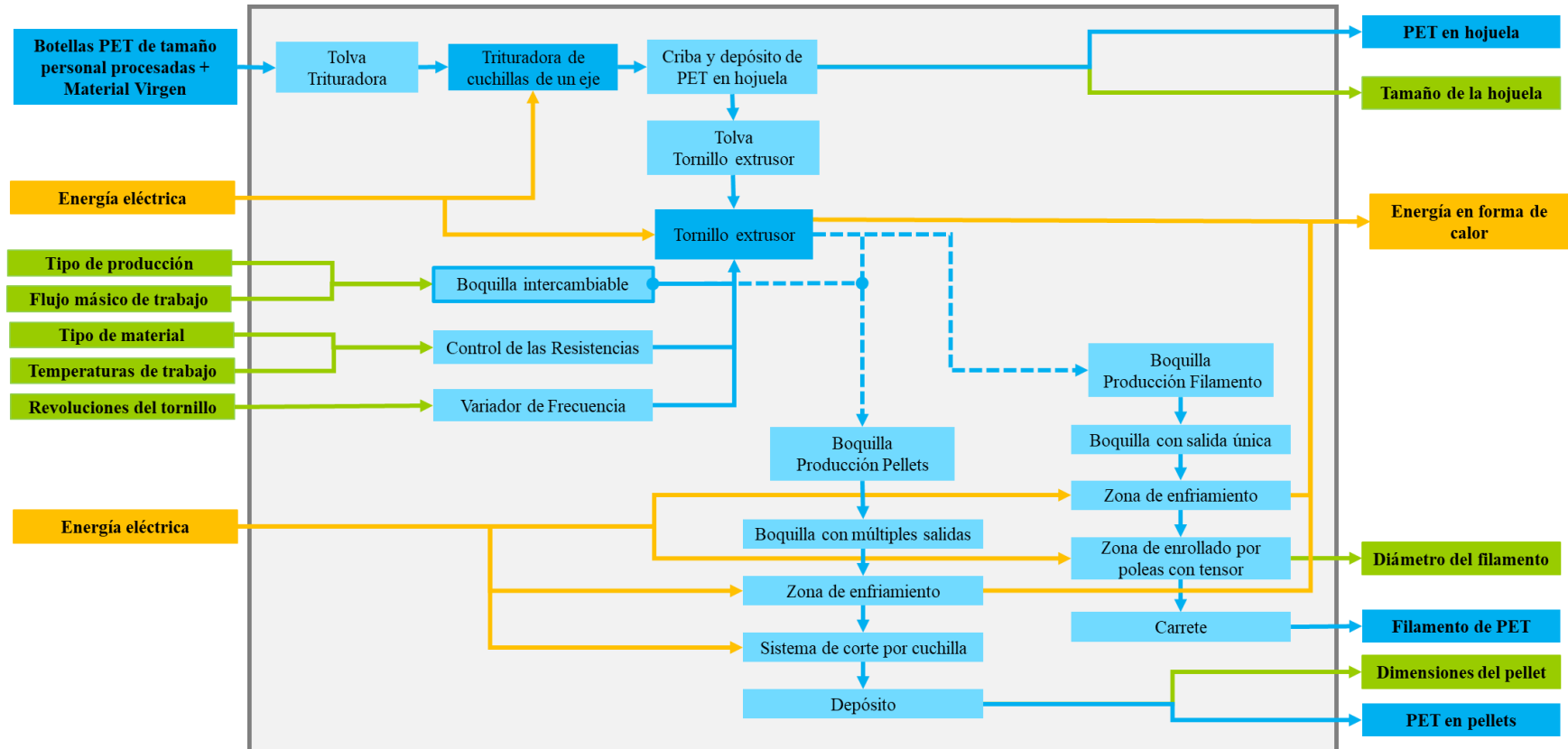
La energía que sale del sistema se libera en forma de calor a lo largo de todos los procesos de transformación. A su vez que la información que se obtiene permite describir la materia de salida, donde se caracterizan los productos en cuanto a sus dimensiones, apariencia y la cantidad procesada.

6.2.4 Diagrama de procesos

La función principal, las condiciones de entrada, de salida y las características de la materia a procesar, permiten definir específicamente la estructura organizacional de la planta y los procesos internos que cumplen con su propósito general, se presenta en la Figura 11 por medio del diagrama de caja gris. Este es un modelo estructural de concepto del diseño mecánico que organiza la planta al canalizar los flujos de materia, energía e información a través de los elementos mecánicos y de control que la conforman. En la Figura 11 se presenta el gráfico de caja gris donde la ruta azul es el flujo de materia, la ruta amarilla es el flujo de energía y la ruta morada es el flujo de información.

Figura 11.

Diagrama de procesos, caja gris, de la planta prototipo



Las rutas para los flujos en la planta permiten a su vez determinar la mejor forma de agrupar los sistemas y subsistemas de la máquina en concordancia con su funcionalidad, ubicación y nivel de importancia en el proceso de transformación del PET. En la Tabla 5 se muestran los grupos que se definieron para el proyecto.

Tabla 5.*Sistemas y subsistemas de la planta prototipo*

Planta prototipo para la fabricación de pellets y filamentos de impresión 3D elaborados a partir de botellas PET posconsumo	1. Trituradora
	1.1 Cuchillas Móviles
	1.2 Cuchillas Fijas
	1.3 Tolva
	1.4 Bastidor
	1.5 Motor
	2. Extrusora
	2.1 Camisa
	2.2 Tornillo
	2.3 Boquilla
	2.4 Boquilla para peletizado
	2.5 Tolva
	2.6 Motor
	3. Sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado
	3.1 Enfriamiento
	3.2 Enrollado
3.3 Peletizado	
4. Bastidor	

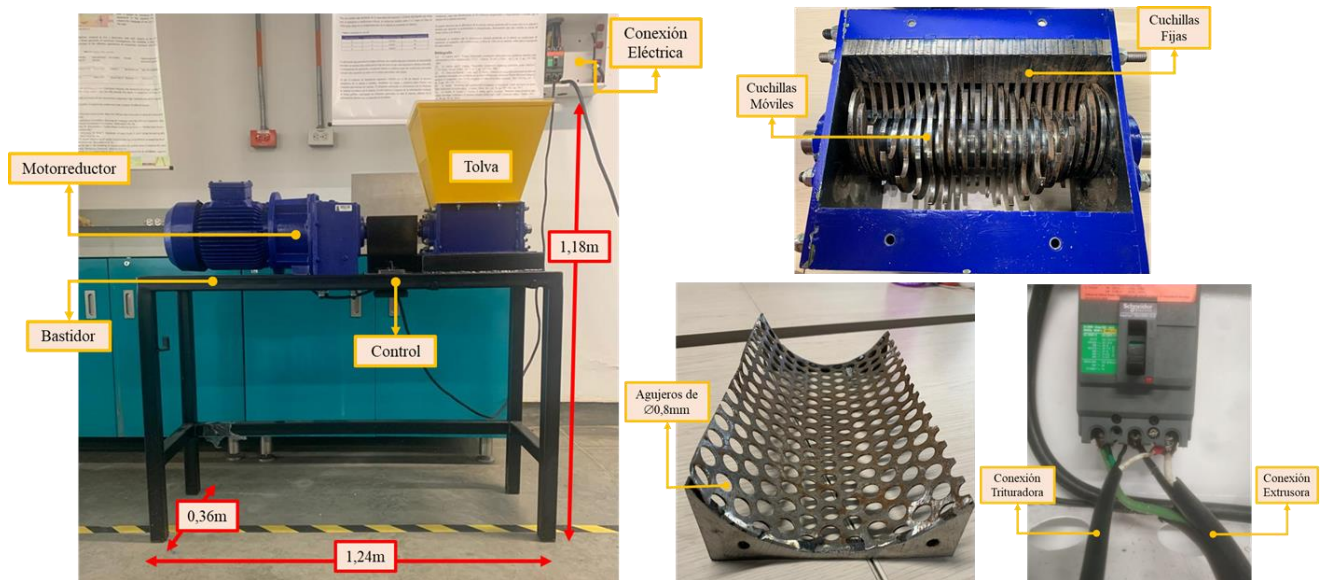
7. Sistema Trituradora

La caracterización, la evaluación, la propuesta de diseño y la intervención de la trituradora se presenta a continuación, de manera ampliada se encuentra en el Apéndice A.

7.1 Caracterización

La trituradora se conforma de los siguientes subsistemas, se identifican en la Figura 12:

- Motorreductor
- Subsistema de cuchillas móviles
- Subsistema de cuchillas fijas
- Tolva
- Bastidor
- Control

Figura 12.*Subsistemas de la trituradora.*

Es un sistema de triturado de un solo eje con capacidad para 2 botellas al tiempo, dispone de unos ganchos en el bastidor para la bolsa donde cae el producido. Se encuentra conectada directamente a la caja eléctrica del laboratorio y tiene una accionador directo en el inversor de la máquina.

Para conocer la capacidad de la máquina se realizó una prueba de funcionamiento, donde se trabajó de manera continua durante 10 min con botellas plásticas y se pesó el triturado producido. El valor estimado es de 2.7 Kg/h.

7.2 Informe del análisis funcional

El análisis funcional se realizó a partir de una evaluación de los componentes y su funcionamiento. En primer lugar, se evaluaron las conexiones eléctricas y los sistemas de protección y seguridad básicos. Se pueden evidenciar en la Tabla 6.

Tabla 6.

Evaluación primaria de la trituradora

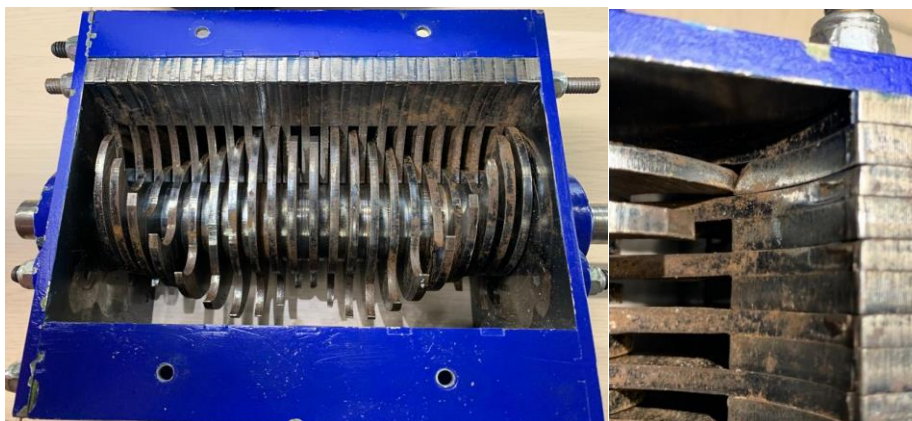
Componente	Si/no	Descripción
Protección eléctrica	NO	No tiene Breaker propio, ni contactor. Es un Breaker totalizador que comparte directamente con la extrusora.
Accionador (on-off)	NO	No, se acciona con el inversor directamente.
Piloto indicador de funcionamiento	NO	No, ninguno.
Protección del sistema de potencia	SI	Los elementos móviles del motorreductor se encuentran adecuadamente cubiertos.
Protección para el operario	SI	Lámina de acrílico como tapa de la tolva y las cuchillas están debidamente contenidas en la caja del bastidor.

En la prueba de funcionamiento del equipo, se encontraron problemas sobre los parámetros de diseño y operación, se muestran a continuación:

- Las cuchillas se encuentran oxidadas, debido a una mala selección de material en el diseño. Esto causa que el material que se tritura sea contaminado, afectando el comportamiento térmico del material y el resultado de la extrusión de este, se evidencia en la siguiente Figura 13. Sumado a lo anterior, el desgaste de las cuchillas es notorio, incluso hay algunas astilladas y de filo variable.

Figura 13.

Subsistema de cuchillas fijas y móviles



- El tamaño de la hojuela no es constante, ver Figura 14. Es muy grande para un proceso de extrusión, además que, su forma alargada y variable lo hace difícil de tomar para el tornillo sinfín.

Figura 14.

Tamaño de diferentes hojuelas en el triturado



La hojuela obtenida es alargada con una longitud variable entre 0.5cm y poco más de 3cm de largo además el ancho está alrededor de 5mm. El objetivo al triturar es tener una hojuela lo más estándar posible, de forma aproximadamente cuadrada. Esto ayuda con la homogeneidad de la mezcla con el PET virgen y con el flujo del material a través de la extrusora.

- En operación parte del material queda suspendido o atrapado, dado que las cuchillas no tienen la suficiente fuerza para procesarlo. Lo cual hace que la máquina se sobrecaliente y el material en ocasiones se pegue a las paredes de las cuchillas.

Finalmente, se tomaron las mediciones necesarias para desarrollar una ficha técnica dado que la máquina no tiene un registro de fábrica de sus parámetros. Se muestra en la Figura 15.

Figura 15.

Ficha técnica Trituradora del laboratorio

FICHA TÉCNICA TRITURADORA PARA PLÁSTICO		
Tipo de Trituradora	Único Eje Cuchillas	
Capacidad/Rendimiento	2,7 Kg/h	
Altura Total	118 cm	
Longitud Total	124 cm	
Ancho Total	36 cm	
Nº de Operarios	1	
Potencia	Inversor	Sí
	Motor	2 HP 220V 60 Hz Trifásico
	Diametro del Eje	25 mm
	Long Eje	410 mm
Cuchillas	Nº Cuchillas fijas	21
	Nº Cuchillas móviles	21
	Grosor de la Cuchilla	5 mm
Tolva	Apertura de la Tolva	35 cm x 26 cm
	Volumen de la Tolva	13 268 cm ³
	Nº de Botellas al tiempo	2 de 250 ml

7.3 Propuesta de Diseño

Teniendo en cuenta el análisis funcional realizado, se plantea un diseño propio de una trituradora de eje único que cumpla con los requerimientos a escala de laboratorio y se articule a la línea de producción de filamentos y pellets.

En la Tabla 7 se establecen de forma específica, las propiedades la botella PET para el diseño.

- Capacidad de producción: 6 Kg/h
- Tamaño de la hojuela: 8x8 mm
- Revoluciones por minuto: 58 rpm
- Radio de la cuchilla: 5 cm

Tabla 7.

Parámetros del PET para el diseño.

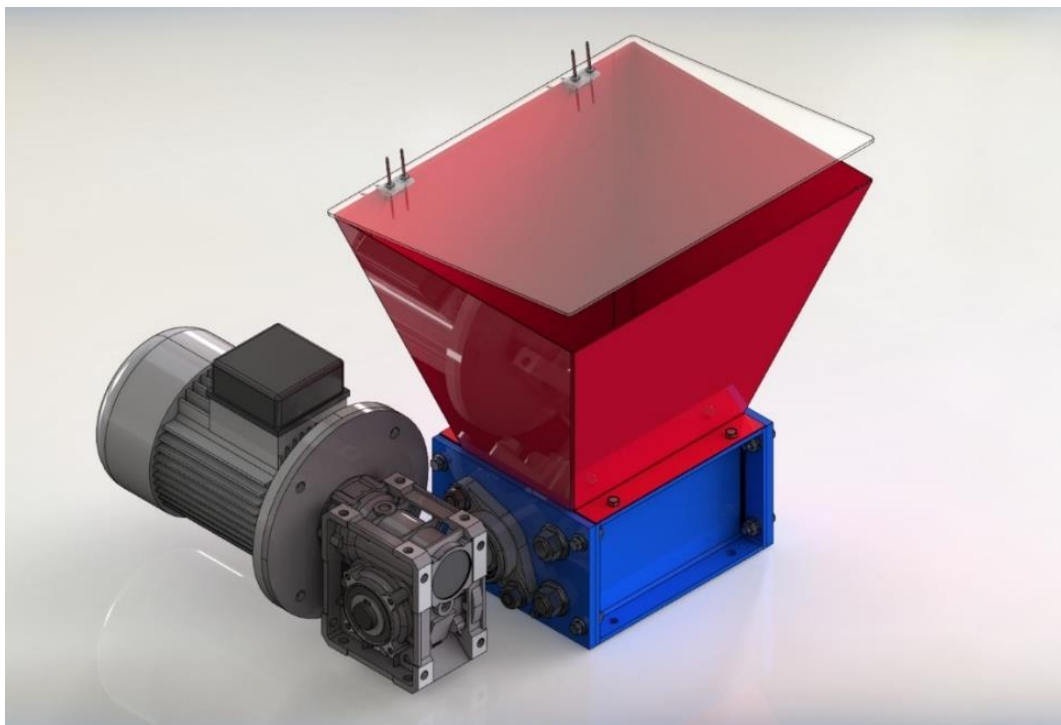
Propiedad	Valor
Longitud mínima de la botella pet	18 cm
Espesor de la botella pet	0.2 mm
Densidad	1.4 g/cm ³ ^a
Resistencia al impacto	82 KJ/m ² ^b

Nota: Recopilado de ^a (Awaja & Pavel, 2005) ^b (Lork Industrial SL, 2022)

La trituradora fue diseñada buscando cortes más eficientes y uniformes, se distribuyeron los filos de forma que la potencia requerida fuera baja en comparación con otros sistemas que se pueden encontrar en el mercado y la industria. Se realizaron 4 cuchillas donde cada tipo tiene un desfase 7.5° respecto a un mismo punto del eje, garantizando un solo corte a la vez de hojuelas $8 \times 8 \text{ mm}$. Para el modelado CAD de piezas como la tolva, las cuchillas móviles, las cuchillas fijas y los separadores de las cuchillas fijas se hizo uso del diseño paramétrico, esto permitió que en un mismo archivo se tuvieran múltiples configuraciones de piezas que comparten las mismas operaciones y presentan gran similitud. El diseño propuesto se presenta en la Figura 16 y los planos se encuentran en el anexo D como un sistema de la planta prototipo.

Figura 16.

Ensamble trituradora diseño propuesto Modelo CAD



7.3.1 Cuchillas móviles

El diseño de las cuchillas móviles define la capacidad de la trituradora. Esta relaciona el flujo másico de corte por cada revolución de las cuchillas y las revoluciones de operación n de la extrusora:

$$Cap = Cap_{rev} * n * 60$$

Donde:

Cap_{rev} es la capacidad por revolución $\frac{kg}{rev}$ Cap es la capacidad de la trituradora $\frac{kg}{h}$

La capacidad de producción por revolución depende de los factores presentados en la siguiente ecuación:

$$Cap_{rev} = N_{ejes} * N_{cuchillas} * N_{filos} * A_{corte} * t_{PET} * \rho_{PET}$$

Donde:

N_{ejes} es el número de ejes de la trituradora.

A_{corte} es el área de corte del filo.

$N_{cuchillas}$ es el número de cuchillas

t_{PET} es el espesor de la botella PET.

N_{filos} es el número de filos en cada cuchilla.

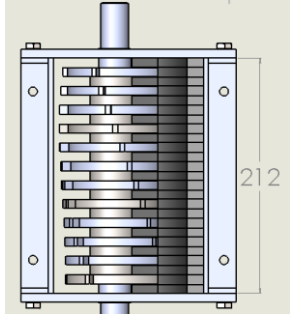
ρ_{PET} es la densidad del PET

Teniendo en cuenta flujo másico, las revoluciones y el área de corte de la cuchilla es de $8 \times 8 \text{ mm}$. Se define que el espesor de cada cuchilla deberá ser de 8 mm . Utilizando la anterior ecuación se parametriza y se hace una iteración entre el número de cuchillas y el número de filos de cada cuchilla con la longitud de la trituradora, que facilite la distribución de los filos en el eje y que tenga un tamaño adecuado de la trituradora considerando que preferiblemente debe recibir botellas de consumo personal. Se observa en la Tabla 8 que la selección fue 12 cuchillas con 4 filos y un largo de la trituradora de 21cm.

Tabla 8.

Parametrización del N° de cuchillas, N° de filos y Longitud de la trituradora

$N_{cuchillas}$	N_{filos}	$L_{trituradora}$ [mm]
6	8.018	110 mm
8	6.013	144 mm
9	5.345	161 mm
10	4.811	178 mm
11	4.373	195 mm
12	4.009	212 mm
13	3.701	229 mm
14	3.436	246 mm
15	3.207	263 mm
16	3.007	280 mm



Una configuración de menor número de cuchillas dificultaría el ingreso de varias botellas a la vez. Mientras que, una de mayor número de cuchillas, implica una mayor longitud de la trituradora que aumentaría el costo de la manufactura de la máquina de forma significativa.

La fuerza de corte por cuchilla se calcula por el ancho $F_{C,ancho}$ y por el largo $F_{C,largo}$ a partir de la energía necesaria para romper el PET G_c , tomado de la Tabla 7 de propiedades, el procedimiento se tomó de (Gaitan, 2018). A continuación, se muestran las ecuaciones:

$$F_{C,largo} = G_c * Largo$$

$$F_{C,ancho} = G_c * Ancho$$

$$F_{C,largo} = 82000 \left[\frac{N}{m} \right] * \frac{8}{1000} [m]$$

$$F_{C,ancho} = 82000 \left[\frac{N}{m} \right] * \frac{8}{1000} [m]$$

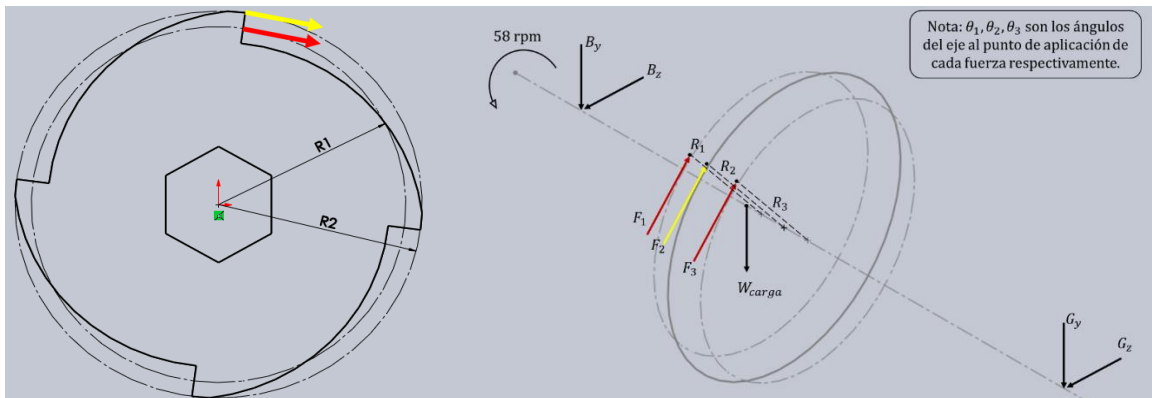
$$F_{C,largo} = 656 [N]$$

$$F_{C,ancho} = 656 [N]$$

En la Figura 17 se presentan las fuerzas establecidas para calcular el torque necesario para realizar el corte de las botellas PET. La flecha amarilla hace referencia a la fuerza de corte a lo ancho de la cuchilla (1 punto de aplicación de la fuerza), mientras que la flecha roja es la fuerza de corte a lo largo de la cuchilla (2 puntos de aplicación de la fuerza). Los radios R1 y R2 son 4.6 y 5 cm, respectivamente.

Figura 17.

Diagrama de fuerzas en una cuchilla, y D.C.L del eje de las cuchillas móviles



El torque que ejercen las cuchillas sobre el eje está dado por la siguiente ecuación, donde C_{corte} es el número de cuchillas que están haciendo corte simultáneamente.

$$Torque\ total = (2 * C_{corte} * F_{c,largo}) * R1 + C_{corte} * F_{c,ancho} * R2 \ [N.m]$$

$$Torque\ total = (2 * 1 * 656) * \frac{4.6}{100} + 1 * 656 * \frac{5}{100} \ [N.m]$$

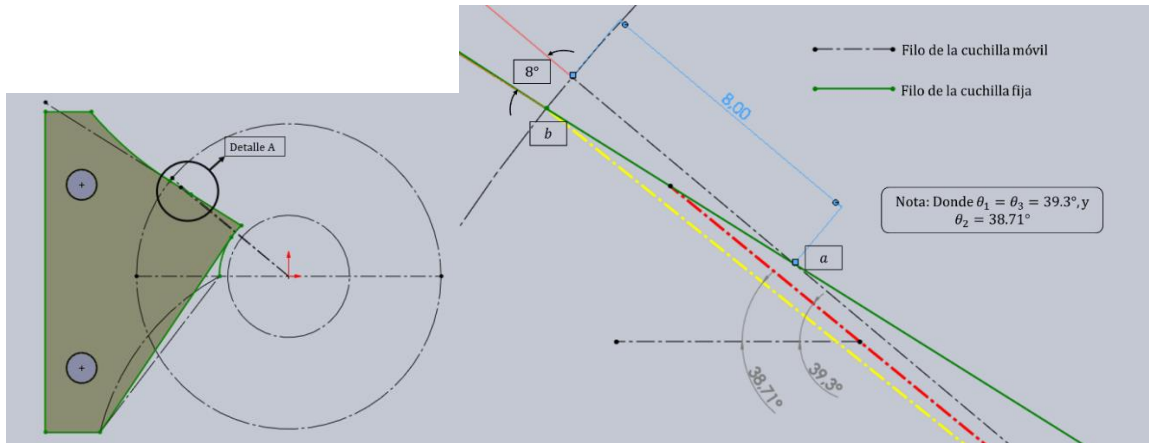
$$Torque\ total = 93.2 \ [N.m]$$

Cabe resaltar que el corte se realiza en forma progresiva desde que los filos de la cuchilla móvil y fija entran en contacto (punto a) hasta que el filo de la cuchilla móvil corte completamente el material (punto b) de la Figura 18. Esto garantiza que el tamaño de la hojuela sea de 8x8mm. Los cálculos de las fuerzas de corte se hicieron tomando en cuenta que el corte se realiza instantáneamente, no obstante, según lo mencionado y mostrado en la Figura 18 dos de los puntos de aplicación de las fuerzas por filo no cumple esto, por lo que las fuerzas reales difieren de las calculadas. La disposición del corte entre los filos hace que el material que se esté cortando en X cantidad de tiempo requiera menos potencia en comparación de si se corta instantáneamente por

impacto, indicando que la fuerza calculada para los puntos de aplicación es mayor a la que realmente se presenta en el sistema.

Figura 18.

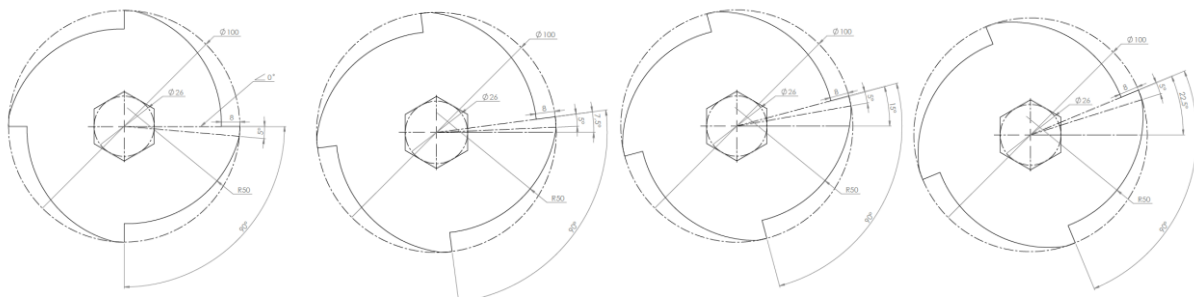
Detalle A interacción de los filos de las cuchillas móvil y fija de la trituradora.



El diseño preliminar se realizó con 2 cuchillas cortando simultáneamente que daba como resultado un motor de mayor torque requerido, que implica un motor más grande y costoso. En consecuencia, como alternativa y en harás de un mayor aprovechamiento de la potencia del motor, se decidió tomar un diseño base de la forma de los filos y presentar 4 cuchillas que difieren en su forma de ensamblar en el eje. Como se observa en la Figura 19.

Figura 19.

Tipos de cuchillas móviles diseñadas a 0, 7.5, 15, y 22.5°



El material seleccionado para las cuchillas es: Acero inoxidable, AISI 304.

7.3.2 Potencia de la trituradora

Con el torque que se genera en el eje y las revoluciones por minuto (58 rpm) se puede calcular la potencia necesaria de la siguiente manera. Se considera la eficiencia del motor del 80%.

$$Pot = Torque\ total * n * \left(\frac{2\pi}{60}\right) [W]$$

$$Pot_{correg} = \frac{Potencia}{\eta} [W]$$

$$Pot = 93.15 * 58 * \left(\frac{2\pi}{60}\right) = 565.8 [W]$$

$$Pot_{correg} = \frac{0.76 [HP]}{0.8} = 0.95 \approx 1 [HP]$$

$$= 0.76 [HP]$$

Donde:

Pot_{correg} es la potencia real del motor.

η es la eficiencia total del motor.

7.3.3 Selección del motor

Con el dato de la potencia corregida se selecciona el motor. El motorreductor seleccionado es de 1 HP con unas revoluciones de salida de 50-60 rpm. La selección fue la referencia MU50-802-4 marca TECHTOP de la empresa (Reductores y potencia SAS, 2022) sus características se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9.

Características motorreductor de la trituradora propuesta de diseño.

Motorreductor sin fin corona	
Potencia del motor	1 Hp
Frecuencia	60 Hz
Velocidad de salida	58 rpm
Velocidad nominal del motor	1740 rpm
Par de salida máx.	106 Nm
Corriente	Trifásica

7.3.4 Eje para las cuchillas móviles

Teniendo en cuenta los puntos de aplicaciones de la fuerza en las cuchillas móviles se realiza un diagrama de cuerpo libre donde se trasladan las componentes al eje, con el fin de que

con la teoría presentada en (Hamrock, Jacobson, & Schmid, 2000) se hallen los diagramas de fuerza cortante, momento y torsión para analizar los puntos críticos en el eje y finalmente encontrar el diámetro adecuado para la geometría usada, el material seleccionado y un factor de seguridad aplicado igual a 2, según los criterios de Teoría de fallas presentados en (Parada, 1990), el proceso de diseño se encuentra en el apéndice A, mientras que los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.

Características principales del eje de las cuchillas móviles.

Características principales del eje de las cuchillas móviles	
Longitud de la zona hexagonal	195 [mm]
Longitud total	442 [mm]
Material	Acero 1045 laminado en caliente
Diámetro	30 [mm]
Factor de seguridad	2

7.3.5 Selección de las chumaceras

Para el eje de las cuchillas móviles debe seleccionarse una referencia de chumacera que sostenga y permita el giro del eje en ambos extremos, para ello se sigue el procedimiento planteado por (SKF, 2019). Los resultados se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11.

Selección de chumaceras para eje de cuchillas móviles

	Chumacera I	Chumacera II
Referencia	FYTB 25 TF	FYTB 25 TF
Tipo de rodamiento	Rígido de bolas	Rígido de bolas
Requerimiento Carga radial*	513,55 N	601,3 N
Capacidad de carga dinámica básica	14 kN	14 kN
Capacidad de carga estática básica	7.8 kN	7.8 kN
Relación de carga	18	21,3

*Nota: *Es la carga generada por el peso de las cuchillas y la fuerza de corte*

La relación de carga es mayor a 1, lo que significa que las chumaceras son aptas para soportar las cargas de los requerimientos. Las dos chumaceras tienen el aro interior giratorio, el aro exterior fijo y dirección de carga constante, por tanto ambos tendrán ajuste de interferencia

en su aro. Con la teoría de (SKF, 2019) se determina que: la chumacera I y la chumacera II es de bolas rígidas y deben tener una tolerancia con el eje de J6.

7.3.6 Eje para las cuchillas fijas

Para este procedimiento se toma en cuenta el eje que soporta a las cuchillas fijas en la parte inferior de la cuchilla, ya que es el más crítico. Siguiendo la misma línea de diseño para el eje de las cuchillas móviles se obtienen los resultados de la Tabla 12.

Tabla 12.

Características principales del eje de las cuchillas móviles.

Características principales del eje de las cuchillas fijas	
Longitud total	266 [mm]
Material	SAE 1045
Diámetro	5/8"
Factor de seguridad	1.8

7.3.7 Criba

El diseño de la criba se realiza por medio del método pasante de malla Bouso. Este procedimiento consiste en usar varios factores para encontrar la superficie de mallado, el concepto y los rangos empíricos de cada parámetro fueron tomados de la tesis “*Diseño de una maquina trituradora de plástico para la fábrica La Paz*” (Miranda, 2014) y del material de clase de la Universidad Politécnica de Cartagena “*Tema 6: Clasificación directa. Cribado*” (Perales, 2011). Las características geométricas de la criba son el resultado del procedimiento de diseño que se realiza en el apéndice A y se muestra en la Tabla 13

Tabla 13.

Características principales de la criba

Características principales de la criba	
Área superficie del tamiz	14,95 cm ²
Diámetro orificios	13,5mm
Paso	10mm
Material	Aisi 304

7.3.8 Ficha técnica

A continuación, en la Figura 20 se presenta la ficha técnica del diseño propuesto para la trituradora de la planta prototipo para la fabricación de pellets y filamento.

Figura 20.

Ficha técnica trituradora propuesta de diseño.

FICHA TÉCNICA TRITURADORA PARA PLÁSTICO		
Tipo de Trituradora		Único Eje Cuchillas
Capacidad/Rendimiento		6 Kg/h
N° de Operarios		1
Potencia	Inversor	Sí
	Motor	1 HP 220V 60 Hz Trifásico
	Diametro del Eje	25 mm
	Long Eje	442 mm
Cuchillas	N° Cuchillas fijas	13
	N° Cuchillas móviles	12
	Ancho de la Cuchilla	8 mm
Tolva	Apertura de la Tolva	29,7 mm x 37 mm
	Volumen de la Tolva	16240 cm ³
	Material ingreso	Botellas aplastadas

7.4 Actividades de intervención

De acuerdo con el informe del análisis funcional y la propuesta de diseño planteada es posible observar las falencias que tiene el modelo de la trituradora existente en el Laboratorio con respecto al teoría, bajo las cuales se plantearon actividades de intervención al modelo existente, se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14.

Actividades de intervención en la trituradora

SITUACIÓN	ACTIVIDAD	FOTOGRAFIA	RESULTADO
<p>La máquina no tiene un sistema de protección eléctrica en caso de una sobrecarga o calentamiento. La máquina puede atascarse y hacer que el motor se caliente y se dañe.</p>	<p>Se determina el amperaje de operación, aprox. 8A y se decide poner una caja eléctrica con un Breaker C45N C10A Wusley, un juego de contactor LC1-D0910 Telemecanique con un Relé térmico 7A - 10A Para 220v 2HP CHINT que reacciona ante el aumento del amperaje y apaga el equipo.</p>		<p>Se instala un sistema eléctrico de la máquina, que ejerce control en caso de una emergencia o una contingencia eléctrica.</p>

Toda máquina industrial debe llevar un indicador de funcionamiento y un accionador de entrada de energía. No tiene indicador, ni accionador. Además, que la energía de la máquina llega directamente al inversor, lo que genera daños permanentes en el motor de la trituradora.

Se decide poner un piloto y una muletilla que evidencie el ingreso de energía al sistema y permita observar que se encuentra funcionando correctamente.



La instalación ofrece un sistema eléctrico de calidad industrial con accionador e indicador de funcionamiento, la energía pasa primero por la caja eléctrica antes de llegar al inversor, permitiendo un mejor procesamiento de la energía.

La máquina se encuentra conectada directamente al totalizador de la caja eléctrica del laboratorio. Esto no es práctico, la máquina debe ser portable, y poderse trasladar.

Se instalan un juego de clavija para la máquina, con las especificaciones eléctricas necesarias: 220v Trifásico 20A.



La trituradora ahora es portable y se puede conectar a cualquier red Trifásica de 220v.

No hay una información concreta de las características y parámetros de funcionamiento de la máquina como una guía, o ficha técnica.

Se caracteriza los elementos que componen la máquina y se realiza un informe funcional para extraer los parámetros de operación de la máquina como rpm, tipo de transmisión de potencia, etc.



Parte del propósito de mostrar una ficha técnica es difundir la información y que el operario tenga conocimiento acerca de los parámetros de funcionamiento como también de las medidas generales de la máquina.

La operación de la trituradora luego de las actividades de intervención es mucho más segura para el usuario. Los arreglos eléctricos realizados extienden la vida útil de la máquina. En la Figura 21 se muestra el resultado final.

Figura 21.

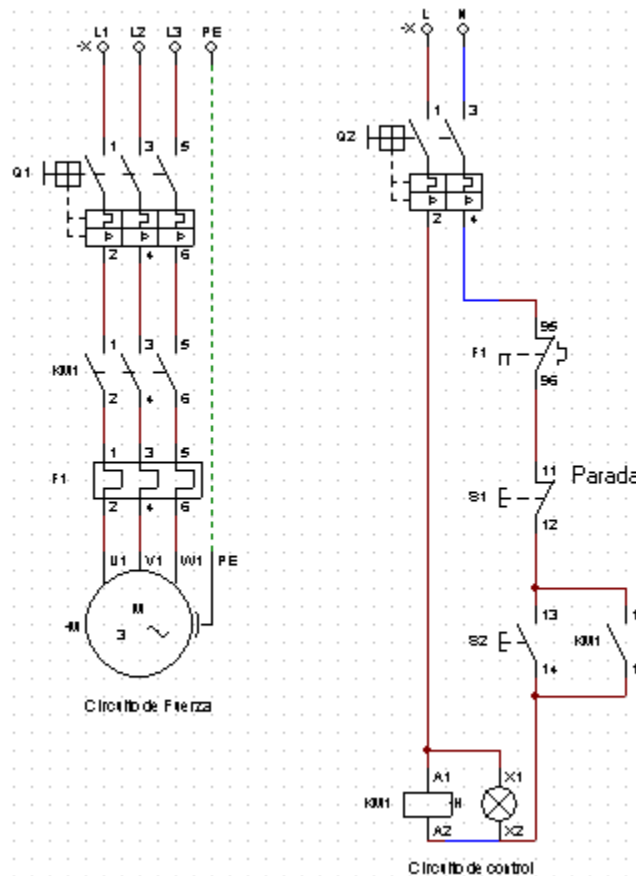
Resultado final de las actividades de intervención en la trituradora del laboratorio



Como parte final de la intervención se realizó un estudio de los componentes eléctricos de la trituradora, y se planteó un diagrama eléctrico del motor, como se muestra en la Figura 22.

Figura 22.

Diagrama eléctrico del motor.



El circuito de fuerza del motor de la trituradora es una conexión directa que cuenta con los componentes de protección Breaker (Q1) y Relé térmico (F1) que protegen al sistema de cortocircuito y sobre cargas, además cuenta con un contactor (KM1) como elemento de maniobra para el circuito de control. Mientras, el circuito de control es de pulsador con enclavamiento, el cual permite que el motor funcione una vez se deje de pulsar, cuenta con un testigo de encendido.

8. Sistema Extrusora

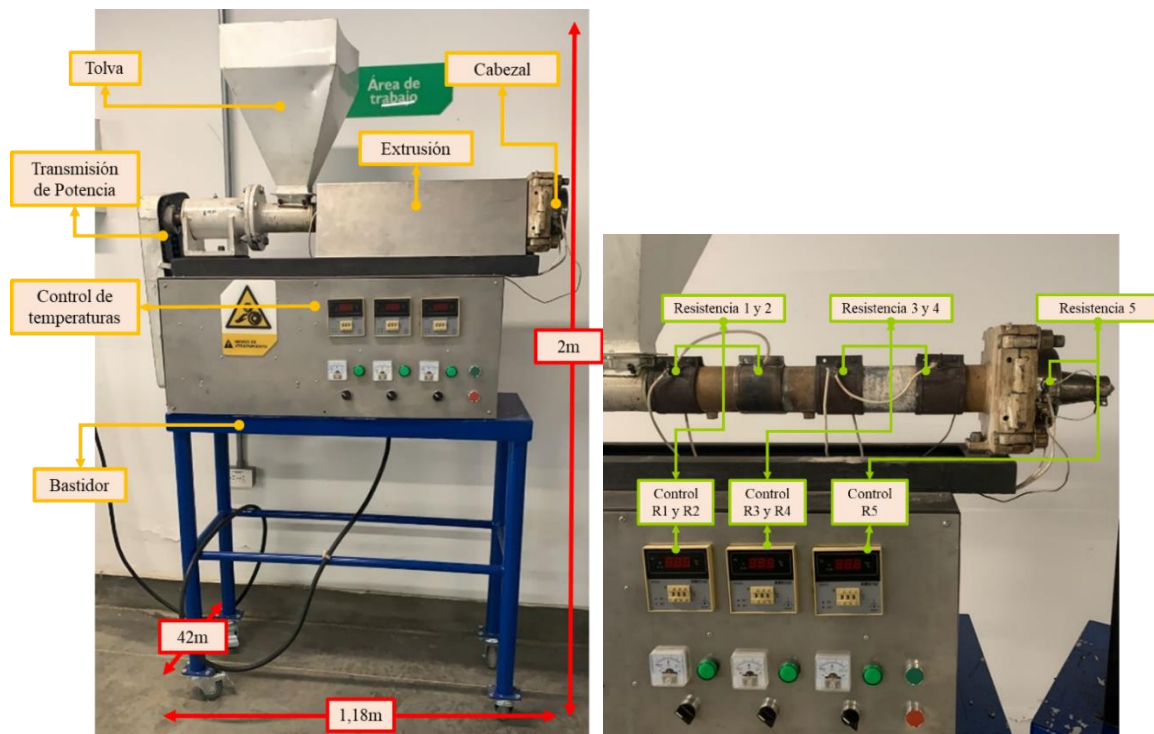
En este capítulo se encontrará la caracterización, el modelo teórico, el informe teórico-funcional, la propuesta de diseño y las actividades de intervención de la extrusora, de manera ampliada se encuentra en el Apéndice B.

8.1 Caracterización

En la Figura 23 se evidencian las condiciones iniciales, los componentes y las medidas generales de la máquina. Funciona con una alimentación trifásica a 220V, posee cinco resistencias tipo abrazadera y tiene variador de frecuencia para las revoluciones del tornillo. Cabe resaltar la máquina en ese momento no tenía la boquilla para peletizado.

Figura 23.

Componentes y sistemas extrusora.

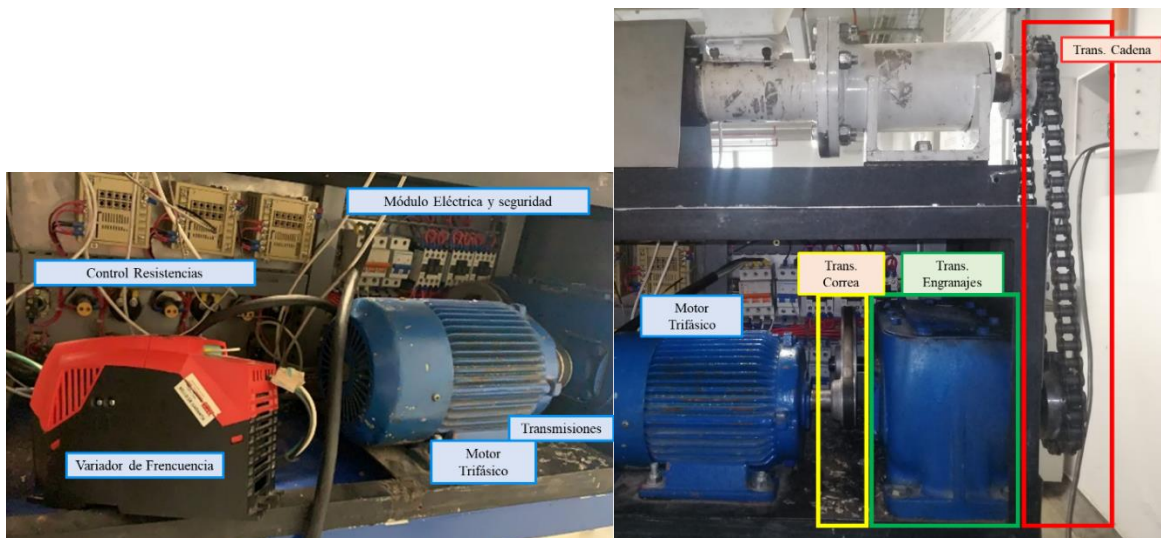


La extrusora tiene cuatro resistencias en la camisa del tornillo y una resistencia en la conexión entre el cabezal y la boquilla para asegurar que el polímero a extruir tenga la temperatura y estado necesario para formar filamento. Normalmente las extrusoras utilizadas en la industria no tienen ese tipo de resistencia ubicada en la boquilla, sin embargo, debido al diseño robusto del cabezal de la máquina se precisa hacer uso de una resistencia adicional. La máquina cuenta con controles on-off y los testigos para las resistencias, no obstante, no todos están en funcionales.

A nivel interno, por la parte posterior de la máquina, se encuentra el suministro de energía, la transmisión de potencia y el variador de frecuencia. La extrusora tiene tres transmisiones de potencia que se observan en la Figura 24, el recuadro amarillo muestra la transmisión por correa entre el motor de 2,4HP y el reductor, el recuadro verde resalta la caja reductora de engranajes y en el recuadro rojo se encuentra la etapa final por transmisión por cadena de 1:1, con unas revoluciones de trabajo de 37rpm.

Figura 24.

Parte interna extrusora



El sistema eléctrico y electrónico está en la parte posterior de la máquina, cabe mencionar que es de difícil acceso debido a que se encuentra detrás del motor, y el espacio es muy reducido para manipular los elementos que conforman el control y alimentación de las resistencias. Además, su ubicación es poco conveniente en el sentido que queda debajo del subsistema de calentamiento y gran parte del calor lo absorbe los elementos eléctricos y electrónicos.

Respecto a su funcionamiento, es fundamental definir la capacidad térmica de sus resistencias y el flujo masico que maneja; dado que la maquina no tiene una ficha técnica es necesario realizar una serie de actividades para obtener dicha información. En primer lugar, se realiza una inspección donde se encuentra que cada resistencia posicionada en el cilindro tiene una potencia de 700 W a 220V con unas medidas de Ø80mm x 80mm; y la que está instalada en el cabezal tiene una capacidad de 650 W a 220 V y mide Ø128mm x 45mm. Con dicha información se prueba el tiempo de calentamiento del equipo, donde se obtiene un aproximado de 2 horas para alcanzar temperaturas de entre 200°C - 250°C, lo cual es mucho tiempo de preparación para una máquina a escala de laboratorio.

De igual manera, para encontrar el valor del flujo másico se realizó una prueba sencilla con PET virgen. Inicialmente se elaboró una limpieza profunda a la máquina, garantizando que no tuviera material en su interior. Luego, se tomó datos para un tiempo de 10 min donde la maquina estaba operando de manera estable y se evaluó la cantidad de material que entró por la tolva y salió como extrusión. Estos datos se extrapolaron para saber el flujo másico en kilogramos por hora (kg/h) a partir del plástico procesado, el período de producción continua y una velocidad que permita controlar el material a la salida: la extrusora, puede procesar en promedio 0.8 kg/h. Se observa que a máximas revoluciones no es posible hacer control de la producción.

8.2 Modelado Teórico

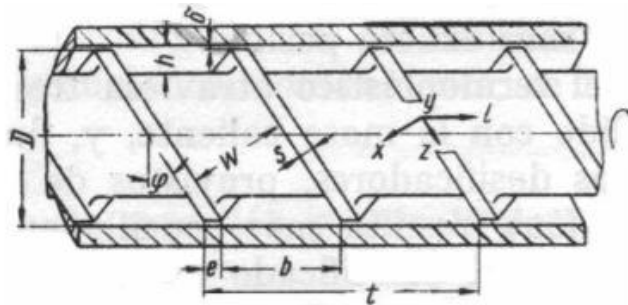
Con los datos de la caracterización sumado a la bibliografía sobre el modelado de la transformación de plástico por extrusión y diseño mecánico, se presenta de manera general el proceso de diseño y selección de los elementos de la máquina, de modo que se pueda diagnosticar el equipo, identificar variables fundamentales y determinar las actividades de intervención.

8.2.1 Tornillo de extrusión

El modelamiento teórico se basó en el libro de Transformación de plástico de (Savgorodny V. , 1978). En él se define el tornillo como el órgano fundamental de trabajo de una máquina extrusora y las variables principales que lo definen son el diámetro del tornillo, la relación de su longitud con el diámetro L/D y la velocidad de giro. Para su diseño, los parámetros geométricos se presentan en la Figura 25.

Figura 25.

Geometría de diseño para un tornillo extrusor.



Nota: Tomado de (Savgorodny V. , 1978)

Dónde:

h es la profundidad del canal.

e es la anchura de la hélice.

W es la anchura del canal.

δ es la holgura entre cilindro y husillo.

t es el paso del husillo

D es el diámetro exterior del husillo.

b es la distancia entre filetes.

L es la longitud total del husillo

φ Ángulo de a hélice

La relación de L/D recomendada debe estar en un rango de entre 6 a 40, el más usado a nivel industrial se encuentra entre 20 a 25. Para la extrusora del laboratorio la relación es: 21. De igual manera, el libro presenta algunas ecuaciones empíricas con rangos recomendados desde la industrial para el cálculo del tornillo.

$$t = [0.8 \text{ a } 1.2] * D \qquad e = [0.06 \text{ a } 0.1] * D \qquad \delta = [0.002 \text{ a } 0.003] * D$$

8.2.1.1 Zonas del tornillo

La configuración geométrica de cada una de las zonas de husillo: alimentación, compresión y dosificación, van definidas en función del material a transformar, su viscosidad, densidad, capacidad térmica y características mecánicas. Para la cuales se recomiendan (Savgorodny V. , 1978) las ecuaciones consignadas en la Tabla 15.

Tabla 15.

Ecuaciones recomendadas para las zonas del tornillo.

Zona	Recomendación
Zona de alimentación	Profundidad del canal $h_1 = (0,12 \text{ a } 0,16) * D$ Longitud del canal $L_1 = 0.4 * L$
Zona de transición / compresión	Longitud del canal $L_2 = 0.35 * L$
Zona de dosificación	Profundidad del canal $h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i} * (D - h_1)} \right]$ Longitud del canal $L_3 = 0,25 * L$

Nota: Tomado de (Savgorodny V. , 1978)

Para la extrusora que se encuentra en el laboratorio, se desmontó del tornillo y se tomaron las medidas geométricas para definir los valores de su diseño y poder diagnosticarla. Se muestran en la Tabla 16:

Tabla 16.

Valores geométricos medidos en la extrusora del laboratorio.

Valores geométricos tornillo laboratorio	
Diámetro D	36 mm
Longitud total L	760 mm
L/D	21
Longitud alimentación L_1	220 mm
Profundidad alimentación h_1	5 mm
Longitud transición L_2	360 mm
Longitud dosificación L_3	180 mm
Profundidad dosificación h_3	1,75 mm
Anchura hélice e	7 mm
Holgura entre cilindro y tornillo δ	0,5 mm

8.2.1.2 Flujos en el tornillo

Según (Parra, 2017) el flujo a través del tornillo se da por el giro, la presión y las pérdidas de material, donde cada uno depende de las revoluciones n y de variables geométricas que definen las constantes que se presentan a continuación. Éstas a su vez se relacionan con la constante del cabezal que hace referencia a la geometría de la boquilla (número de orificios N_o , diámetro salida D_o , el espesor b). Parra define el flujo Q a partir de las ecuaciones de la **Tabla 17**:

$$Q = \left(\frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} \right) * n$$

Tabla 17.

Ecuaciones de las constantes de flujo

Constantes de los flujos en el tornillo extrusor	
<u>Constante del flujo de arrastre α</u> flujo directo que es provocado por el giro	$\alpha = \frac{\pi * m * D * h * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos^2 \varphi}{2}$
<u>Constante del flujo de presión β</u> flujo inverso	$\beta = \frac{m * h^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos \varphi}{12 * L}$
<u>Constante del flujo de pérdida γ</u>	$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan(\varphi)}{10 * e * L}$
<u>Constante del cabezal K</u>	$K = \frac{\pi * N_{orificio} * D_o^4}{128 * b}$

Nota: Tomado de (Savgorodny V. , 1978)

8.2.1.3 Potencia del tornillo

Para el cálculo de la potencia del tornillo, según (Savgorodny V. , 1978) se estima la energía que se requiere para procesar el material seleccionado en la extrusión. Con el valor obtenido, se selecciona el motor y las transmisiones de potencia, de acuerdo con los catálogos disponibles. Se define por medio de la siguiente ecuación:

$$POT = \left(\frac{\pi^3 * D^3 * \left(\frac{2\pi * n}{60}\right)^2}{h_1} \right) * L * \mu + \frac{\left(\frac{Q_f}{60} * P_{m\acute{a}x}\right)}{\cos^2(\varphi)} + \left(\frac{\pi^2 * D^2 * \left(\frac{2\pi * n}{60}\right)^2 * e}{\delta * \tan(\varphi)} \right) * L * \mu$$

Siendo:

n son las revoluciones del tornillo

Q_f es el caudal de fuga, que establece la relación entre el caudal volumétrico Q y la constante del cabezal K .

$$Q_f = \gamma * \frac{Q}{K}$$

$P_{m\acute{a}x}$ es la presión máxima a la que trabaja la extrusora, según (Savgorodny V. , 1978) se define:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6 * \pi * D * L * n * \mu}{h_1^2 * \tan(\varphi)}$$

μ es la viscosidad efectiva del PET, que se define a partir de la tasa de corte y las temperaturas de trabajo.

Al aplicar la teoría de transformación de plásticos y diseño de extrusoras de (Savgorodny V. , 1978) a los datos geométricos de la Tabla 17 y las recomendaciones se definieron los datos teóricos para la extrusora del laboratorio, teniendo en cuenta la potencia del motor de 2,4HP. Según el modelado matemático realizado en el programa EES, sus resultados se muestran en la Tabla 18.

Se encuentra que las revoluciones de operación 37rpm no coinciden con las revoluciones teóricas de trabajo 18rpm, se analiza en el capítulo 8.3.

Tabla 18.

Datos teóricos extrusor laboratorio

Datos teóricos extrusora laboratorio	
Potencia del motor POT	2,4 HP
Eficiencia η	0,8
Potencia en el tornillo POT	1.9 HP
Revoluciones n	18 rpm
Flujo teórico Q	2.2 kg/h
Caudal en fuga teórico Q_f	0.972 kg/h
Viscosidad efectiva μ	400 Pa.s
Presión máxima $P_{m\acute{a}x}$	57,43 MPa

8.2.1.4 Pandeo del tornillo

Una vez determinada la geometría del tornillo se debe analizar si falla por pandeo de acuerdo con la teoría de (Mott, 2006). Donde se realizan dos comparaciones: Primero, el esfuerzo crítico de pandeo con el esfuerzo de compresión del tornillo, en caso de ser menor el esfuerzo por pandeo significa que el tornillo fallaría primero por pandeo que por esfuerzos a compresión. Segundo, la carga crítica por pandeo y la carga máxima axial de trabajo, si la carga máxima axial es menor que la carga crítica significa que el tornillo no fallará por pandeo.

Al analizar la posibilidad de falla por pandeo en la extrusora del laboratorio se obtiene que el tornillo podría fallar primero por pandeo que, por compresión, pero como la carga máxima de trabajo es menor que la carga crítica, el tornillo no fallará por pandeo. Los cálculos ampliados se encuentran en el Apéndice B.

8.2.2 Camisa del tornillo de extrusión

Para encontrar el espesor del cilindro que cubre el tornillo se hace el cálculo que corresponde a recipientes a presión de pared gruesa, con la metodología de (Hamrock, Jacobson, & Schmid, 2000). Con los datos geométricos y el material de la camisa se puede generar un sistema de ecuaciones del que se obtengan los esfuerzos generados en la pieza y se defina el factor de seguridad que maneja. Para el caso de la extrusora que está en el laboratorio, los resultados se presentan en la Tabla 19., los cálculos ampliados se encuentran en el Apéndice B.

Tabla 19.

Resultados teóricos camisa de la extrusora

Camisa de la extrusora laboratorio		
	Parámetro	Valor
Datos	Radio exterior r_e	40 mm
	Radio interior r_i	18.5 mm
	Material	Acero para tubería
	Esfuerzo de fluencia σ_Y	240 MPa
Resultados	Esfuerzo radial σ_r	57.43 MPa
	Esfuerzo tangencial σ_t	88.7 MPa
	Esfuerzo admisible $\sigma_{admisible}$	88.7 MPa
	Presión máxima $P_{m\acute{a}x}$	57.43 MPa
	Factor de seguridad F_s	2.7

8.2.3 Tornillos sujeción de la boquilla

Los tornillos que unen la boquilla al cabezal son críticos para el sistema debido a la alta presión que soporta, y deben ser seleccionados de acuerdo con los requerimientos teóricos de rigidez y resistencia. El proceso de diseño para la selección se hizo mediante el modelo matemático del libro “*Elementos de máquinas*” (Hamrock, Jacobson, & Schmid, 2000) donde se compara la fuerza que ejerce el material que fluye por el cilindro hacia la boquilla con las propiedades mecánicas de los tornillos. Los cálculos ampliados se encuentran en el Apéndice B.

8.2.4 Resistencias eléctricas

Parte fundamental del modelado de una extrusora es su sistema de calentamiento, puesto que es lo que genera el cambio de estado del material que circula al interior de la camisa. En este caso se usan resistencias de tipo abrazadera, que permiten distribuir la temperatura de manera uniforme en la zona respectiva y puede emplearse en conjunto con un control on-off. La transferencia de calor entre las resistencias y el ambiente es por convección natural, mientras el intercambio entre las resistencias y la camisa es por conducción. Para los cálculos teóricos se trabaja bajo el supuesto que el flujo de calor es unidireccional y en régimen estacionario, aplicando la teoría de (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011). Los cálculos ampliados se encuentran en el Apéndice B.

8.3 Informe del análisis teórico- funcional

Definido el modelo teórico de la extrusora se analiza la información calculada con el funcionamiento del equipo y las recomendaciones para la transformación de plástico. De igual manera, se evalúan las conexiones y protecciones eléctricas, así como las observaciones sobre el material PET que se procesó. En primer lugar, de los datos geométricos recopilados en la Tabla 16 y los datos técnicos de la Tabla 18 en comparación con la teoría se obtuvo que:

- La **relación de L/D** se encuentra entre los valores comunes en la industria, no obstante, la máquina resulta robusta para la capacidad que podría tener.
- La **holgura δ** no cumple con los valores recomendados. Según la teoría (Savgorodny V. , 1978), con las medidas actuales la holgura δ debería estar entre $0,072mm - 0,108mm$ y se encuentra en $0,5mm$. Esto causa que el flujo no sea constante y se dé la recirculación del material.

Para demostrarlo, se realizó una evaluación adicional, en la Tabla 20, donde se revisó a la misma potencia el cambio de las características mecánicas de la extrusora entre el rango mayor y menor holgura.

Tabla 20.

Características mecánicas a con respecto al cambio de la holgura δ

Características mecánicas con respecto al cambio de la holgura δ		
Variable	$\delta = 0.072 \text{ mm}$	$\delta = 0.108 \text{ mm}$
Potencia del motor POT	2,4 HP	2.4 HP
Eficiencia η	0,8	0,8
Potencia en el tornillo POT	1.9 HP	1.9 HP
Presión máx. $P_{m\acute{a}x}$	47,8 MPa	38.25 MPa
Flujo másico Q	2.7 Kg/h	1.9 Kg/h
Revoluciones n	12.52 rpm	12 rpm
Factor de seguridad F_s	3.77	4.14

Se encuentra que entre mayor sea la holgura, menor será la presión y menor será el flujo másico. El valor que tiene la extrusora en su diseño es de casi 5 veces más que el máximo recomendado para este caso, lo cual implica una presión y un flujo másico muy bajo que puede incurrir en una recirculación de material y una baja eficacia del proceso.

- La **anchura de la hélice e** , no cumple con la teoría del diseño. Según (Savgorodny, 1978), con las medidas actuales la anchura de la hélice debería estar entre 2,16 mm y 3,6 mm, no obstante, se encuentra en 7mm. Esto demuestra un sobredimensionamiento del tornillo, que sumado a la excesiva holgura δ causa una gran inestabilidad en el material que fluye a través de la extrusora. Esto se demuestra en la Tabla 21 al analizar los cambios que ocurren al modificar el valor de la anchura de la hélice manteniendo la potencia de la máquina. Entre mayor sea la anchura menor será la presión y mayor será el flujo másico producido, sin embargo, si se supera el rango recomendado, el flujo másico permanece en el mismo valor a una presión cada vez menor y con

un factor de seguridad menor, causando inestabilidad en el material que fluye, así como en la resistencia del sistema.

Tabla 21.

Características mecánicas con respecto al cambio de la anchura de la hélice e

Características mecánicas con respecto al cambio de la anchura e			
Variable	$e = 2.16 \text{ mm}$	$e = 3.6 \text{ mm}$	$e = 7 \text{ mm}$
Potencia del motor POT	2.4 HP	2.4 HP	2.4 HP
Eficiencia η	0.8	0.8	0.8
Potencia en el tornillo POT	1.9 HP	1.9 HP	1.9 HP
Holgura δ	0.09 mm	0.09 mm	0.5 mm
Presión máx. $P_{m\acute{a}x}$	50.98 MPa	43.86 MPa	57.43 MPa
Flujo másico Q	2.92 Kg/h	2.43 Kg/h	2.2 kg/h
Revoluciones n	15.2 rpm	13.1 rpm	18 rpm
Factor de seguridad F_s	3.1	3.6	2.7

- **La potencia y las revoluciones de operación** de la extrusora existente no corresponden directamente a los parámetros técnicos teóricos calculados, esto significa que el sistema no es óptimo y el diseño se encuentra sobredimensionado. Las revoluciones de trabajo de la máquina son 37rpm y según los valores calculados en la **Tabla 18** son 18 rpm, razón por la cual se hace necesario realizar un estudio adicional comparando bajo el modelamiento matemático de (Savgorodny V. , 1978), las condiciones de la máquina con la potencia actual de 2.4HP con los valores necesarios para que la extrusora funcione adecuadamente a 37rpm. Ver la **Tabla 22**.

Tabla 22.

Comparación datos técnicos teóricos de la Extrusora laboratorio

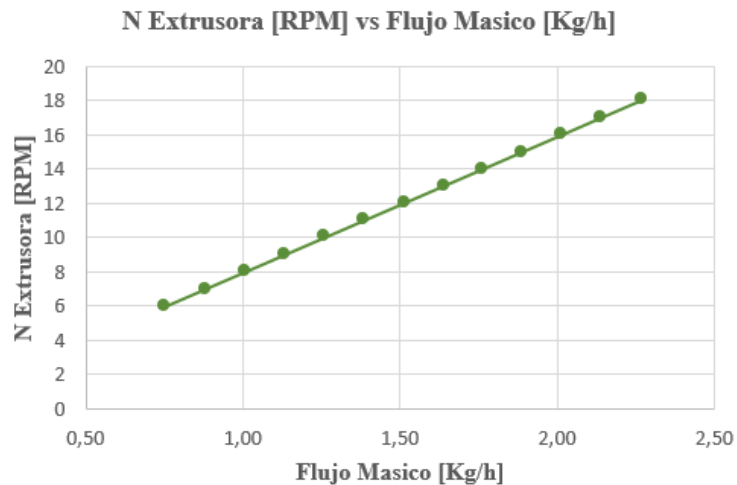
Comparación Datos técnicos teóricos Extrusora Laboratorio		
Parámetro	Con la potencia existente	Con las revoluciones actuales
Potencia del motor POT	2.4 HP	8.4 HP
Eficiencia η	0.8	0.8
Potencia en el tornillo POT	1.9 HP	6.72 HP
Revoluciones n	18 rpm	37 rpm
Flujo másico teórico Q	2.2 kg/h	4.6 kg/h
Caudal en fuga teórico Q_f	0.972 kg/h	2.04 kg/h
Viscosidad efectiva PET μ	400 Pa.s	400 Pa.s
Presión máxima $P_{m\acute{a}x}$	57.43 MPa	124.22 MPa

La gran variación del flujo másico y la presión máxima al interior del tornillo son consecuencias de la relación entre la potencia con las revoluciones de operación. Con las 37rpm que presenta la extrusora se encuentra que la potencia necesaria es de 8.4HP. Se concluye que la máquina está sobredimensionada para el motor que tiene instalado, esto se evidencia en el funcionamiento de la máquina, dado que en varias ocasiones la máquina se apagó porque la potencia del motor para 37 rpm es muy baja y no hace fluir el material. De igual manera que la rapidez del giro del tornillo dificultaba la manipulación del material a la salida

Bajo esta escena, lo más recomendable sería realizar un cambio de la relación de transmisión para disminuir las revoluciones actuales a la mitad y lograr un aumento del torque haciendo que la máquina opere en mejores condiciones. Esta es la opción más viable económicamente, dado que comprar un nuevo motor sería muy costoso. En la Figura 26 se presentan las nuevas condiciones de operación para la extrusora. El funcionamiento de la máquina en el laboratorio evidenció la situación, dado que en varias ocasiones la máquina se apagó porque la potencia del motor para 37 rpm es muy baja y no hace fluir el material. De igual manera que la rapidez del giro del tornillo dificultaba la manipulación del material a la salida. Teniendo en cuenta la recomendación para el cambio de la transmisión, se presenta en la Figura 26 las nuevas condiciones de operación para la extrusora.

Figura 26.

Condiciones de operación de la extrusora con transmisión recomendada.



- El **caudal en fuga Q_f** es muy elevado con respecto a las condiciones normales de extrusión, debería ser menor al 10% del flujo másico que circula. Esto es causado por el sobredimensionamiento general de la máquina, especialmente de la anchura de la hélice y la holgura. Esta premisa se sustenta en los valores que se presentan en la **Tabla 22** en la cual, sin importar las condiciones de potencia, el caudal de fuga se mantiene casi a la mitad del flujo másico, debido a que este parámetro depende en su mayoría de los parámetros de dimensionamiento geométrico.
- Las resistencias eléctricas operan de manera correcta, sin embargo, los indicadores de encendido están dañados y en caso de una reparación los elementos que componen el sistema eléctrico son de difícil acceso, al ubicarse detrás de las transmisiones de potencia, **Figura 27**.

Figura 27.

Ubicación del sistema eléctrico de los componentes de la extrusora.



- La ubicación de los **sensores de las resistencias** no permite un control preciso de las temperaturas dado que al no tener ningún tipo de sujeción a la camisa del tornillo y al encontrarse muy alejados del material que fluye, causan variaciones que dificultan aplicar el espectro térmico del material que se está procesando.
- Los tornillos de sujeción entre el cabezal y la boquilla se encuentran oxidados y con la rosca averiada, se muestra en la **Figura 28**. Al estar en constante contacto con fluidos debería ser de acero inoxidable.

Figura 28.

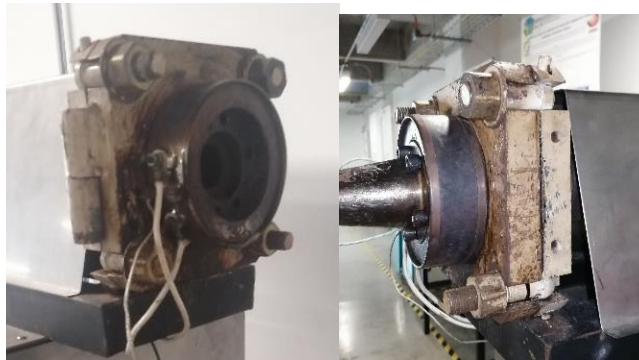
Estado los tornillos para sujeción de la boquilla y el cabezal



- El **cabezal** que une el conjunto camisa-tornillo con la boquilla se encuentra sobredimensionado. En la **Figura 29** se evidencia el tamaño robusto que tiene, lo que implica mucho tiempo en el calentamiento y dificulta el control de las temperaturas. Además, que en su interior el material se acumula, aumentando el tiempo para alcanzar la fluidez del plástico y la temperatura de trabajo, al final representa un retraso el proceso de producción de la extrusora.

Figura 29.

Robustez del cabezal y cilindro



Ahora bien, al realizar el modelado teórico fue necesario desarmar la máquina para tomar medidas e identificar parámetros. Este proceso se evidencia en la **Figura 30**, se realizó en varias etapas donde se desacopló el tornillo y la camisa del alojamiento de los rodamientos, se calentó la camisa para que el material apesado cambiara su estado y se facilitara la extracción del tornillo, se limpió el material acumulado al interior y se tomaron las medidas necesarias. De igual manera, se inspeccionó el estado actual de sus elementos, donde se observó un desgaste general y la oxidación de varios elementos como el tornillo, la camisa, la protección de la transmisión de cadenas y la tolva. El elemento más crítico es el tornillo, dado que el óxido en su interior podría alterar el material que circula a través de él y dificultar el proceso de transformación.

Figura 30.

Proceso de desarme de la extrusora y estado de sus elementos



Por otra parte, respecto al sistema eléctrico y de seguridad de la extrusora se aplicó una evaluación por componentes donde se analizó su presencia y función en la máquina. Los resultados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23.

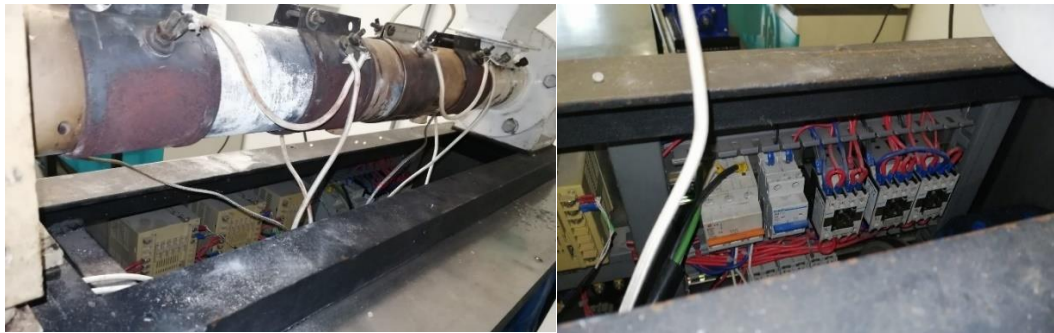
Evaluación por componentes eléctricos en la extrusora del laboratorio

Componente	SI/NO	Descripción
Protección eléctrica	SI	Tiene un breaker totalizador que comparte directamente con la trituradora. Pero también para completar tiene un breaker para cada conjunto de control de las resistencias. Es de difícil acceso para están en funcionamiento.
Accionador (on-off)	SI	Cada resistencia, así como el variador de frecuencia cuenta con una muletilla de accionamiento.
Indicador de funcionamiento	NO	La mayoría de los pilotos dispuestos están dañados. Sin embargo, cuenta con las conexiones para su cambio.
Protección del sistema de potencia	NO	Los elementos móviles del motorreductor se encuentran parcialmente cubiertos. Se encuentran muy cerca de las resistencias eléctricas del sistema, además del ingreso del material. Hay desgaste
Protección para el operario	NO	El funcionamiento propio de esta máquina exige una constante supervisión a la salida de la boquilla y el control del variador de frecuencia se encuentra en la parte posterior de la máquina, esto expone al operario a las altas temperaturas.

Del estudio se obtuvo también que la máquina no tiene división entre la zona de calentamiento y la parte interna de la máquina, se muestra en la Figura 31, causando que los elementos de protección eléctrica, el motor y las transmisiones se expongan directamente al calor. Normalmente las extrusoras tienen un aislante en el barril donde se procesa el material para encerrar el calor producido por las resistencias y evitar estos casos.

Figura 31.

División entre la zona de calentamiento y la parte interna de la máquina.



Teniendo en cuenta la falta de protección térmica, se aplicaron varias opciones de aislante para analizar su funcionamiento en el sistema. En primer lugar, se seleccionó un aislante de fibra de vidrio con foil de aluminio que nominalmente trabaja a temperaturas de hasta 300°C (Figura 32 izq.), no obstante, al instalarlo el foil hizo corto y la fibra de vidrio no soportó las temperaturas de la máquina. Posteriormente se seleccionó un aislante Kawol de fibra de cerámica que resiste temperaturas de hasta 1000°C, y se probaron dos configuraciones: una inicial donde se instaló recubriendo completamente el cilindro (Figura 32 centro), pero no funcionó ya que el control de la temperatura se dificultaba, permanecía por encima de los valores de Setpoint. Por eso se eligió la configuración de recubrimiento parcial (Figura 32 dcha.), donde se ubicó el aislante únicamente en las zonas del cilindro donde no tenía resistencias, lo cual resultó muy beneficioso: el tiempo de calentamiento disminuyó a 1 hora, la temperatura en los alrededores de la máquina en funcionamiento disminuyó y el control de la temperatura es bastante eficiente.

Figura 32.

Modelos de aislantes

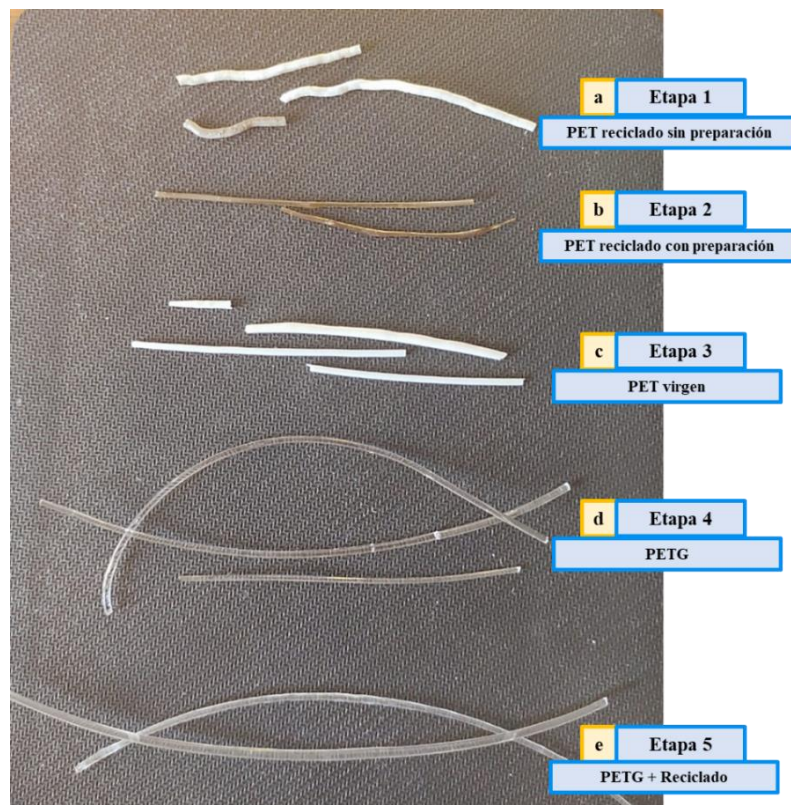


Nota: (Izq.) Primer modelo con fibra de vidrio con recubrimiento de foil de aluminio. (centro) Segundo modelo con Kawol de fibra de cerámica dispuesto en recubrimiento total del cilindro. (dcha.) Modelo Final Kawol de fibra de cerámica dispuesto en recubrimiento parcial del cilindro

Finalmente, para el informe se presentan las observaciones acerca del material PET utilizado en las diversas sesiones de prueba para el funcionamiento de la extrusora. Esto se realizó en varias etapas de acuerdo con tipo de PET que se trabajó, ver Figura 33.

Figura 33.

Etapas del material PET Extruido



- Primera etapa: **PET reciclado sin preparación.** Se realizó esta prueba con el material directamente triturado, solo se realizó selección del color de la botella. Se obtuvo filamento de diámetro muy variable, de aspecto grisáceo opaco, muy frágil, y muy difícil de manejar, no fue posible lograr las características mínimas de un filamento para impresión. (Figura 33. a)
- Segunda etapa: **PET reciclado con preparación.** Debido a los resultados de la prueba anterior, se decidió hacer un preprocesamiento de las botellas que incluye: selección de acuerdo con el origen de la botella, lavado a profundidad con agua caliente, sellado con agua fría y corte a mano del material. Esto con el fin de eliminar cualquier residuo del contenido y evitar que se contaminara el material con las partículas de óxido de las cuchillas de la trituradora. De la prueba se obtuvo que el filamento mantenía un diámetro aproximadamente constante, de un aspecto marrón semitransparente, y altamente frágil, dado que la temperatura de transición vítrea era muy inestable y el material era difícil de manejar, por lo tanto, no fue posible lograr un filamento apto para la impresión. (Figura 33. b)

Los resultados obtenidos en la prueba se deben al historial térmico que tiene el material reciclado, dado que para la fabricación de las botellas se emplean procesos de inyección, soplado o termoformado, que conllevan cambios de temperatura y de estado en el polímero, causando una reducción importante en el rendimiento térmico y plástico del material. Razón por la cual, para lograr su aprovechamiento y obtener las especificaciones fisicomecánicas y de operación requeridas, se decide implementar una mezcla de 20/80 de material reciclado con PET virgen.

- Tercera etapa: **PET virgen**. Definido lo anterior, se decide evaluar inicialmente el PET virgen sin mezcla. Se obtuvo una visible estabilidad en el comportamiento térmico y la estructura del material con diámetros uniformes y filamentos de mayor longitud, así como un mejor manejo de la viscosidad y las propiedades físicas. (Figura 33. c) Sin embargo, el material no es flexible, es sumamente frágil al enfriarse, y al momento del enrollado se quebrantó en tramos muy pequeños. En la Figura 34 se muestra el proceso de extrusión, fue complejo obtener tramos largos de filamento debido a la fragilidad y a la acumulación de material que se formaba en el cabezal.

Figura 34.

Extrusión de PET virgen.



Una de las propiedades más importantes que debe tener un material apto para la impresión 3D es la flexibilidad y manejabilidad, no obstante, el PET virgen por sí solo no cumple con dicha premisa. Por tal razón se buscó una alternativa dentro de los materiales comerciales para impresión 3D: el PETG, el cual es el tercer material más utilizado, y contiene una composición de PET con glicol que le ofrece la flexibilidad y la manejabilidad necesaria. En la **Tabla 24** se muestran las propiedades del PETG con respecto al PET, allí se evidencia que su porcentaje de elongación es mayor y que mantiene su densidad, dureza y temperatura de transición vítrea similar al PET virgen, ofreciendo una alternativa óptima donde se gana flexibilidad

Tabla 24.

Comparación propiedades PET virgen vs PETG

Propiedad	PET	PETG
Densidad	1.4 g/cm ³ ^a	1.27 g/cm ³ ^b
Dureza rockwell r	105 – 125 ^c	116 ^b
T° de transición vítrea	69 – 115 °C ^a	83 °C ^b
Módulo de flexión	3500 MPa ^c	2150 MPa ^b
Elongación %	3.5 – 5.83 % ^c	5 – 7 % ^b
Resistencia a la tracción	90 MPa ^c	53 MPa ^b
Resistencia a la rotura	85.0 MPa ^c	26 MPa ^b

Nota: Recopilado de ^a (Awaja & Pavel, 2005) ^b (SKChemicals, 2012) ^c (MatWEB, 2022) ^d (Lork Industrial SL, 2022)

- Cuarta etapa: **PETG**. Teniendo en cuenta la mezcla que se debe hacer con el material reciclado, de manera inicial se analizó el PETG sin mezcla, para conocer su comportamiento. Se obtuvo un filamento de diámetro estable, flexible, totalmente transparente, de enfriamiento rápido, y buena manejabilidad. (Figura 33. d) El espectro de temperaturas de trabajo es 20°C menor que el del PET virgen, por tanto, su enfriamiento es más rápido. Estos rasgos hacen que el material sea perfecto para el manejo en procesos de extrusión y, por tanto, apto para impresión 3D. En la Figura 35 se muestra el PETG obtenido. Las buenas características que se encontraron con el trabajo del PETG se concluye que es el mejor material para mezclar y aprovechar el PET reciclado.

Figura 35.

Filamento obtenido de PETG sin mezclar



- Quinta etapa: **PETG + PET reciclado**. Se realizó la mezcla propuesta de 80/20, con el material PET reciclado con preparación. Se logró un material estable, de diámetro constante y de

alta flexibilidad, muy parecido al obtenido con el PETG sin mezcla. (Figura 33. e) Su diferencia radica en que su aspecto es más opaco y su comportamiento térmico fue más complejo de manejar, pues el material reciclado altera las temperaturas de trabajo y se debe buscar el mejor espectro térmico para lograr la viscosidad adecuada a la salida de la máquina, el esquema de temperaturas utilizado se presenta en la Tabla 25.

Tabla 25.

Esquema térmico usado para la extrusión de PETG + PET Reciclado

Esquema de temperaturas usados para la extrusión de PETG + PET reciclado	
T° alimentación	203°C
T° transición	210°C
T° dosificación	180°C

Respecto a su apariencia el PETG mezclado es más opaco que el PETG sin mezcla, sin embargo, esto no afecta su capacidad para ser usado en impresión 3D, en la Figura 36 se muestra el filamento obtenido y las piezas impresas con ese material.

Figura 36.

Pieza impresa con filamento PETG + reciclado



Del informe del análisis teórico-funcional, se obtuvo la ficha técnica de la extrusora del laboratorio. Se presenta en la Figura 37

Figura 37.

Ficha técnica extrusora del laboratorio

FICHA TÉCNICA		
EXTRUSORA PARA PLÁSTICO		
Tipo de Extrusora	Tornillo único eje	
Capacidad/Rendimiento	0,8 Kg/h	
Rango de T°	25°C - 300 °C	
Altura Total	180 cm	
Longitud Total	118 cm	
Ancho Total	42 cm	
N° de Operarios	3	
Potencia	Motor	2,4 HP 1680 rpm 60 Hz Trifásica
	Tipo de Transmisión	1. Polea - Correa
		2. Caja engranajes
		3. Piñon - Cadena
Relación Total	44 (Motor) : 1 (Tornillo)	
Variador de Frecuencia	Mín.200 rpm Máx.1470 rpm	
Tornillo	Diámetro del Tornillo	36 mm
	L/D	21
	Zonas del Tornillo	3
		Alimentación - Transición - Dosificación
Pmáx	< 60 Mpa	
Resistencias	N° Resistencias	6
	Controles de T°	4
	Tipo de resistencias	Abrazadera
	Resistencias Camisa [4]	Pot 700w D80mm L80mm
	Resistencia Cabezal [1]	Pot 650w D128mm L45mm
Resistencia Pellets [1]	Pot 150w D56mm L20mm	
Tolva	Apertura de la Tolva	30 cm x 30 cm
	Volumen de la Tolva	9396 cm ³

8.4 Propuesta de Diseño

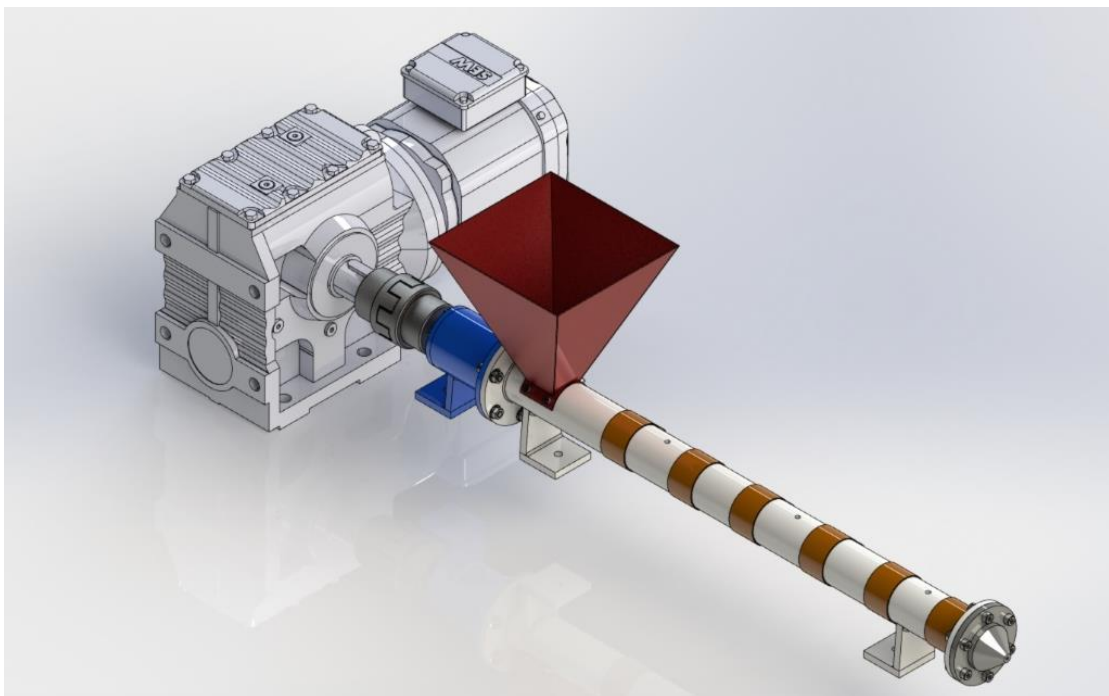
Teniendo en cuenta el estudio, modelamiento y diagnóstico realizado a la extrusora del laboratorio de mantenimiento, se presenta una propuesta de diseño alternativa que cumple con las recomendaciones teóricas. Los parámetros iniciales del diseño basado en la máquina existente son:

- Potencia en el tornillo de $POT = 1,9HP$
- Flujo másico Q entre 2.2 – 2.5 kg/h
- $L/D = 21$
- Diámetro externo del tornillo $D_{ext} = 36 mm$

Esta máquina se diseñó buscando un sistema equivalente al que se encuentra en el laboratorio que sea capaz de operar con una potencia de 2HP y siguiendo las recomendaciones de dimensionamiento. Se seleccionó un motorreductor que cuenta con las revoluciones que se necesitan a la entrada de la extrusora con el objetivo de ocupar el menor espacio, hacer el sistema lo más eficiente y lo más sencillo posible. El modelado CAD se realizó en el software SolidWorks, se muestra en la Figura 38 como ensamblaje. De igual manera, se realizaron los planos correspondientes a este subsistema de la planta y se consignó en la Apéndice D.

Figura 38.

Ensamble extrusora diseño propuesto Modelo CAD



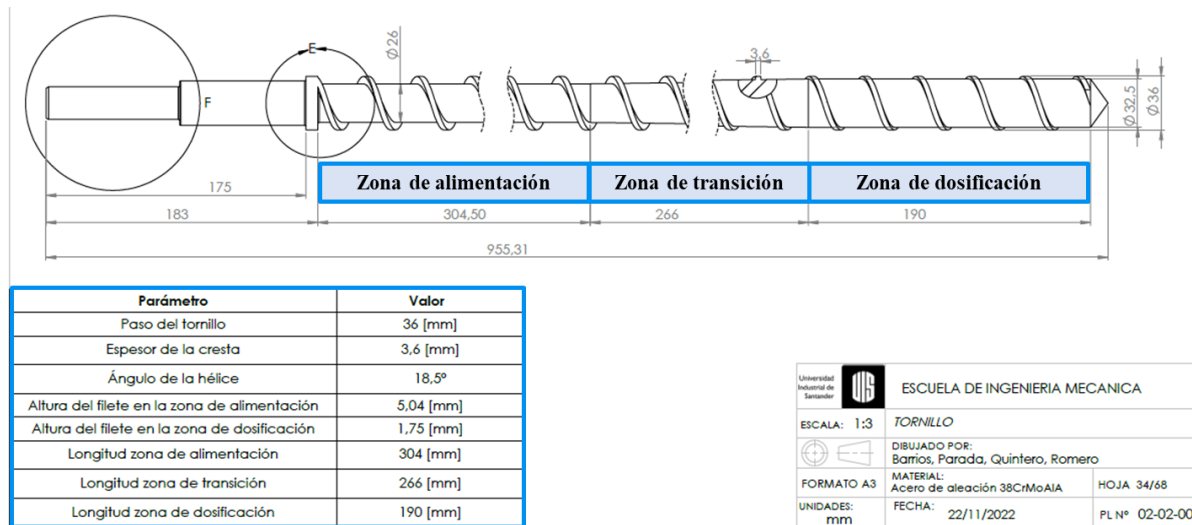
8.4.1 Diseño general

Con estos datos aplicados al modelo teórico presentando en el capítulo 8.2, se determinan los demás parámetros de diseño. Los resultados se presentan a continuación. En primer lugar, las

dimensiones geométricas de las zonas del tornillo se acomodan a las recomendaciones de (Savgorodny V. , 1978), se muestran en la Figura 39, pertenece a los planos de la planta prototipo.

Figura 39.

Propuesta de diseño tornillo



En este sentido, se presenta en la Tabla 26 los datos teóricos del diseño propuesto en comparación con los valores obtenidos de la extrusora del laboratorio, considerando la recomendación del cambio de transmisión, por tanto, su revolución de operación son 18rpm. Se evidencia que los parámetros de la holgura y la anchura se encuentran entre los rangos recomendados, lo cual se refleja en que el caudal de fuga es menor del 1% del flujo másico total. De igual forma, el diseño propuesto tiene un mejor rendimiento porque permite un mayor flujo másico a menores revoluciones, gracias a que las dimensiones que se le dieron al tornillo están bajo las recomendaciones de la teoría. Si bien la potencia del tornillo es la misma para ambas extrusoras, las revoluciones de trabajo del diseño propuesto son más bajas permitiendo que el torque que se genera para el flujo del material sea el óptimo para su funcionamiento.

Tabla 26.

Comparación datos técnicos de la extrusora del lab con la propuesta de diseño

Comparación datos técnicos de la extrusora del laboratorio con la propuesta de diseño		
Parámetros	Extrusora laboratorio	Extrusora diseño propuesto
Potencia del motor POT	2.4 [hp]	2 [hp]
Tipos de transmisión	Polea-engranaje-cadena	Caja reductora
Potencia del tornillo POT	1.9 [hp]	1.9 [hp]
Revoluciones n	18 [rpm]	13 [rpm]
Diámetro tornillo D	36 [mm]	36 [mm]
Longitud total L	760 [mm]	760 [mm]
L/D	21	21
Anchura de la hélice e	7 [mm]	3.6 [mm]
Holgura δ	0.5 [mm]	0.09 [mm]
Flujo másico m	2.2 [kg/h]	2.42 [kg/h]
Caudal fuga Qf	0.97 [kg/h]	0.013 [kg/h]
Viscosidad efectiva μ	400 [pa.s]	400 [pa.s]
Presión máxima P_{máx}	57.43 [mpa]	44.16 [mpa]
Nº resistencias	4 en el cilindro, 1 en la boquilla	6
Pot resistencias POT_R	700w, 650w	150 w

Ahora bien, aplicando el procedimiento de cálculo de la sección 8.2.3 para la camisa del tornillo de extrusión, para el diseño propuesto se obtiene lo mostrado en la Tabla 28.

Tabla 27.

Resultados camisa del tornillo de la extrusora propuesta

Camisa de la extrusora diseño propuesto		
Datos	Radio exterior r_e	60 mm
	Radio interior r_i	18,09mm
Resultados	Material	ASTM A53 grado B
	Esfuerzo de fluencia σ_y	240 MPa
	Esfuerzo radial σ_r	44.2 MPa
	Esfuerzo tangencial σ_t	94,6 MPa
	Esfuerzo admisible σ_{admisible}	94,6 MPa
	Presión máxima P_{máx}	44.16 MPa
	Factor de seguridad F_s	2,5



8.4.2 Selección del motor

Según la Tabla 26 para la propuesta de diseño las revoluciones de operación son 13rpm y teniendo en cuenta que las transmisiones de la máquina actual son robustas y pierden mucha

potencia, se decide optar por un motorreductor de tipo caja sin fin corona, en lugar de motor convencional. La selección fue el modelo S77DRS90M4 de la marca (SEW, 2022), según el catálogo sus características se presentan en Tabla 28:

Tabla 28.

Características motorreductor de la extrusora propuesta de diseño

Motorreductor sin fin corona	
Potencia del motor	2 Hp
Frecuencia	60 Hz
Velocidad de salida	13 rpm
Velocidad nominal del motor	1710 rpm
Par de salida	790 Nm
Corriente	Trifásica



Nota: Recopilado de (SEW, 2022)

8.4.3 Resistencias eléctricas

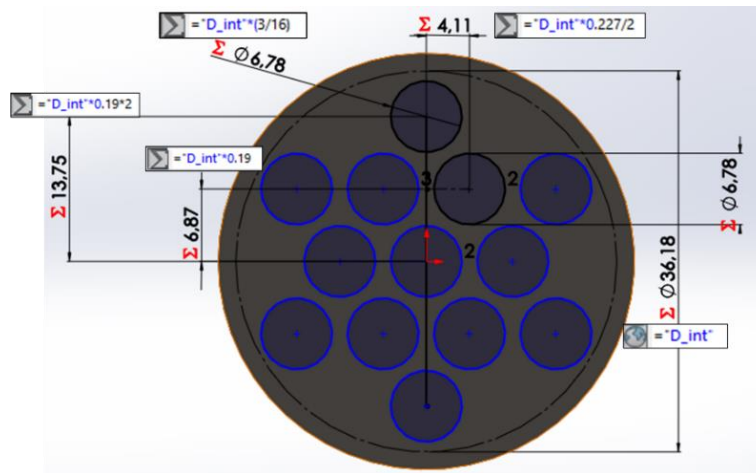
Ahora bien, aplicando el modelamiento presentado en la teoría de (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011) a las resistencias en la extrusora del diseño propuesto con los requisitos generales de la planta y las características propias como el flujo másico $\dot{m} = 2,42 \text{ kg/h}$ se obtuvo que la potencia eléctrica necesaria en la resistencia es de 322.5 W . Se diseñó con un factor de seguridad de 2.5, por lo tanto, la potencia pasaría a ser de 806.3 W . Para cumplir el requerimiento se seleccionaron 6 resistencias tipo abrazadera de 150 W de potencia.

8.4.4 Plato rompedor

Dentro del diseño se propone añadir el plato rompedor para cortar el flujo en espiral del material y reducir la presión de retroceso. Las extrusoras en la industria normalmente traen este elemento, sin embargo, la extrusora del laboratorio no. Para su diseño se utilizó el modelo matemático de (Piñeros & Acosta, 2019), del que se definió la distribución de 13 agujeros de $\text{Ø}6,78\text{mm}$ presentada en la Figura 40.

Figura 40.

Patrón de orificios en un plato rompedor.



Nota: Inspirada de (Piñeros & Acosta, 2019)

8.4.5 Tornillos de sujeción

La fuerza que soportan los tornillos que sujetan la boquilla al cabezal se calcula con el procedimiento presentado en el Apéndice B. Se obtiene que, para la configuración de 6 tornillos, cada uno soporta una carga de $F_{\text{tornillo}} = 7.6 \text{ kN}$ con un factor de seguridad de 2.5. Dicha información, se comparó con las fuerzas de falla de algunas referencias del mercado como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29.

Comparativa selección tornillos de sujeción

Diámetro de cresta del tornillo	Fuerza de cada tornillo	Fuerza para que el perno falle	Fuerza para que falle la junta
6 mm		7.6 [kN]	22.7 [kN]
8 mm	7.6 [kN]	12.4 [kN]	37.2 [kN]
10 mm		18.7 [kN]	56 [kN]

Según el factor de seguridad aplicado el tornillo de M6 queda muy justo, y el de M10 es muy grande para el diseño, por lo que se selecciona un tornillo de M8.

8.4.6 Selección de rodamientos

De igual manera, es preciso seleccionar los rodamientos que resistirían el tornillo que está dispuesto en voladizo. Para ello, basado en el método dispuesto por (Savgorodny V. K., 1978) se encontraron las fuerzas que soportan (En el Apéndice B está detallado el procedimiento realizado) y luego, con el procedimiento de (SKF, 2019) se seleccionaron los rodamientos de la Tabla 30.

Tabla 30.

Rodamientos seleccionados para tornillos propuesta de diseño

	Rodamiento I	Rodamiento II
Referencia	30304	206
Tipo de rodamiento	Rodillos cónicos	Rígido de bolas
Capacidad de carga dinámica básica	41.9 kN	20.9 kN
Capacidad de carga estática básica	32.5 kN	16.3 kN
Factor de cálculo dinámico	2	-
Factor de cálculo estático	1.1	-
Relación de carga	1.52	532.14

Posteriormente se seleccionó el tipo de lubricante, tolerancias, y sellos que lleva cada rodamiento con la teoría (SKF, 2019), los resultados se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31.

Selección de lubricante, sello, y tolerancia de cada rodamiento.

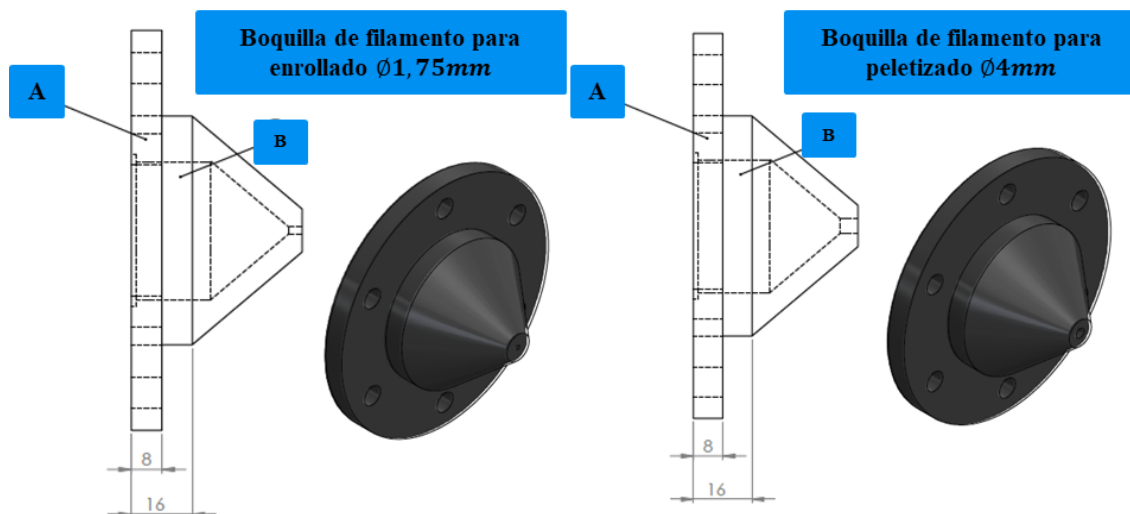
	Rodamiento I	Rodamiento II
Lubricante	LGEV 2	LGEV 2
Índice de lubricación	Lub. Extrema con EP y AW como aditivos	Lub. Extrema con EP y AW como aditivos
Tolerancia Aro interior giratorio	Ajuste con interferencia de k6 con el eje	Ajuste con interferencia de j6 con el eje
Tolerancia Aro exterior giratorio	Ajuste flojo de G7 con el alojamiento	Ajuste flojo de G7 con el alojamiento
Sello	HMSA10V	HMSA10V

8.4.7 Boquillas

La extrusora se diseñó para un sistema intercambiable de boquillas, que se unen por medio de tornillos a la estructura de la camisa. Se plantea el diseño en la Figura 41, que considera dos geometrías fundamentales: A, para unir la pieza con el resto del sistema tiene los agujeros para 6 tornillos de sujeción y garantizar la continuidad del material a través de la boquilla y B, para comprimir el material en estado plástico y que a su salida tenga la geometría requerida, para el caso de la boquilla para filamento para impresión 3D de $\varnothing 1,75mm$ y en el caso del peletizado, filamento de $\varnothing 4mm$. Se seleccionó para su fabricación acero AISI 4140.

Figura 41.

Boquillas de filamento para enrollado y peletizado diseño propuesto



8.4.8 Ficha técnica

A continuación, en la **Figura 42** se presenta la ficha técnica del diseño propuesto para la extrusora de la planta prototipo para la fabricación de pellets y filamento.

Figura 42.

Ficha técnica extrusora diseño propuesto

FICHA TÉCNICA		
EXTRUSORA PARA PLÁSTICO		
Tipo de Extrusora	Tornillo único eje	
Capacidad/Rendimiento	2,42 Kg/h	
Rango de T°	25°C - 300 °C	
N° de Operarios	1	
Potencia	Motorreductor	2,4 HP 1710 rpm 60 Hz Trifásica
	Variador de frecuencia	1710-500
	Rpm salida	13rpm
	Relación Total	131 (Motor) : 1 (Tornillo)
Tornillo	Diámetro del Tornillo	36 mm
	L/D	21
	Zonas del Tornillo	3
	Pmáx	Alimentación - Transción - Dosificación 44 Mpa
Resistencias	N° Resistencias	6
	Controles de T°	4
	Tipo de resistencias	Abrazadera
	Resistencias Camisa [4]	Pot 150w D80mm L80mm
	Resistencia Cabezal [1]	Pot 150w D128mm L45mm
Tolva	Resistencia Pellets [1]	Pot 150w D56mm L20mm
	Apertura de la Tolva	21,4 cm x 20,4cm
	Volumen de la Tolva	3945 cm ³

8.5 Actividades de intervención

De acuerdo con el diagnóstico realizado en el informe del análisis teórico – funcional, se establecieron algunas actividades de intervención para mejorar la máquina del laboratorio. Se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32.

Actividades de intervención de la extrusora del laboratorio

SITUACIÓN	ACTIVIDAD	FOTOGRAFIA	RESULTADO
<p>La ubicación del variador de frecuencia hace necesario que el operario deba desplazarse a la parte posterior de la máquina, aumentando el riesgo al que se expone debido a las altas temperaturas y generando incomodidad.</p>	<p>Para ubicar el variador en la zona de control general de la máquina se dispone de la estructura del bastidor adaptando una lámina de calibre 20 de 40cm x 25cm donde está la nueva posición del variador.</p>		<p>Se disminuyó el riesgo al que se expone el operario y se ubicó en una posición de fácil acceso en la zona de mando de la máquina.</p>
<p>El tiempo de calentamiento de la máquina es alto, además gran parte del calor es dirigido hacia los sistemas eléctricos de la máquina.</p>	<p>Se dispone de kawol o fibra cerámica envuelta en las zonas donde las resistencias no están abrazando el cilindro.</p>		<p>El tiempo de calentamiento se redujo y se evidenció mejor control en las resistencias, permitiendo un mejor espectro de temperaturas a lo largo del cilindro.</p>

<p>La alimentación de la extrusora está directamente conectada al totalizador del laboratorio. Además, genera dificultades si se requiere movilizar la máquina, y representa un peligro debido a que no están aislados eléctricamente.</p>	<p>Se adquirió un juego de clavija más toma aéreo industrial y se instaló entre la extrusora y el totalizador.</p>		<p>Se disminuyó el riesgo eléctrico al que se expone el operario al encender la máquina. En algún caso donde se requiera trasladar la máquina, la conexión a una fuente de alimentación es más sencilla.</p>
<p>El ingreso de materia prima a la extrusora, ya sean pellets o triturado se complica debido a que la tolva es muy alta.</p>	<p>Se disminuyó la altura de la tolva cortando parte de ella mediante una pulidora y disco de corte.</p>		<p>Se facilita el depósito de material en la tolva de la extrusora.</p>
<p>La tolva y la protección de la transmisión se encuentran oxidadas.</p>	<p>Se eliminó el óxido de las piezas y se aplicó pintura anticorrosiva para proteger sus superficies, mejorar su vida útil y su aspecto.</p>		<p>Se eliminó el óxido de las piezas aumentando su vida útil.</p>

Se encontró que para las roscas del cabezal y los tornillos están maltratados y no funciona. No se pueden poner todos los tornillos.

Se compró un macho de 3/8'' y se restauraron las roscas en el cabezal. Se compraron 5 tornillos de 3/8'' de acero inoxidable, para reemplazar los tornillos deteriorados.



Con el arreglo se pudieron colocar los 5 tornillos, mejorando el apriete y el ajuste de la boquilla al cabezal.

Los testigos que indican el encendido y apagado de las resistencias no funcionan, por lo que no es posible saber en qué momento la resistencia está recibiendo o no corriente.

Se adquieren 3 testigos de color verde para ser reemplazados por los componentes deteriorados de la extrusora.



Se percibe mucho mejor cómo el controlador de temperatura cumple su función, y el operario puede observar cuándo la resistencia está funcionando o no, según el controlador on/off de la máquina.

No hay una información concreta de las características y parámetros de funcionamiento de la máquina como una guía, o ficha técnica.

Se caracteriza los elementos que componen la máquina y se realiza un informe funcional para extraer los parámetros de operación de la máquina. Y se exponen los resultados en la máquina por medio de la ficha técnica.



Parte del propósito de mostrar una ficha técnica es difundir la información y que el operario tenga conocimiento acerca de los parámetros de funcionamiento como también de las medidas generales de la máquina.

Luego de las actividades de intervención se redujo el riesgo al que estaban expuestos los operarios, se mejoró el aspecto y el funcionamiento de la máquina: la transformación del material se hizo más eficiente y rápida, además que los conocimientos obtenidos acerca de sus propiedades hacen que el proceso sea más sencillo. Por medio de las actividades realizadas, se mejoró la vida útil de la máquina. En las Figura 43 se muestra el resultado final.

Figura 43.

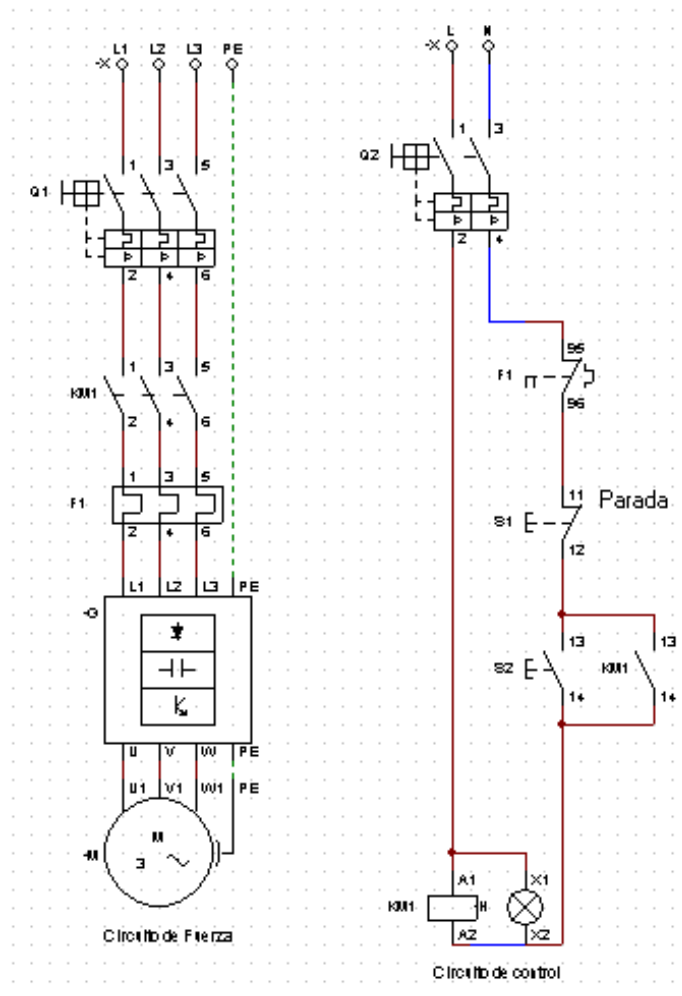
Resultado final de las actividades de intervención en la extrusora del laboratorio



De igual manera como parte final de la intervención a la máquina, se realizó un análisis de los componentes eléctricos de la extrusora. Se presentan dos diagramas, realizados con el software opensource Cade Simu 2022, que contienen la distribución eléctrica del motor (Figura 44) y las resistencias de la extrusora (Figura 45).

Figura 44.

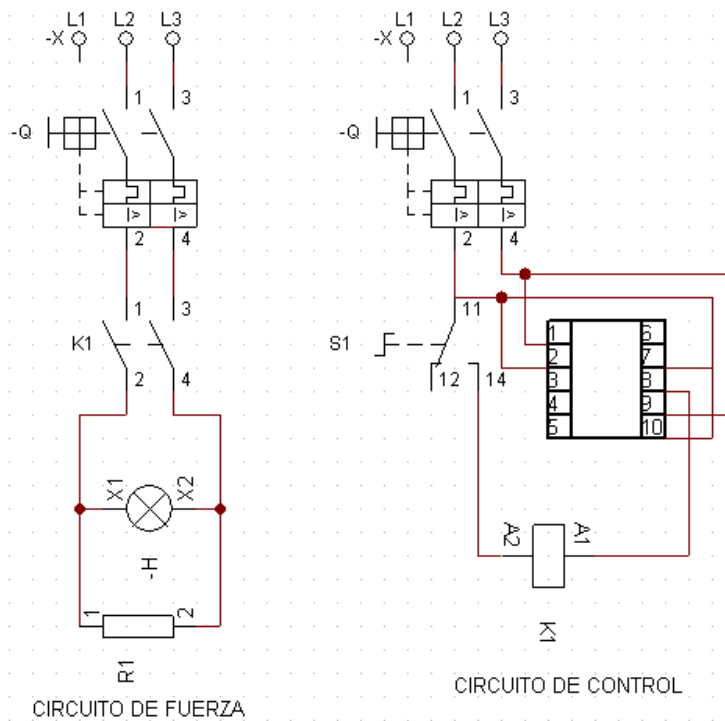
Circuito eléctrico del motor de la extrusora.



El circuito de fuerza del motor de la extrusora es una conexión directa con variador de frecuencia, cuenta con los componentes de protección Breaker (Q1) y Relé térmico (F1) que protege al mismo de cortos circuitos y sobre cargas, además cuenta con un contactor (KM1) como elemento de maniobra para el circuito de control. El circuito de control de la extrusora es de pulsador con enclavamiento, el cual permite que el motor funcione una vez se deje de pulsar, cuenta con un testigo de encendido.

Figura 45.

Circuito eléctrico de las resistencias



El circuito de fuerza de las resistencias de la extrusora, cuentan con un breaker (Q1) como dispositivo de protección, un testigo de encendido (H) y un contactor (K1) como elemento de maniobra para el sistema de control. Mientras el circuito de control está protegido por un breaker, cuenta con una perilla NC de dos posiciones como dispositivo de encendido, tiene un controlador que acciona la bobina del contactor K1 dependiendo de la señal de entrada del sensor.

9. Sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado

En este capítulo se encontrará la caracterización, el informe funcional, la propuesta de diseño, las actividades de intervención y la implementación de la línea de peletizado. de manera ampliada se encuentra en el Apéndice C.

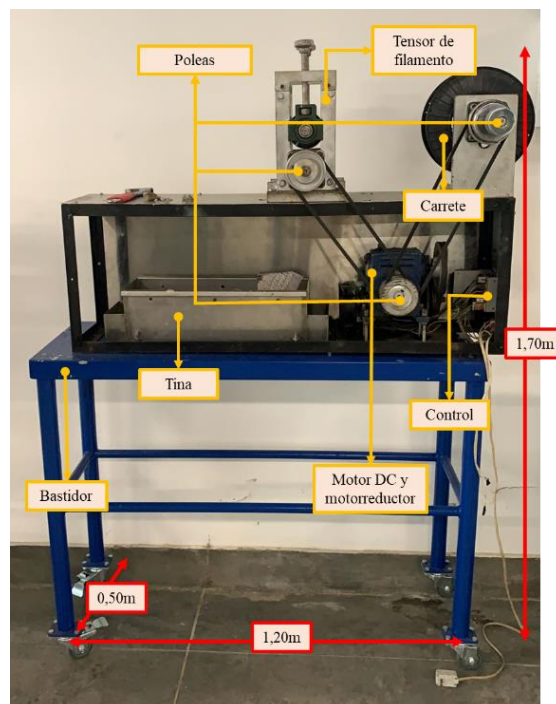
9.1 Caracterización

Inicialmente este módulo de la planta se compone únicamente del proceso de enrollado. El banco cuenta con un motor DC acoplado a un motorreductor que hacen girar el carrete y un par de rodillos, estos últimos se encargan de dar el diámetro adecuado al filamento a la vez que ejercen tensión y empujan el filamento hacia el carrete. La máquina cuenta con un sistema de sujeción que permite acoplar carretes de diferentes anchos y diámetros. Por último, está el sistema eléctrico que cuenta con un control para las revoluciones del enrollado.

De acuerdo con la información acerca de la adquisición del equipo, en este módulo estaba incluido un sistema de enfriamiento, pero no hay un proceso concreto, solo se presenta una tina con agujeros. Los componentes se observan en la Figura 46.

Figura 46.

Componentes de la enrolladora.



9.2 Informe del análisis funcional

A partir de la caracterización de la maquina y su funcionamiento se realizó un análisis de sus componentes. En primer lugar, se estudió la enrolladora y se obtuvo que:

- El sistema para enrollado es capaz de satisfacer las diferentes velocidades de salida del filamento ya que cuenta con un control que permite un amplio rango de variación para las revoluciones del motor.
- La transmisión de potencia del motor hacia el carrete es por poleas, se encuentra está expuesta al no contar con una protección de seguridad para el operario. Se examinó la posibilidad de cambiar de posición los elementos, pero se encontró que el motor esta fijo a la estructura mediante soldadura. Ver en la Figura 47.

Figura 47.

Motor DC de la enrolladora del laboratorio



Con respecto a la parte eléctrica se encontró un deterioro de los cables que energizan la máquina, así como los interruptores. Incluso hay un juego de interruptor de codo con cables que no energizan ningún sistema. Se observa en la Figura 48.

Figura 48.

Sistema eléctrico de la enrolladora del laboratorio



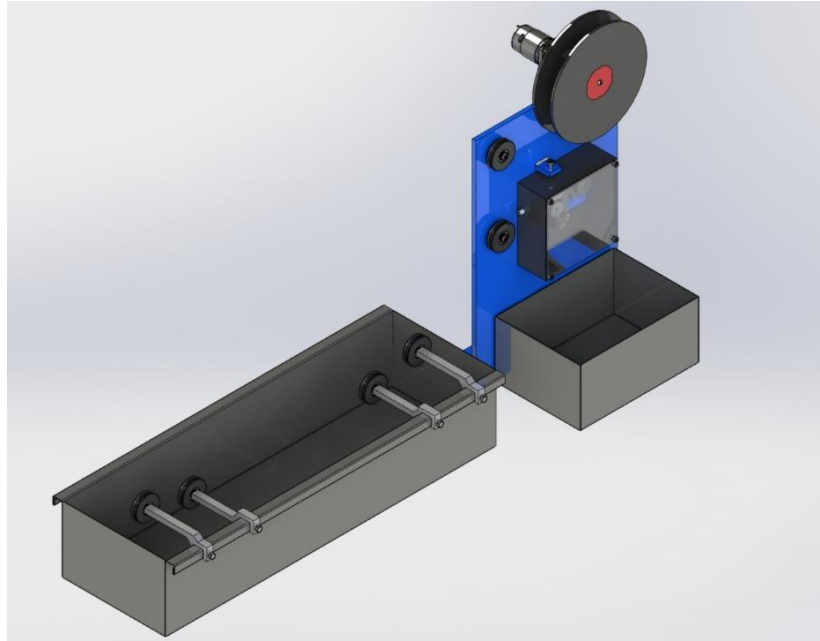
Finalmente, se analiza la estructura donde se encuentra la máquina y se encuentra el espacio suficiente para implementar las líneas de enfriamiento y peletizado.

9.3 Propuesta de Diseño

Este subsistema se diseñó en base a los flujos másicos de trabajo de la extrusora y se dispuso de tal manera que la tina de enfriamiento y las poleas que guían el material sean comunes a ambos procesos, lo que permite menos costos y un menor requerimiento de espacio. A su vez el sistema de enrollado se ubicó sobre el sistema de pellets para aprovechar la misma base y hacer más sencillo el montaje. Algunos componentes fueron pensados y diseñados para ser manufacturados mediante nuevas técnicas como la impresión 3D y el sistema de corte permite realizar grandes variaciones en el largo de los pellets, como también permite el montaje de un rotor con diferente cantidad de filamentos. Se muestra en la Figura 49.

Figura 49.

Ensamblaje enfriamiento, enrollado y peletizado diseño propuesto



9.3.1 Enfriamiento

La eliminación del calor para mantener las dimensiones del filamento es tan importante para un proceso como agregar el calor durante la extrusión para hacer que el polímero fluya (Frankland, 2015). El filamento producido por la extrusora debe mantener su forma y dimensión luego de salir por la boquilla, donde ha estado bajo un rango de temperaturas de trabajo que oscila entre los 30°C y los 250°C, aproximadamente a 220°C. Para tal fin se examina las posibilidades de enfriamiento donde se contempla convección forzada por medio de ventiladores y una convección combinada por medio de una tina con agua, donde interactúa el hilo circulante con el agua por convección forzada y con el aire ambiente por una convección natural. Al final, se selecciona la opción con agua debido a la alta capacidad calorífica que tiene el fluido, de modo que se puede instalar un sistema estacionario, sencillo, eficiente y que sea económico.

El proceso que se propone contempla que después de que el filamento salga por la boquilla se sumerge en un recipiente con agua entregándole calor y a su vez la superficie del agua le suministra calor al ambiente. Cabe destacar que las condiciones iniciales se basan en los parámetros del modelado teórico realizado a la extrusora del laboratorio de mantenimiento. En la Tabla 33, se muestran los datos necesarios para el diseño de la tina de enfriamiento.

Tabla 33.

Condiciones iniciales para cálculo y propiedades ambientales de Bucaramanga.

Condiciones iniciales para cálculo y ambientales de Bucaramanga	
Flujo másico de la extrusora \dot{m}	2.42 [kg/h]
Temperatura de salida de la extrusora T_1	230°C
Presión a la altura de Bucaramanga P_{atm}	90.322 [KPa] ^a
Temperatura máxima diaria aproximada T_{amb}	27°C ^b
Propiedades del aire P_{atm} y T_{amb} de Bucaramanga	
Calor específico C_p	1.006 [J * K/kg]
Número de Prandtl P_r	0.7071
Densidad ρ_∞	1.048 [Kg/m ³]
Viscosidad dinámica μ	0.00001854 [N * S/m ²]
Viscosidad cinemática ν	0.00001769 [m ² /s]
Conductividad Térmica K	0.02587 [$\frac{J}{s * K * m}$]

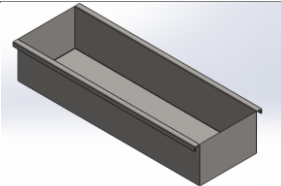
Nota: Recopilado de ^a este dato se calculó a partir de la altura de la ciudad ^b (Weather Spark, s.f.)

Según la metodología de (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones, 2011) y considerando un sistema concentrado en condiciones estacionarias de operación a presión atmosférica y temperatura máxima diaria de Bucaramanga, se determinan en la Tabla 34 las dimensiones de la tina.

Tabla 34.

Dimensiones de la tina de enfriamiento.

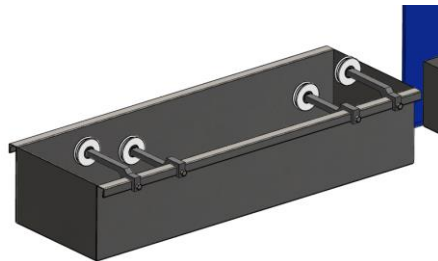
Dimensiones de la tina	
Altura	141 mm
Ancho	258 mm
Largo	696 mm



El rango de temperaturas que opera la tina es de 41-71°C. A través de ella circula flujo constante de material, cuenta con sistema de poleas ver **Figura 50**, dispuesto de manera que el filamento para enrollado y la para pellets se transporta continuamente y se sumerge lo necesario para que el agua absorba en calor y la temperatura del plástico a la salida sea menor.

Figura 50.

Sistema de poleas para el enfriamiento de la propuesta de diseño



Finalmente, a partir de las ecuaciones de transferencia de calor y su procedimiento consignado en el Apéndice C, se obtiene la temperatura de salida del filamento y las energías en forma de calor con apoyo del software EES. Los resultados se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35.

Resultados de la transferencia de calor del enfriamiento

Parámetros	Valor
Calor extraído del filamento, Q_{pet}	131.8 [W]
Calor del agua al aire, $Q_{conv\ aire-agua}$	41.46 [W]
Calor del metal de la tina al aire, $Q_{conv\ aire-metal}$	90.4 [W]
Temperatura de salida del filamento, T_2	71.8[°C]

Se evidencia que la temperatura del PETG a la salida de la tina de enfriamiento es de aproximadamente 72°C, es decir está 10°C debajo de la temperatura de transición vítrea, indicando que el filamento está en un estado sólido y no deformable apto para los procesos de peletizado o enrollado.

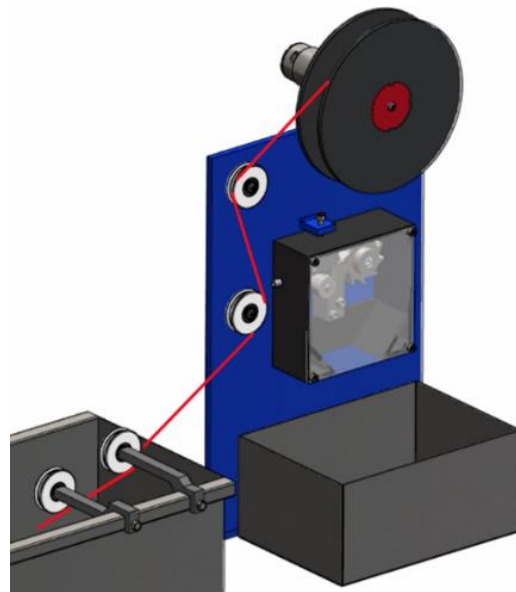
Una vez sale el filamento de la zona de enfriamiento se articula para el proceso específico de producción de enrollado o peletizado, por medio del cilindro motriz. Este se compone de una polea acoplada a un motorreductor DC que funciona como tensor.

9.3.2 Enrollado

Las poleas que guían el filamento se ubicaron estratégicamente para que mantenga la tensión a transporte, en la Figura 51 se puede ver el camino que sigue el filamento para enrollado.

Figura 51.

Configuración del módulo para enrollado.



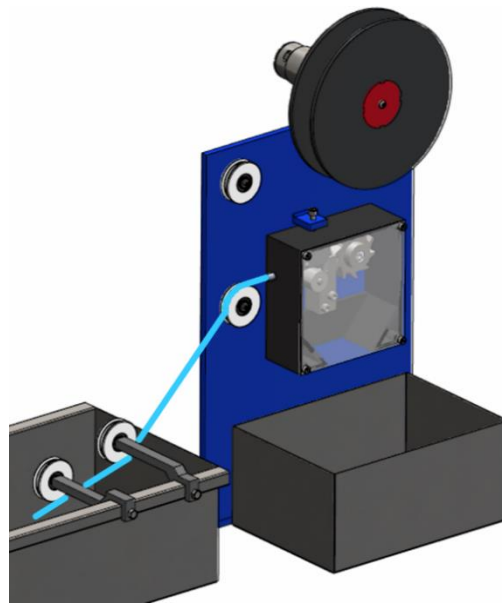
Su cálculo fundamental son las revoluciones necesarias del carrete para el flujo másico que arroja la extrusora, de ahí se selecciona el motor. Se calcula a partir del flujo másico en relación con la velocidad de salida de filamento y de allí la velocidad angular del carrete, en el Apéndice C están ampliados los cálculos. Se obtuvo que la velocidad del filamento es $V_{\text{filamento}} = 0.2151 \text{ [m/s]}$ y el carrete gira a $RPM_{\text{carrete}} = 51.36 \text{ [rev/min]}$.

9.3.3 Peletizado

En la Figura 52 se puede ver el camino que sigue el filamento para la producción de pellets. Los componentes que forman el sistema de producción de pellets se encuentran en una caja de PLA que funciona como una protección para el operario y brinda visibilidad del proceso. Además, cuenta con un recipiente para el almacenamiento de los pellets.

Figura 52.

Configuración del módulo para peletizado.

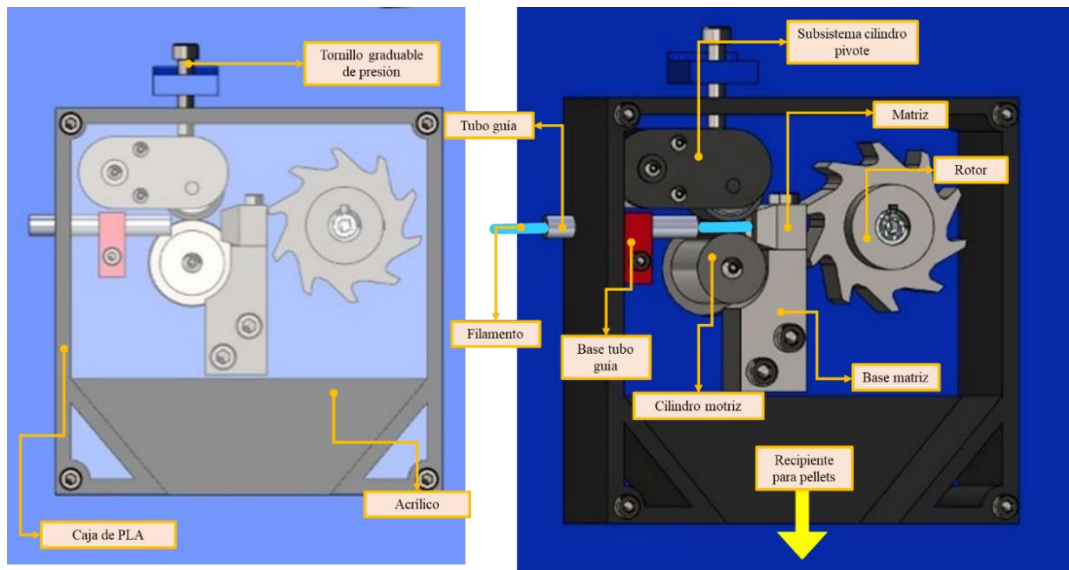


El sistema de peletizado consta de dos partes: sistema de rodillos, y sistema de corte de pellets. El sistema de rodillos está conformado por un cilindro motriz y un subsistema de cilindro pivote, donde este último es el encargado de mantener la compresión en el material para obtener un diámetro de filamento deseado y empujarlo hacia el sistema de corte de pellets, cabe destacar que la presión que ejerce el cilindro pivote es graduable mediante un tornillo (revisar Apéndice D). El sistema de corte de pellets está conformado por la base, la matriz que funciona como guía

para que el filamento, y por el rotor que en su giro va cortando los pellets que caen a la zona de almacenamiento, se basó en la teoría de peletizado por rotor de (Morton-Jones, 1997) . Los sistemas a detalle se observan en la Figura 53.

Figura 53.

Componentes del sistema de peletizado.



Para la selección del motor es necesario saber el torque requerido para romper el PET y las revoluciones para corte que depende de la velocidad del filamento. Para ello, con la propiedad de la energía de impacto del PET G_c se calcula la fuerza de corte a partir del diámetro del pellet $D_{pellet} = 4mm$ y el N°_{hilos} que en este caso es 1.

$$F_{corte} = G_c * D_{pellet} * N^\circ_{hilos} [N]$$

$$F_{corte} = 82000 \frac{J}{m} * \frac{4}{1000} m * 1 = 328 [N]$$

El torque se calcula teniendo en cuenta la distancia desde el eje del motor hasta el punto de aplicación de la fuerza, $d_{corte} = 3[cm]$. Se obtiene que $Torque = 9.84 [N.m] = 100.3 [kg.cm]$

Ahora bien, para las revoluciones con la metodología de cálculo usada para el enrollado en la sección 9.3.2, se calcula con la velocidad del filamento para la producción de pellets. El valor obtenido es: 82.4 [rpm]. Con esta información, se selecciona la referencia de motorreductor M7-RS775-12 de la empresa (Zebra Gearbox, s.f.) sus características se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36.

Selección del motor para peletizado.

Motorreductor DC	
Voltaje	12 V
Amperaje	10 A
Torque	281 kg.cm
Revoluciones	114 rpm

9.3.4 Ficha técnica

En la Figura 42 se presenta la ficha técnica del diseño propuesto para el sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado de la planta prototipo.

Figura 54.

Ficha técnica Enfriamiento, enrollado y peletizado diseño propuesto

FICHA TÉCNICA ENFRIAMIENTO, ENROLLADO Y PELETIZADO		
Proceso de producción	Filamento y Pellets	
Tipo de enfriamiento	Por agua sin recirculación	
Capacidad/Rendimiento	2,42 kg/h	
N° de Operarios	1	
Potencia	Motorreductor	12V 10A 281kg/cm 114rpm DC
	Tensor	Sí, tipo prensa
Enfriamiento	Elemento	Tina 26057 cm ³
	Descripción	Filamento circula a través de las poleas en la tina
Filamento	Frecuencia	Continuo, con poleas hasta carrete en giro
Pellets	Frecuencia	Continuo
	Tipo de Corte	Por rotor para corte en frío

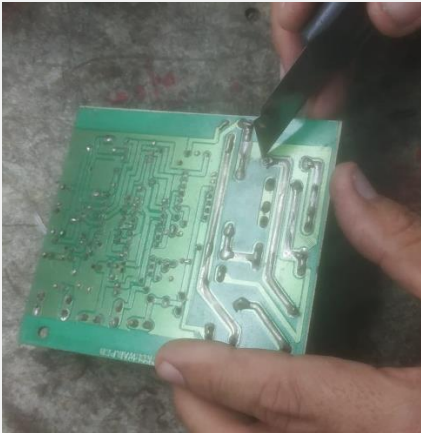
9.4 Actividades de intervención

De acuerdo con el informe del análisis del funcional y el modelo teórico realizado para la propuesta de diseño, se identifican algunas actividades de intervención para mejorar el estado del equipo. Se presentan en la **Tabla 37**.

9.4.1 General

Tabla 37.

Actividades de intervención al módulo de enfriamiento y enrollado del laboratorio

SITUACIÓN	ACTIVIDAD	FOTOGRAFÍA	OBSERVACIONES
<p>El motor para embobinado de filamento no funciona correctamente ya que en ocasiones no enciende, el carrete de filamento tiene un giro intermitente, lo que no permite una continuidad en el enrollado.</p>	<p>Se analiza la PCB que controla las revoluciones del motor DC, encontrando un componente que no tiene buena transferencia de calor a través de su disipador, provocando deterioro en una conexión de estaño entre dos componentes por lo que se repara la soldadura permitiendo mejor paso de corriente. Además, se cambia la pasta térmica que une el disipador con el componente que desprende energía en forma de calor.</p>		<p>El motor no presenta discontinuidad en su funcionamiento, y el carrete gira normalmente según el cambio de revoluciones que se ajuste con el potenciómetro.</p>

La configuración con la que está hecha la tina de agua no permite un buen manejo del filamento. La tina cuenta con agujeros para el ingreso de filamento sin embargo se dificulta el manejo de material.

Se diseña un sistema de poleas para que guíe el filamento dentro del agua y tapones para obtener un mayor nivel de agua en la tina, y así retirar gran parte del calor con el que sale el producto.



Se facilita la manipulación del filamento y hay menos tolerancia en el diámetro debido a que tiene un mejor enfriamiento, mejorando la producción tanto de pellets como de filamento para impresión 3D.

El cable que energiza el sistema de embobinado de filamento está en deterioro por lo que hay riesgo de sobrecargas o electrocuciones en el peor de los casos.

Se adquiere cable calibre 12 y una clavija para conectar el sistema de embobinado a la fuente de corriente.



Se logró mejorar las conexiones eléctricas y la seguridad en el uso de la máquina.

Hay un interruptor dañado que además no tiene ninguna función en la sección de control de la máquina por lo que ocupa espacio que se puede utilizar para otros fines.

Se instala un interruptor de codo con el fin de encender o apagar los dos ventiladores instalados en la sección de enfriamiento de pellets, se añade también etiquetas para identificar cada elemento.



Se aprovechó un espacio desperdiciado por el elemento dañado, y ahora cada interruptor se identifica mejor respecto al elemento que controla o energiza.

9.4.2 Implementación Peletizado

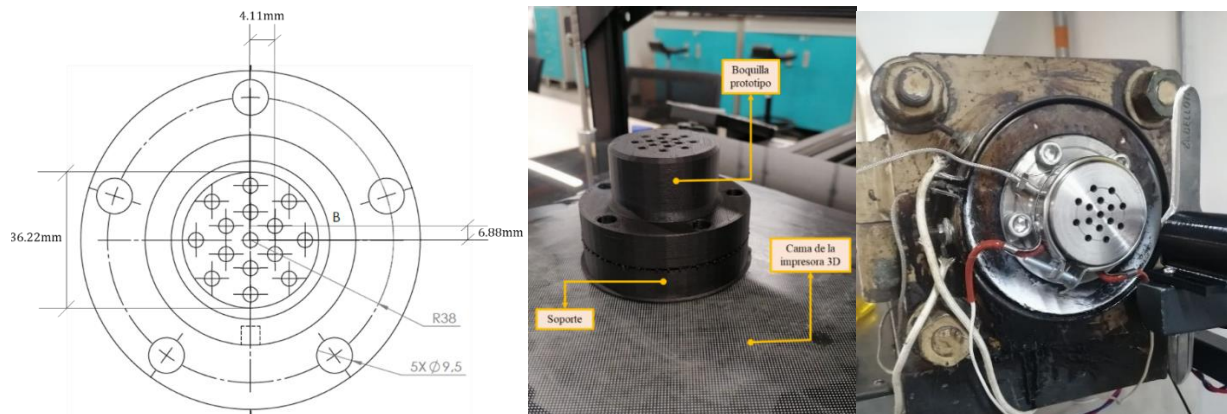
Para añadir una línea de producción de pellets en la planta del laboratorio se realizó un diseño aprovechando los espacios disponibles y tomando en consideración las variables de funcionamiento de las máquinas.

9.4.2.1 Boquilla para pellets

Para el diseño de la boquilla para pellets se tuvo en cuenta la geometría y las dimensiones del cabezal de la extrusora y los agujeros de los tornillos de sujeción. Se estableció el patrón de agujeros para la boquilla siguiendo la metodología de cálculo utilizada para el plato rompedor de la extrusora consignado en la sección 8.4.4. Una vez realizados los cálculos, se crearon los planos para la fabricación de la boquilla (izq. Figura 55), consignados en el Apéndice E. La fase de construcción se realizó en dos etapas: una primera de prototipado en impresión 3D con PLA para verificar que se acoplara adecuadamente al cabezal de la extrusora (centro. Figura 55), Y una segunda etapa de manufactura, donde bajo las especificaciones de los planos se mandó a fabricar la boquilla en un taller de mecanizado en acero AISI 4140 (dcha.. Figura 55).

Figura 55.

Boquilla para pellets: diseño detalle, prototipado y fabricado



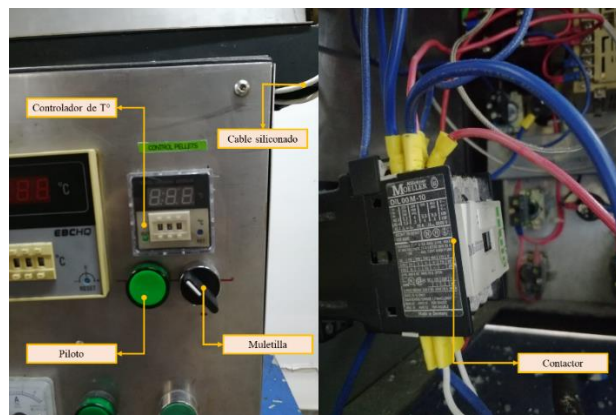
9.4.2.2 Sistema de temperatura y control de la extrusión para el peletizado

Teniendo en cuenta las dimensiones del cabezal de la extrusora se hace necesario implementar una resistencia en la boquilla, incluyendo su sistema de control eléctrico, para garantizar unas mejores condiciones de salida del filamento para peletizado. Debido al calor acumulado con el que cuenta el material en las etapas del tornillo no se hace necesario aplicar demasiada potencia eléctrica para ejercer un control sobre la temperatura de salida del filamento. Para la boquilla se manda a elaborar una resistencia de 56 mm de diámetro interno y 20 mm de ancho a 150W a 220V y 2 A por recomendación de los fabricantes.

Para el sistema de control eléctrico de la resistencia se hizo necesario adquirir de los siguientes elementos, ver Figura 56: un controlador, que establece el set point de la resistencia a cierta temperatura; el contactor, encargado de enviar corriente a la resistencia; una muletilla, para accionar la resistencia, un piloto o testigo, que indica que el control está en operación, y cable siliconado para conectar la resistencia con el contactor y dicho cable resista las altas temperaturas.

Figura 56.

Sistema para el control de T° de la resistencia eléctrica instalada



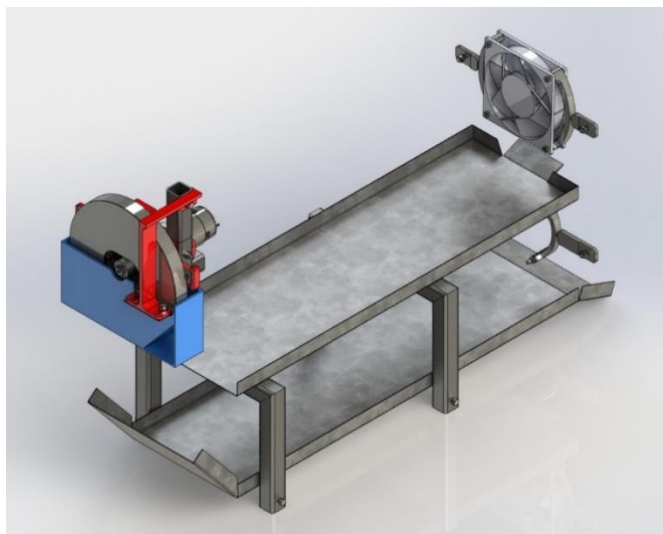
Para su instalación en la máquina extrusora del laboratorio se hizo necesario taladrar la lámina de acero inoxidable del sistema de control de las demás resistencias, así como la ubicación de los elementos de protección eléctrica en la parte posterior de la máquina.

9.4.2.3 Sistema de peletizado

Para diseño del sistema de peletizado se tuvo en cuenta el espacio disponible y se ubicó después del sistema de rodillos con el objetivo de realizar variaciones del diámetro de filamento. Para la fabricación de este sistema se hizo uso de diversos materiales con el fin de reducir los costos; entre los que se pueden encontrar: la tubería estructural, la impresión 3D (PLA), acero templado para las cuchillas, y láminas de acero galvanizado para la zona de enfriamiento. Las piezas que se construyeron en impresión 3D fueron diseñadas específicamente para este tipo de manufactura evitando las superficies o áreas en voladizo con la finalidad de reducir los tiempos de impresión y la cantidad de material. También es importante mencionar que la configuración de las impresiones se realizó buscando la más alta resistencia de las piezas. En la Figura 57 se observa el CAD del diseño a implementar.

Figura 57.

Render del sistema de peletizado implementado en el laboratorio.

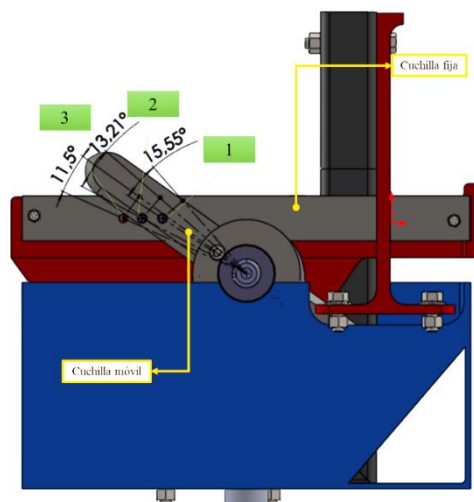


El torque necesario para el proceso de los pellets relaciona la fuerza de corte del filamento $F_{corte} = 328 N$, obtenida de los cálculos realizados en la sección 9.3.3, con la distancia de corte de $d_{corte} = 4.31[cm]$ para la distribución geométrica establecida. En el diseño se propone que la cuchilla fija, presentado en la **Figura 58**, se realizó con 3 agujeros buscando una distribución donde la cuchilla móvil cortara en un solo giro 3 hilos de filamento haciendo un corte a la vez, a partir del mismo torque. Para el cálculo, se obtiene que

$$Torque = F_{corte} * d_{corte} = 328 * \frac{4.11}{100} = 13.48 [N.m] = 144.1 [kg.cm]$$

Figura 58.

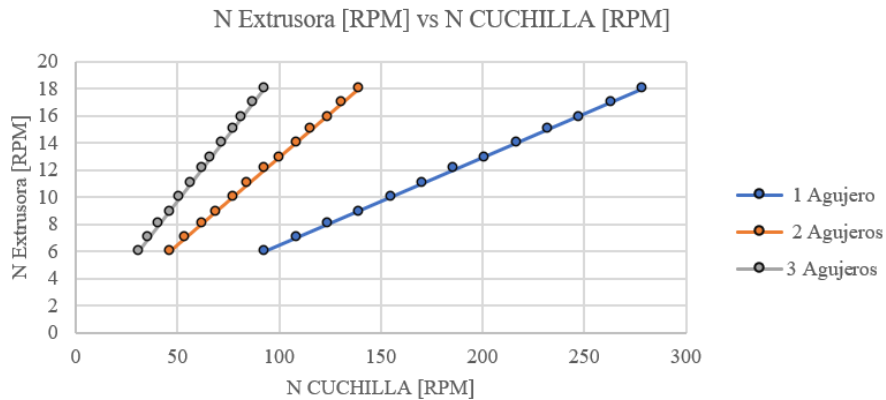
CAD sistema de peletizado implementado en el laboratorio



Definido el torque necesario, se debe establecer la relación entre las revoluciones de la extrusora con el flujo masico del filamento para pellet que produce. En la Figura 59 se presenta la variación de las revoluciones de la cuchilla de acuerdo con el número de filamentos que pasan por los agujeros de la cuchilla fija. Este diagrama se realiza con el supuesto que las revoluciones de trabajo de la extrusora son 18rpm máximas, sección 8.3 del capítulo de Sistema de Extrusora.

Figura 59.

Variación revoluciones de la cuchilla vs número de filamentos a cortar



Se muestra en la Figura 59 la relación entre las revoluciones necesarias del motor de la cuchilla para diferente número hilos (agujeros) y las revoluciones de la extrusora, se observa que entre más revoluciones de la extrusora se hace necesario cortar más hilos a la vez para las mismas revoluciones de la cuchilla. Teniendo en cuenta ese principio, se concluye que el motor necesita 93 rpm para suplir 2.2 kg/h usando 3 agujeros. Se selecciona un motorreductor DC de marca (Zebra Gearbox, s.f.), sus características se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38.

Selección del motor para peletizado del laboratorio.

Motorreductor DC	
Voltaje	12 V
Amperaje	10 A
Torque	281 kg.cm
Revoluciones	114 rpm

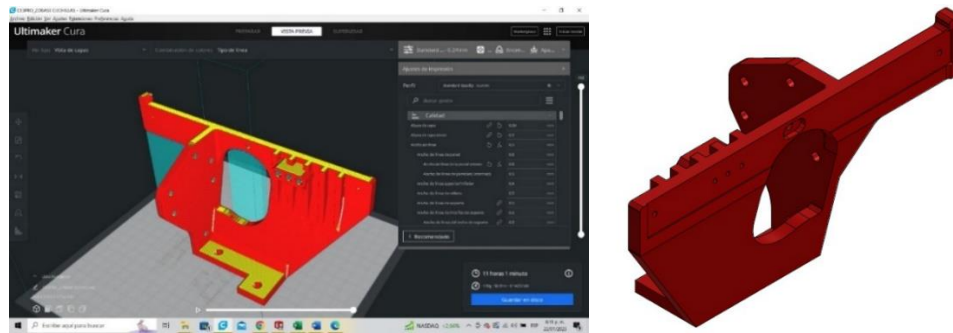


Nota: Adaptado de (Zebra Gearbox, s.f.).

Para la estructura que sostiene el sistema de corte de los pellets y su almacenamiento, se plantearon modelos CAD para fabricación por impresión 3D, como la base de las cuchillas, la tina para los pellets, las poleas y soportes del sistema de enfriamiento y las bases de los ventiladores. Las características se establecieron para la optimización de material y el tiempo de impresión, en la Figura 60 se observa el STL en el programa 3D Cura con los parámetros ingresados.

Figura 60.

STL para impresión 3D de base de las cuchillas



El elemento principal de la estructura es la base de las cuchillas, mostrado en la Figura 60 que articula al anclaje del sistema al módulo del enfriamiento y enrollado, dispone la cuchilla fija con la cuchilla móvil, sostiene el motor, y tiene las entradas de los 3 hilos para el corte. Ahora bien, el diseño de las cuchillas fue planeado para que la cuchilla fija y la móvil aplicaran una fuerza de cizalla en el material, ver Figura 61. Para su manufactura se reutilizaron herramientas de corte de acero templado que fueron mecanizadas a partir de los planos del Apéndice E. Además, a la cuchilla móvil se atornilló a un cubo para acoplarla con el motor mientras que a la cuchilla fija se le realizó un proceso de taladrado para los tres hilos de corte.

Figura 61.

Mecanismo de corte montado en el laboratorio.

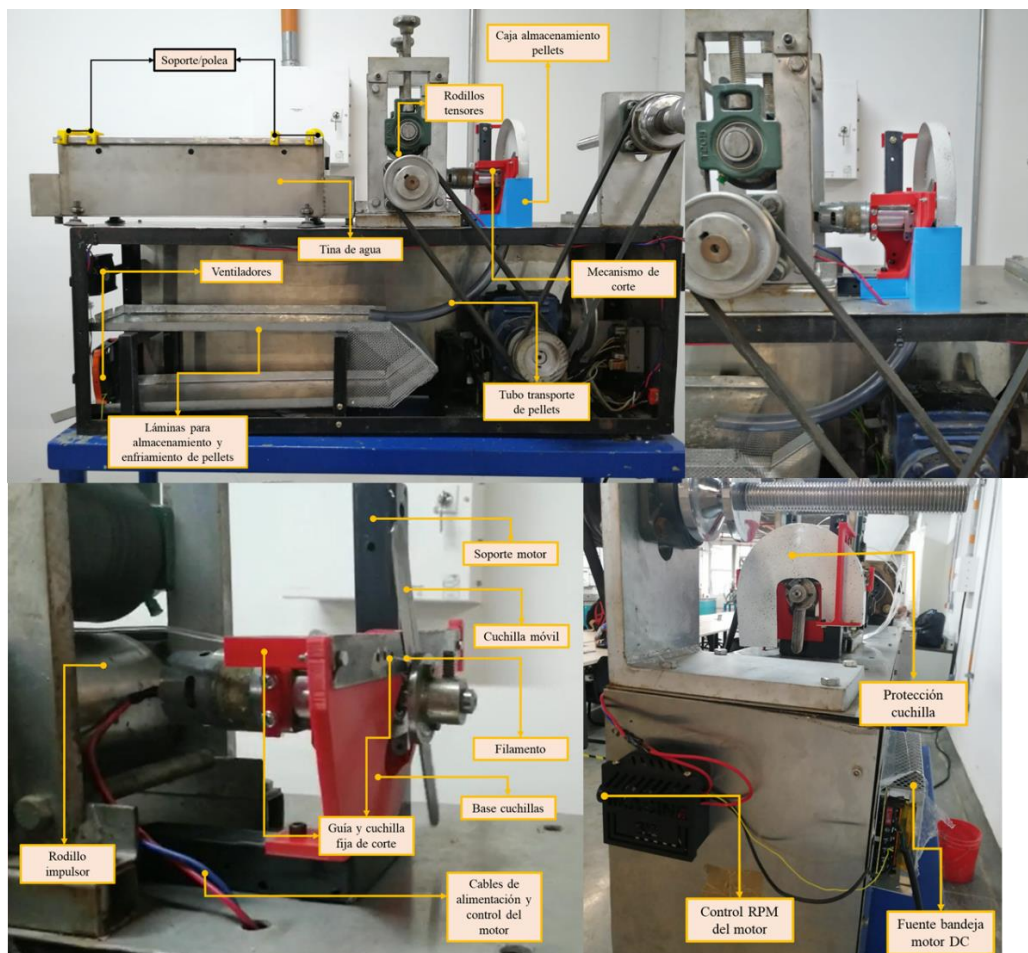


Una vez cortados los pellets pasan el sistema de almacenamiento, que se compone de una tina impresa en 3D que conecta con una manguera de 3/4” que conduce los pellets hacia las láminas de enfriamiento, donde por medio de ventiladores los pellets terminarían de alcanzar la temperatura ambiente. La estructura de las láminas se fabricó en acero galvanizado por medio de corte por herramienta y soldadura, bajo los planos presentado en el Apéndice E.

Finalmente, la manufactura del sistema del peletizado se articuló por medio de tornillería de acuerdo con los planos del diseño en detalle al módulo de la planta del laboratorio de mantenimiento, su distribución se presenta en la Figura 62.

Figura 62.

Organización componentes del sistema de peletizado.



9.4.2.4 Resultados

Se articuló el sistema de peletizado con los demás subsistemas de la planta además todos los componentes se lograron fabricar e instalar en la Figura 63 se presenta el resultado de las actividades.

Figura 63.

Resultado final actividades de intervención en banco de enrollado y peletizado



El sistema de peletizado que se fabricó puede ser operado en continuidad con la extrusora o por separado. Si el sistema se usa por separado, el flujo másico es controlado por el operario; si el sistema se usa en continuidad con la extrusora, se debe tener en cuenta la recomendación hecha sobre el cambio de transmisión que permitiría una mejor operación trabajando con 2 o 3 hilos para obtener pellets. Si no se realiza el respectivo cambio de transmisión, el sistema de pellets es capaz de satisfacer la mitad de la producción máxima de la extrusora, sin embargo, se pudo observar que a bajas revoluciones la extrusora trabaja por un corto periodo de tiempo debido a que no es capaz de hacer fluir el material por la falta de torque.

En la Figura 64 se muestran los pellets obtenidos con unas dimensiones de 3-4 mm de diámetro y un largo entre 3.5-8 mm, alcanzando las condiciones de salida deseadas.

Figura 64.

Pellets extraídos del sistema implementado en el laboratorio



Finalmente, se presenta la Figura 65 la ficha técnica de la máquina en la en las condiciones luego de realizada la intervención general y la implementación de la línea de pelletizado.

Figura 65.

Ficha técnica enfriamiento, enrollado y pelletizado del laboratorio

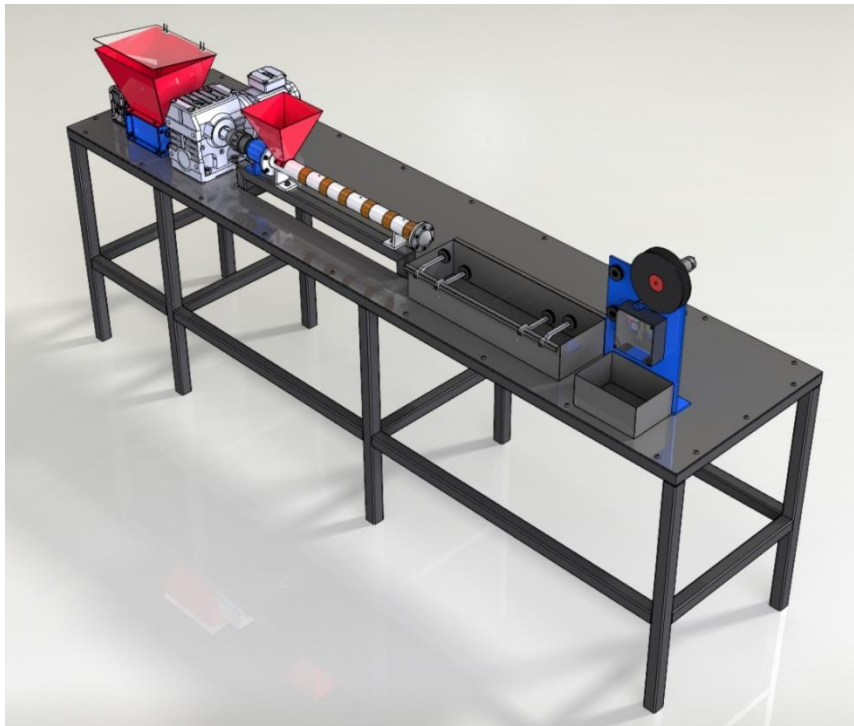
FICHA TÉCNICA		
ENFRIAMIENTO, ENROLLADO Y PELETIZADO		
Proceso de producción	Filamento y Pellets	
Tipo de enfriamiento	Convección Forzada	
Capacidad/Rendimiento	0,8 - 2,2 Kg/h	
Altura Total	170 cm	
Longitud Total	120 cm	
Ancho Total	50 cm	
N° de Operarios	1	
Potencia	Motor	1HP 120v 1600rpm DC
	Tipo de Trasmisión	Sistema de Poleas
	Relación Total	27 (Motor) : 1 (Carrete)
	Tensor	Sí, tipo prensa
Enfriamiento	Elemento	Tina con agua
	N° Poleas	4
Filamento	Frecuencia	Continuo
	Trabaja con	Ventiladores, tina, tensor y enrolladora
Pellets	Frecuencia	Continuo
	Tipo de Corte	Por cuchilla (fija y móvil)
	Motor	114 rpm 12v 5A Torque 281Kg*cm
	Trabaja con	Ventiladores, tina, tensor y S.Corte

10. Articulación y funcionamiento de la planta propuesta

La propuesta de planta prototipo para la transformación de plástico PET se creó desde el enfoque del diseño modular de la Academia internacional de ingeniería de producción (Tseng & Wang, 2014) que subdivide un sistema en partes más pequeñas independientes que se articulan para desempeñar múltiples funcionalidades, como lo es la producción de hojuelas, pellets y filamento. Esto se cumple por medio del concepto de continuidad, en donde los requerimientos de flujo, de potencia y de dimensión están directamente relacionados de una máquina a otra, es decir que desde las etapas iniciales de diseño se planteó la trituradora y la extrusora como sistemas versátiles que estarían articulados para la producción de pellets, pero que a su vez funcionarían como máquinas independientes. En la Figura 66 se presenta el modelo en SolidWorks del resultado del diseño propuesto.

Figura 66.

Modelo CAD del diseño propuesto de planta prototipo



Los módulos fueron dispuestos sobre la mesa en la orientación que sigue la materia prima durante su proceso de transformación, lo que hace que el proceso desde la extrusión hasta que se enrolla el filamento o hasta que se producen los pellets sea continuo; esto es posible gracias a que el diseño se realizó evitando que se generaran cuellos de botella y que el material fluya sin restricciones durante todo proceso, apoyado en elementos de continuidad como las boquilla respectiva y las poleas que conectan la salida de la extrusora con la tina de enfriamiento y el sistema de enrollado o peletizado.

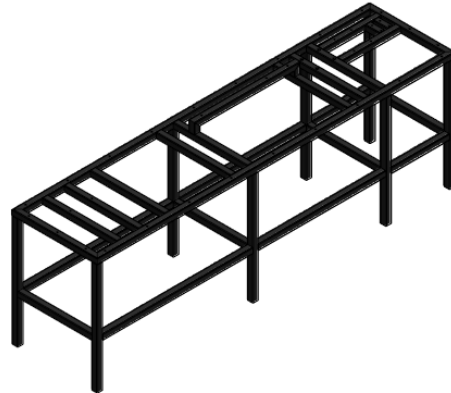
10.1 Bastidor

Definidos en cada capítulo del libro la propuesta de diseño de la trituradora, la extrusora y el sistema enfriamiento, enrollado y peletizado, se diseña el bastidor que se ajusta a las dimensiones de los sistemas de la planta lo que permite que cada uno de los módulos se articulen para tener una producción continua. Una de la característica más importante de la estructura del bastidor es que todo está dispuesto en la misma altura de operación; lo que permite que el usuario no pierda tiempo al hacer movimientos en diferentes niveles, ni se exponga a algún accidente.

Para la estructura del bastidor se presenta en la Figura 67, contiene soportes adicionales en las zonas más críticas, como los motores y módulo de enrollado y peletizado. Se selecciona una tubería estructural grado C50x50 y una lámina de acero inoxidable AISI 304 de 315cmx75cm.

Figura 67.

Bastidor propuesta de diseño



10.2 Control

Para el sistema de control de la planta se propone lo siguiente, teniendo en cuenta que es para fines educativos a escala de laboratorio:

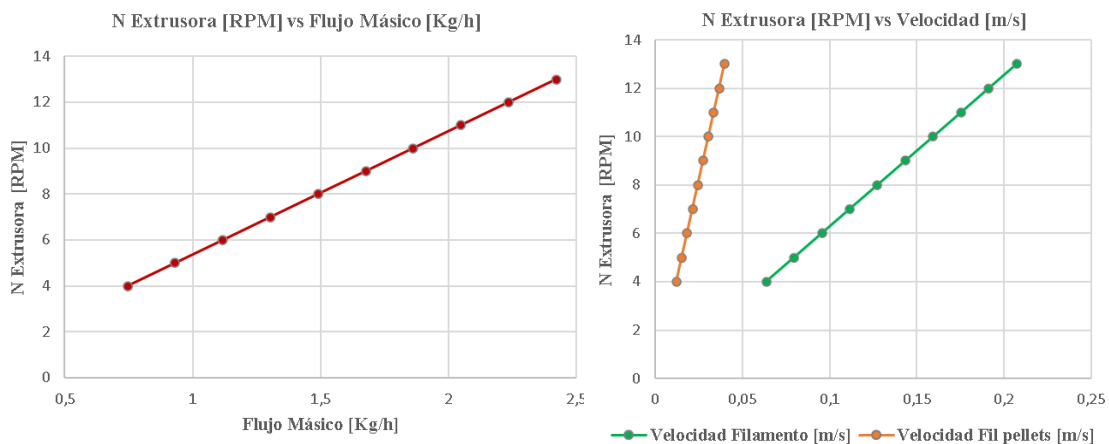
- Para la trituradora: un sistema de inversor y las protecciones eléctricas: Breaker, contactor, piloto y muletilla).
- Para la extrusora: un variador de frecuencia para controlar las revoluciones del tornillo, y para el control de las resistencias se utilizará pirómetros con sus termocuplas para controlar la temperatura de cada una de las zonas de la extrusora.
- Para la sección de enrollado: un controlador para regular las revoluciones del motorreductor, de esa manera se puede ajustar a las velocidades del carrete.
- Para la sección de peletizado: existen dos maneras de controlar la longitud de salida del pellet usando un variador de frecuencia y un controlador. Primero, variar las revoluciones del rotor de la cuchilla a unas revoluciones fijas de la extrusora. O Segundo, variar las revoluciones de la extrusora a unas revoluciones fijas del rotor.

10.3 Análisis operativo del diseño

Con el modelamiento matemático y los cálculos de la propuesta de diseño se realizó un análisis operativo del diseño de la planta haciendo uso del software EES Equation Engineering Solver. En primer lugar, se estudian las revoluciones de trabajo de la extrusora con el flujo másico y la velocidad de salida el filamento sea para pellet o enrollado, ver Figura 68. Se demuestra que, a mayor velocidad de la extrusora mayor rata de producción, y mayor será la velocidad la producción de filamento para enrollado y para pellets.

Figura 68.

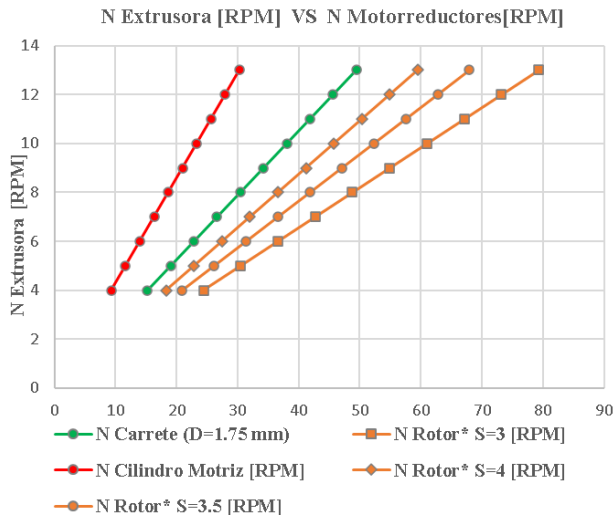
Gráficas de las revoluciones de la extrusora, el flujo másico y la velocidad



Luego, se relacionan las revoluciones de la extrusora con la continuidad de la producción de la planta por medio de la variación de las revoluciones del carrete de enrollado, de cilindro motriz y del rotor de corte, ver Figura 69. Se obtiene que para asegurar un mismo tamaño de pellet y un correcto enrollado de filamento es necesario ajustar las revoluciones de dichos motores, está grafica da una guía de las proporciones de ajuste.

Figura 69.

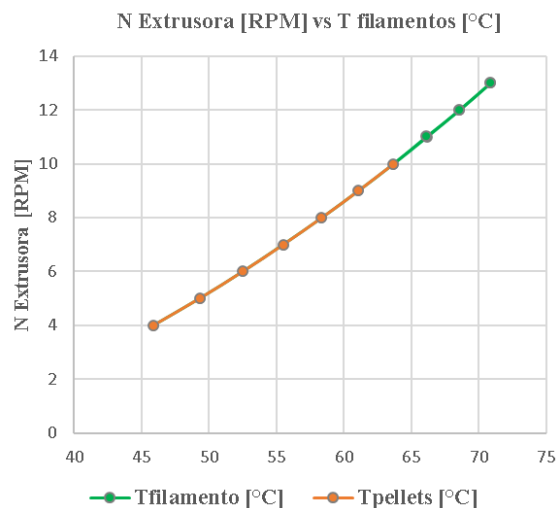
Gráfica de funcionamiento N de la extrusora con los demás sistemas rotativos



De igual modo, se analiza las revoluciones de la extrusora y la temperatura del filamento a la salida del sistema de enfriamiento, ver Figura 70. Al disminuir las revoluciones de la extrusora la velocidad de salida del filamento sea para enrollado o para pellets se reduce y da un mayor tiempo de exposición al agua y una mayor reducción de su temperatura. esto implica que la temperatura de salida de pellets o filamento es la misma siempre que las revoluciones de la extrusora sean las mismas.

Figura 70.

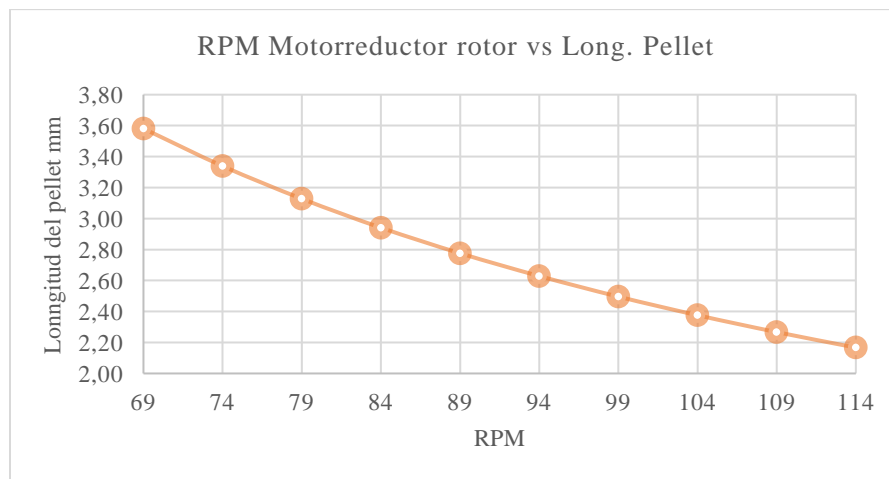
Relación de la T° de salida de filamento con las revoluciones de la extrusora.



En la Figura 71 se observa el desempeño del motorreductor a partir de la relación con sus revoluciones de trabajo con respecto a las variaciones de longitud del pellet. A medida que incrementa las revoluciones del rotor la longitud del pellet disminuye. La gráfica se extrajo con las revoluciones máximas de la extrusora a 13rpm.

Figura 71.

Gráfica entre las revoluciones del motor y la longitud del pellet.



10.4 Proceso de manufactura

Para la construcción de la planta del diseño mecánico propuesto se emplearían procesos de manufactura como el mecanizado CNC, el torneado, el fresado o el taladrado bajo indicaciones de planos, para piezas como el cilindro, el tornillo, el alojamiento de los rodamientos y los ejes. Para las piezas de chapa metálica sería procesos de corte láser, corte por agua, plegado y soldadura en láminas. También hay piezas para fabricación bajo manufactura aditiva, por impresión 3D. Así como por compras de catalogo y proveedor como en el caso de los motores, los rodamientos, las chumaceras y la tornillería.

10.5 Ficha técnica

Se presenta la ficha técnica general con las características principales de la planta de producción, ver Figura 72. Los planos se encuentran consignados en el Apéndice D.

Figura 72.

Ficha técnica planta diseño propuesto

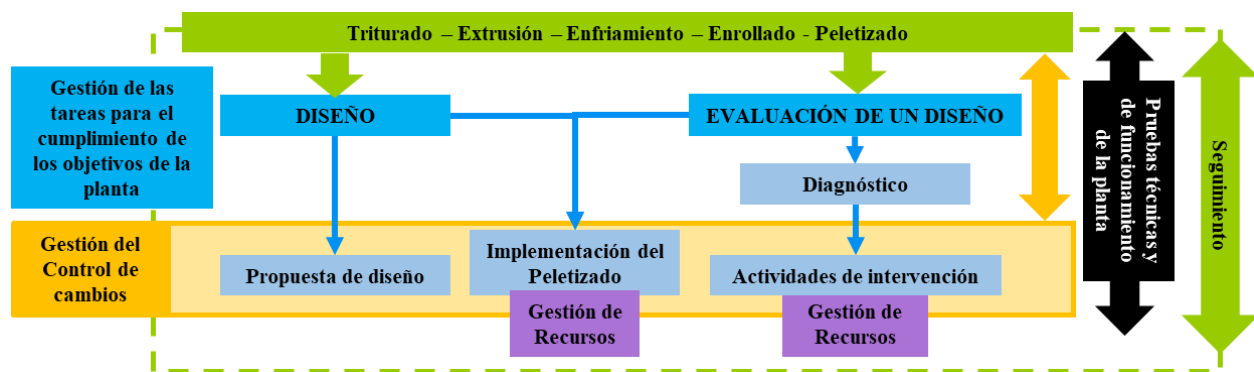
FICHA TÉCNICA		
PLANTA PROTOTIPO PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS Y FILAMENTOS		
Procesos de transformación	Triturado, extrusión y peletizado	
Capacidad/Rendimiento	2,42 Kg/h	
Productos	Hojuela 8x8mm	
	Filamento D1,75mm	
	Pellets D4mm largo variable	
Rango de T°	25°C - 300 °C	
N° de Operarios	3	
Potencia	Voltaje	AC 220v 60 Hz Trifásica + DC 12V
	Motor Trituradora	1 HP 58 rpm 91.8 Nm TECHTOP
	Motor Extrusora	2 HP 13 rpm 790 Nm SEW
	Motor S.Enrollado y Pelletizado	DC 10A 12V 114rpm 281kgcm BANEOTS
	Relación Total	131 (Motor) : 1 (Tornillo)
Resistencias	N° Resistencias	6 x150w Tipo Abrazadera
Dimensiones Generales	Altura Total	1,8m
	Longitud Total	3,5m
	Ancho Total	1m
Tolva	Apertura de la Tolva	21,4 cm x 20,4cm
	Volumen de la Tolva	3945 cm ³

11. Gestión del proyecto

Las estrategias gestión aplicadas al diseño y el montaje de la planta prototipo en sus procesos de triturado, extrusión, enfriamiento, enrollado y peletizado, parten de la identificación de las dos acciones fundamentales del proyecto: evaluación de un diseño, en el diagnóstico y las actividades de implementación; y un diseño, en la propuesta propia bajo las recomendaciones de la teoría y la industria. Se aplican ambas para la implementación del peletizado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se organizaron las etapas en las que se llevó a cabo el proyecto (metodología cap.5) y se definieron las líneas de gestión necesarias para su cumplimiento (ver. Figura 73) en el marco de la metodología de (Poveda, González, & Gómez-Senent, 2011) que sugiere una planificación sistemática, flexible para reaccionar a las novedades de los resultados de las pruebas, y disciplinada para su revisión y control.

Figura 73.
Gestión de la planta prototipo



En primer lugar, la gestión de las tareas para el cumplimiento de los objetivos se aplicó en la planificación de las actividades específicas de cada fase del proyecto como la revisión

bibliográfica del funcionamiento y el modelado teórico de cada máquina, la caracterización y la evaluación de la máquina del laboratorio, la realización de los informes, las propuestas de diseño, la definición y ejecución de las actividades de intervención e implementación, por medio de la programación de calendarios; la asignación de responsabilidades a los miembros del equipo de trabajo de acuerdo a sus aptitudes, conocimiento y habilidades, y las reuniones de resultados para la integración de conceptos y la toma de decisiones sobre los pasos a seguir o los elementos a corregir.

En segundo lugar, la gestión del control de cambios es la herramienta fundamental de la integración del proyecto, dado que garantiza la consistencia y la coordinación de los resultados, a través de la actualización de la información y la articulación de los sistemas de la planta. El control de los cambios permite ver qué tanto ha mejorado la máquina con respecto a las actividades de intervención, la implementación de la línea de peletizado y el diseño propuesto; permite observar la mejora de la planta y sacar conclusiones acerca de su funcionamiento y del impacto de las actividades realizadas, por medio de la toma de decisiones en equipo. Así como busca establecer en sus cambios la continuidad del proceso de la transformación de plásticos en la planta.

Ahora bien, para la ejecución de las actividades de intervención e implementación de la maquina se llevó a cabo una gestión de los recursos necesarios: herramientas, materiales y asesoría técnica. Esto implicó una ardua labor administrativa que se realizó en conjunto con la Escuela de ingeniería mecánica, en la consecución de materiales, el préstamo de herramienta, el uso del taller de metalmecánica y la asesoría de los técnicos de la universidad.

La validación de cada fase del proyecto se realizó a través de la gestión de las pruebas técnicas y de funcionamiento de la planta. La del laboratorio: en las revisiones, ensayos con el PET (ver Cap. 8.3) y las actividades de intervención para cada máquina (ver Cap. 7.4; 8.5 y 9.4). Así como en la planta propuesta: se hizo el modelado del diseño y un análisis operativo (ver Cap. 10.3).

Finalmente, las estrategias de gestión se articulan y ayudan a establecer la continuidad de la planta prototipo mediante el seguimiento de cada una de las acciones realizadas en el marco del cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto, esto se logró a través del trabajo en equipo en la ejecución de las tareas y en las reuniones de grupo, donde se evaluaba el avance en los hitos clave y check points en el desarrollo de las tareas y se definía los pasos a seguir y qué requerían. La labor de la gestión implicó de la comunicación asertiva, el liderazgo, la distribución del tiempo, la toma decisiones, el establecimiento de prioridades y del trabajo en equipo.

12. Costos

La inversión realizada para las fases de intervención e implementación del proyecto fue de \$2'815.700. En la Tabla 39 se muestra de manera detallada los costos por proceso y por subsistema. Teniendo en cuenta las especificaciones y la manufactura necesaria de cada elemento, se realizaron compras directas o por catálogo y se costearon procesos de fabricación como mecanizado, soldadura, corte e impresión 3D.

La financiación del proyecto se realizó de forma compartida entre la Escuela de Ingeniería Mecánica (40% del costo total) y los estudiantes a cargo del proyecto (60% del costo total).

Tabla 39.

Costos de las fases de intervención e implementación de la planta prototipo

PROCESO	ELEMENTO	PRECIO	DESCRIPCIÓN	TOTAL		
INTERVENCIÓN	TRITURADORA	Relé Térmico	\$ 35.000	7A - 10A Para 220v 2HP CHINT	\$ 246.300	\$ 517.300
		Contactador	\$ 70.000	LC1-D0910 Telemecanique		
		Breacker	\$ 35.000	C45N C10A Wusley		
		Piloto	\$ 6.500	D22mm Lampara Verde		
		Muletilla	\$ 8.000	D22mm 2 Posiciones		
		Caja eléctrica	\$ 35.000	20cm x 20cm x 12cm Plástica		
		Clavija + Toma Aérea	\$ 26.000	220v Trifásico 20A		
		Cable Encauchetado	\$ 12.800	3 x 10 1mts		
		Cable Encauchetado	\$ 18.000	3 x 14 3mts		
	EXTRUSORA	Aislante FlexWrap	\$ 23.500	Fibra de vidrio 1,2mt x 1mt Espesor 1"	\$ 228.000	
		Aislante Kawol	\$ 60.000	Fibra cerámica 60cm x 60 cm		
		Alambre Dulce	\$ 2.000	6 mts Para acople del aislante		
		Cinta Foil	\$ 4.500	3 mts Para acople del aislante		
		Clavija + Toma Aérea	\$ 76.000	220v Trifásico 32A + Polo		
		Kit Macho	\$ 13.500	3/8" Para Tornillería de montaje de la boquilla		
		Llave Bristol	\$ 3.000	5/16" Para tornillería del cambio de boquilla 3/8"		
		Pilotos Resistencias	\$ 19.500	D22mm 3unidades		
	Kit Pintura	\$ 26.000	Pintura Anticorrosiva + Pintura Esmalte + Tiner			
ENROLLADO	Clavija Enrollado	\$ 8.000	Caucho tres polos 110v	\$ 43.000		
	Interruptor Codo	\$ 5.000	On - Off Sencillo 12mm			
	Cableado Encauchetado	\$ 30.000	3x12 Para cambio de cable del enrollado 3mts			
IMPLEMENTACIÓN	Boquilla para producción de pellets	\$ 333.200	Dimensiones otorgadas en los planos de diseño que contemplan un volumen de 68,4mm X Ø 90,25 mm, con un Ø Diámetro ext de salida de 56mm y 15 agujeros de Ø 4mm para los pellets. (Plano Anexo) Material de Acero 4140, sin tratamiento térmico.	\$ 1.299.100	\$ 1.627.100	
		Prototipo Boquilla	\$ 56.000			Impreso en 3D PLA Negro, según CAD
		Sistema T° y control	\$ 193.500			Resistencia para boquilla con sistema de control
	Resistencia	\$ 50.500	De tipo Abrazadera con Øint 56mm x Ancho 20mm. Pot 150w a 220v 2A			
		Pirómetro	\$ 88.500			Control de la temperatura de la resistencia Marca Chekman
		Contactador	\$ 30.000			Protección eléctrica necesaria para dicha resistencia
		Muletilla	\$ 8.000			2 posiciones D22mm
		Piloto	\$ 6.500			D22mm Lampara Verde
		Cable Siliconado	\$ 10.000			Para conexión del control de la resistencia 4mts Calibre 12
	Riel DIN	\$ 10.000	35x7,5 mm Long 1m			
	Controlador Motor DC	\$ 25.000	PWM para velocidad del motor 12V 10A			
	Caja Control Motor DC	\$ 25.000	Impreso en 3D PLA Negro, según CAD			
	Cable Siliconado	\$ 8.000	Para conexión de motor DC 4mts Calibre 18			
	Motor DC 281 kg cm	\$ 249.000	114 rpm 12v 5A Torque 281Kg*cm			
	Fuente Bandeja Motor DC	\$ 60.000	12V 10A Tipo Bandeja			
	Cable Fuente Motor DC	\$ 10.000	110v incluye clavija			
	Cuchilla Movil	\$ 80.000	Acero para herramientas, dimensiones bajo planos. (Anexo)			
	Cuchilla Fija	\$ 50.000	Acero para herramientas, dimensiones bajo planos. (Anexo)			
	Llave Bristol	\$ 1.000	3/32" Para tornillería del montaje de la cuchilla 3/16"			
	Protección Cuchilla	\$ 35.000	Fabricada bajo planos en el taller de soldadura			
	Mecanizado Cuchillas	\$ 50.000	Adecuación Cubo cuchilla de 1" x 22mm con eje de 13mm			
	Llave Bristol	\$ 1.000	1/8" Para tornillería del montaje de la cuchilla 1/4"			
	Barras Perforadas Al	\$ 21.400	7cm x agujerosD2mm Aluminio. 2 unidades			
Soporte Motor DC	\$ 85.000	Impreso en 3D PLA Negro y Rojo, según CAD.				
Soporte del sistema	\$ 6.000	Fabricada bajo planos (Anexo) en el taller de soldadura con Tubo 25x25 mm Calibre 18				
Estructura Depósito	\$ 80.000	Impreso en 3D PLA, según CAD.				
Tubo transporte pellets	\$ 6.000	Manguera Transparente 3/4"				

IMPLEMENTACIÓN	ENFRIAMIENTO	Ventilador DC 8x8	\$ 18.000	0.5A 12v 8cm x 8cm	\$ 328.000	
		Ventilador DC 12x12	\$ 14.000	0.19A 12v 12cm x 12cm		
		Soportes Ventiladores	\$ 15.000	Impreso en 3D PLA, según CAD		
		Interruptor Codo	\$ 1.500	On - Off Sencillo 5mm		
		Fuente Ventilador	\$ 15.000	Fuente 12v 1A + Adaptador		
		Cable Siliconado	\$ 11.500	Para conexión de ventiladores 8mts Calibre 18		
		2 Terminal en paralelo	\$ 2.000	Para cable vehículo Calibre 18		
		8 Terminal Pinza	\$ 4.000	Para cable vehículo Calibre 12		
		16 Terminal Pinza	\$ 5.000	Para cable vehículo Calibre 18		
		Malla Zaranda	\$ 10.000	1 mt Malla Galvanizada 6mm x 6mm		
		Estructura	\$ 150.000	Bajo planos. Lámina Galvanizada 1mx1m Calibre 20		
		Soporte Estructura	\$ 5.000	Bajo planos. Tubo Grado C 25x25mm Calibre 20		
		Tapon Caucho	\$ 5.000	Para agujeros de la tina		
		Sistema Poleas	\$ 60.000	Impreso en 3D PLA amarillo, según CAD		
		Rodamientos Poleas	\$ 12.000	SKF 608		
MATERIAL	PET Virgen en Pellets	\$ 136.000	10 kgs en pellets PET Virgen	\$ 506.000	\$ 506.000	
	PET Virgen en Pellets	\$ 140.000	10 kgs en pellets PET Virgen			
	PETG en Pellets	\$ 230.000	10 kgs en pellets PETG			
GENERAL	Tornillería		\$ 59.700	\$ 59.700	\$ 164.800	
	3 Tornillos	\$ 1.300	M3 x 1/2" Autoperforante - Cabeza Estrella			
	8 Tornillos	\$ 2.500	M3 x 6 Hexagonal + Tuerca			
	4 Tornillos	\$ 2.700	M3 x 16 Hexagonal + Tuerca			
	3 Tornillos	\$ 1.200	M4 x 35 Redondo + Tuerca			
	5 Tornillos	\$ 2.250	M4 x 40 Redondo + Tuerca			
	5 Tornillos	\$ 2.250	M4 x 30 Redondo + Tuerca			
	4 Tornillos	\$ 1.500	M4 x 5 Garbanzo			
	6 Tornillos	\$ 800	M4 x 8 Redondo			
	4 Tornillos	\$ 500	M4 x 10 Redondo			
	2 Tornillos	\$ 600	M4 x 5 Prisonero			
	6 Tornillos	\$ 4.000	M5 x 35 Hexagonal + Tuerca			
	9 Tornillos	\$ 7.200	M5 x 15 Hexagonal + Tuerca + Arandela			
	6 Tornillos	\$ 600	M5 x 20 Garbanzo cruz			
	4 Tornillos	\$ 2.000	M5 x 20 Hexagonal Inox + Tuerca + Arandela			
	4 Tornillos	\$ 2.000	M5 x 45 Bristol + Tuerca + Arandela			
	4 Tornillos	\$ 1.000	M6 x 3/4" Redondo			
	3 Tornillos	\$ 2.400	M8 x 40 Hexagonal + Tuerca			
	4 Tornillos	\$ 500	1/8" x 5/8" Redondo + Tuerca			
	4 Tornillos	\$ 4.000	1/4" x 1 1/2" Hexagonal + Tuerca + Arandela			
	4 Tornillos	\$ 1.600	1/4" x 1" Prisonero			
	5 Tornillos	\$ 600	1/4" x 3/4" Prisonero			
	4 Tornillos	\$ 1.400	3/16" x 2 1/2" Avellando + Tuerca + Arandela			
	3 Tornillos	\$ 1.000	3/16" x 1 1/2" Avellanado + Tuerca			
	2 Tornillos	\$ 2.000	3/16" x 1/4" Prisonero			
	4 Tornillos	\$ 2.700	3/16" x 2 1/2" Avellando + Tuerca + Arandela			
	7 Tornillos	\$ 10.100	3/8" x 1 1/2" Bristol Inox			
	4 Arandelas	\$ 500	1/8" Galvanizada			
	18 Remaches	\$ 500	D4mm			
	Herramienta		\$ 105.100			\$ 105.100
	2 Disco Motor Tool	\$ 10.000	Para corte 1" Reforzado en fibra			
	1 Broca Taladro	\$ 5.000	5 mm			
	2 Broca Taladro	\$ 12.000	3/16"			
	1 Broca Taladro	\$ 6.000	5/16"			
	1 Broca Taladro	\$ 4.200	3 mm			
	2 Broca Taladro	\$ 6.500	1/8"			
	1 Broca Taladro	\$ 6.500	5/32"			
	1 Broca Taladro	\$ 8.400	7/32"			
	10 Amarres Plásticos	\$ 3.000	20cm			
	1 Copa Sierra	\$ 24.000	Para metal 1 1/8" con adaptador			
1 Copa Grata	\$ 12.500	Ondulada 3" para pulidora entrada 5/8"				
1 Disco Pulidora	\$ 1.800	Para corte de 4"				
1 Cinta Aislante	\$ 5.200	3M Templex 1700				
TOTAL					\$ 2.815.200	

13. Conclusiones

- Se evidencia que los sistemas de triturado donde las cuchillas se oxidan no son aptos para procesos de reciclaje de plástico, debido a que a la hora de extruir se presentaron alteraciones en las características y las propiedades del material PET producido por la contaminación del óxido.
- Se concluyó para el diseño de la trituradora que, manteniendo un flujo másico y un número de revoluciones fijas, se puede aprovechar la potencia del motor de mejor manera si se pone una mayor cantidad de filos y se distribuyen evitando el corte de dos o más filos a la vez.
- Se demuestra que para procesos de extrusión el aprovechamiento de material PET reciclado es muy sensible a los cambios de la temperatura debido al historial térmico del material, razón por la cual debe ser mezclado con material virgen. No obstante, de la extrusión con PET virgen se obtuvo un material muy frágil y difícil de manejar para propósitos de impresión 3D, mientras que los resultados de la extrusión con PETG, mostraron la flexibilidad, la apariencia y la estabilidad apta para impresión 3D. La mezcla de material reciclado PET debe realizarse con PETG.
- Se evidencia en el análisis teórico-funcional de la extrusora del laboratorio que debido a las altas revoluciones y las geometrías de diseño sobredimensionadas se requiere un motor de 8.4 HP, esto demuestra el mal funcionamiento de la máquina con el motor de 2.4 HP y la necesidad de realizar un cambio de motor o de la relación de transmisión.

- Se estableció que en los procesos de producción de filamento o pellets es fundamental el enfriamiento a la salida de la boquilla de la extrusora, dado que afecta la contracción del material que define el diámetro del filamento y sus propiedades, al igual que debe estar en una temperatura baja (adecuada) para poder enrollarlo o cortarlo. El proceso más adecuado para el sistema es el enfriamiento por convección por agua.
- Se presentó el diseño de un sistema de enfriamiento, enrollado y pelletizado que opera hasta una capacidad máxima 2,42 kg/h y puede cortar pellets de longitudes varían entre 2 a 4 mm El sistema permite la continuidad del proceso desde la salida de las extrusora por medio de la disposición de elementos en común como la tina de enfriamiento y las poleas que ramifica el proceso hacia la producción de filamento o la producción de pellets, esto permite que ocurra un proceso a la vez.
- Las actividades de intervención en la planta del laboratorio lograron mejorar las condiciones de operación de las máquinas a través del diagnóstico realizado con los análisis teóricos-funcionales. Se obtuvo una planta articulada con sus respectivas fichas técnicas de funcionamiento y con mejores condiciones de seguridad para los estudiantes del laboratorio.
- Se realizó el diseño, construcción e implementación de un sistema de corte de pellets con capacidad para cortar tres hilos de manera secuencial en un giro, con velocidad de corte variable y con sistema de almacenamiento que se ajusta a los espacios disponibles en el módulo de enfriamiento y enrollado. Este sistema de pellets es capaz de satisfacer la mayoría del flujo másico despachado por la extrusora una vez se siga la recomendación realizada para que opere adecuadamente.

- Se realizó el diseño modular de la planta de producción de pellets y filamento de PET donde se articularon los subsistemas: enrollado, enfriamiento, y peletizado a partir de la relación con las revoluciones de la extrusora que define el flujo másico, la temperatura de salida de filamento, el largo de los pellets y la velocidad de enrollado; apoyado en elementos de continuidad como las boquilla respectivas y las poleas que conectan la salida de la extrusora con la tina de enfriamiento y el sistema de enrollado o peletizado.
- Se evidencia el impacto que tiene una gestión sobre el desarrollo de una propuesta que articula el diseño de diferentes etapas que se puede hacer de manera modular o rígida, y que bajo las condiciones establecidas se define una interacción multifuncional de sus componentes.

14. Recomendaciones de mejora

- Es necesario eliminar el óxido de las cuchillas de la trituradora, debido a que el material que procesa se contamina. Para garantizar un triturador limpio, se recomienda el cambio de las cuchillas por otras fabricadas en acero inoxidable. A su vez, se recomienda el cambio de la geometría de la cuchilla para garantizar mejores cortes y aumentar la eficiencia de la máquina, evitando atascamientos.
- Se recomienda cambiar el mallado de la criba para que la partícula final sea más pequeña, debe ser más fino el filtro para la partícula final.

- Se recomienda el cambiar las revoluciones de trabajo del tornillo extrusor para alcanzar la relación más óptima de trabajo teniendo en cuenta que el motor no logra suplir la potencia requerida para las dimensiones de la extrusora. Para tal fin, se debería cambiar la transmisión de cadena por una nueva que tenga relación 2:1, logrando disminuir las revoluciones de trabajo del tornillo a la mitad (18 rpm) y aumentando el torque.
- Es importante reducir al menos 20cm la altura de la mesa del bastidor para garantizar la seguridad de sus usuarios, debido a que la estructura actual resulta inestable al ser muy angosta y alta para el peso que soporta, lo que dificulta la operación de la máquina. Esto implicaría reducir en la misma proporción el bastidor del módulo de enfriamiento, enrollado y peletizado.
- Es necesario añadir nuevos medidores de amperímetros análogos, dado que los que se encuentran en el panel de las resistencias no funcionan.
- Las poleas del sistema de enrollado no cuentan con una estructura de protección para los sistemas con riesgo de atrapamiento, se recomienda instalar uno o cambiar la transmisión ubicándola en la zona posterior del módulo.
- Se plantea para futuros proyectos de grado el diseño y la implementación de un control automático que modifique las revoluciones de los motores del sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado en razón del flujo másico de la extrusora.

Referencias Bibliográficas

- Acoplásticos. (2022). *¿Que es el PET?* Obtenido de <https://www.acoplásticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/36-opc-fag-pre4>
- Acosta, O., & Martínez, J. (2014). *Diseño y construcción de una máquina trituradora para la industria de reciclaje de plástico*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41, 1453–1477. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- Barbosa, J. (2017). *Diseño de una máquina extrusora de plástico para los productores de mangueras de Ocaña*. Ocaña: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros*. San Vicente del Raspeig, España: Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Birth LH. (s.f). *Longitud de pandeo L_k y esbeltez*. Obtenido de Birt.eus: https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DPM/DPM04/es_DFM_DPM04_Contenidos/website_71_longitud_de_pandeo_lk_y_esbeltez.html
- Blair Crawford, C., & Quinn, B. (2016). *Microplastic Pollutants*. Elsevier Science. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/313404867_Microplastic_Pollutants
- Bordignon, F., Iglesias, A., & Hahn, Á. (2018). *Diseño e impresión de objetos 3D*. Buenos Aires, Argentina: UNIPE editorial universitaria.
- Bornacelli, J., & Gutiérrez, P. (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo* (Primera edición ed.). Cali, Valle del Cauca, Colombia: Universidad Autónoma del Occidente. Obtenido de <https://editorial.uao.edu.co/media/pdf-g/metodologia-para-el-diseno.pdf>

- Canale, G. (2015). *Materialoteca: Perfil Ambiental de Materiales* (1a ed.). (G. Canale, Ed.) Buenos aires, Argentina. doi:ISBN 978-987-3607-93-6
- Cardenas, D., Shomar, B., & Solorio, A. (2012). *Análisis de cuchillas de molinos para termoplásticos para Mod. 2650 y diseño para una mayor duración*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa* (Cuarta ed.). México, D.F: McGraw Hill.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones* (Cuarta ed.). México, D.F.: Mc Graw Hill.
- Cobos Maldonado, C. M. (2011). *Diseño de un sistema de extrusión-peletizado para el procesamiento de residuos plásticos para la empresa municipal de la ciudad de Cuenca EMAC*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- ColorPlastic. (11 de Febrero de 2021). *Acerca de nosotros: ColorPlastic*. Obtenido de colorplasticcolombia: <https://colorplasticcolombia.com>
- Compactor Management Company. (2022). *What is The Role of Industrial Shredders in Recycling and Waste Management* . Obtenido de <https://www.norcalcompactors.net/industrial-shredder-basics-different-types-and-their-uses/#:~:text=Plastic%20waste%20shredders%20can%20be,for%20which%20they%20are%20employed>.
- Dunstan, D. E. (24 de Enero de 2019). The viscosity-radius relationship for concentrated polymer solutions. *Nature*, 9. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-018-36596-6>
- Filament2print. (27 de Junio de 2018). *Acerca de nosotros: Filament2print*. Obtenido de Filament2print: <https://filament2print.com>

- Frankland, J. (2015). Sistemas de enfriamiento: en elemento crítico en extrusión. *Plastic Technology Mexico*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/columnas/sistemas-de-enfriamiento-en-elemento-critico-en-extrusion>
- Gaitan, D. F. (2018). *Diseño de un molino triturador para polímeros termoplásticos para la empresa industria Recuplast SAS*. Colombia: Universidad Libre. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11605>
- Galán, J., & Ojeda, O. (2020). *Diseño de una planta piloto para la producción de filamentos, integrado en la reutilización de PET (polietileno tereftalato), útil para la impresora 3D*. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander.
- García Sánchez, M. d. (2017). *Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- GEP EcoTech. (2022). *Double-Shaft Shredder*. Obtenido de <https://www.gepecotech.com/industrial-shredder/double-shaft-shredder/>
- Gester. (24 de Febrero de 2020). *Acerca de nosotros: Gester, Gestión de Termoplásticos*. Obtenido de Gester, maquinaria de ocasión para reciclaje: <https://gester.es/es/empresa>
- Giles, H. F., Wagner, J. R., & Mount, E. M. (2005). *Extrusion, The Definitive Processing Guide and Handbook*. New York, United States of America: Willian Andrew publishing.
- Gómez, J., & Gutiérrez, J. (2007). *Diseño de una extrusora para plásticos*. Escuela de tecnología mecánica. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/145b2ecf-d956-4b4e-b2f5-5406d77c76fe/content>
- Gomez, W., Plata, D., Ramos, J., Morales, M., Osorio, S., Rodríguez, J., Arrazola, A., & Meza, E. (2014). Análisis de la degradación térmica mezclas de Politereftalato de etileno reciclado

- (R-PET/PET) proveniente de botellas de bebidas carbonatadas de consumo popular en la ciudad de Cartagena. *Revista Colombiana De Materiales*, 5, 93–99. Obtenido de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/19099>
- Greenpeace Colombia. (Mayo de 2019). Greenpeace ante medidas en contra de los plásticos en el mundo: “Colombia está quedando atrás en la batalla contra el plástico”. *Greenpeace*. Obtenido de <https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/issues/contaminacion/greenpeace-ante-medidas-en-contra-de-los-plasticos-en-el-mundo-colombia-esta-quedando-atras-en-la-batalla-contra-el-plastico/>
- Greenpeace Colombia. (2019). Presentación de informe de Greenpeace y Universidad de los Andes: “Casi el 60% de la basura diaria de Bogotá es desecho plástico”. *Greenpeace Colombia*. Obtenido de <https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/issues/contaminacion/presentacion-de-informe-de-greenpeace-y-universidad-de-los-andes-casi-el-60-de-la-basura-diaria-de-bogota-es-desecho-plastico/>
- Hamrock, B., Jacobson, B., & Schmid, S. (2000). *Elementos de máquinas*. México, D.F: McGraw Hill.
- Kiliç, H., & Yilmaz, D. (Enero de 2020). Various properties of recycled PET (rPET)/organoclay nanocomposite fibres. *Plastics, Rubber and Composites*, 49, 164-178. doi:<https://doi.org/10.1080/14658011.2020.1720401>
- Lork Industrial SL. (2022). Ficha Técnica PET. Barcelona, España. Obtenido de <https://www.lorkindustrias.com/downloads/fichastecnicas/fichaTecnicaPET.pdf>

- Lork Industrias. (sf.). PET. *Ficha Técnica PET*. Barcelona, España: Lork Industrias. Obtenido de <https://www.lorkindustrias.com/downloads/fichastecnicas/fichaTecnicaPET.pdf>
- Maldonado, L. F. (2013). *El modelamiento matemático en la formación del ingeniero*. Bogotá: Ediciones Fundación Universidad Central. doi:978-958-26-0196-6
- Material Data Center. (2022). Datasheet of rPET . United States. Obtenido de <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/ReForm/Formfutura+BV/ReForm%E2%84%A2+rPET/127a3852/7564>
- MatWEB. (2022). *Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced*. Ficha Técnica. Recuperado el 2022, de <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20>
- Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., & al., e. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, XXVIII, 13. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>
- MinAmbiente . (2021). *Plan Nacional para la gestión sostenible de los plásticos de un solo uso*. Bogotá, Colombia. Obtenido de http://vip.acoplasticos.com.co/_lib/file/doc/PLAN_PLASTICOS.pdf
- MinAmbiente. (2004). *Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y Manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo*. Bogotá, Colombia. doi:958 - 97393 - 4 - 2
- Miranda, W. (2014). *DISEÑO DE UNA MAQUINA TRITURADORA DE PLÁSTICO PARA LA FABRICA LA PAZ*. La Paz: UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES.
- Morton-Jones. (1997). *Procesamiento de plásticos*. México: Limusina SA. doi:968-18-4434-3

- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (Cuarta ed.). (P. Guerrero , B. Gutiérrez, Edits., V. González, & Pozo, Trads.) México: Pearson Educación.
- Multimarc. (sf.). PET - Tereftalato de polietileno. *Ficha técnica PET*. México: Multimarc de México S.A. Obtenido de <http://www.multimarc.com/storage/dataSheets/15898281300.pdf>
- Omnexus. (2022). *Selection Guides: Key Features & Applications of Polyethylene Terephthalate (PET)* . Obtenido de <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic/key-properties>
- Parada, A. (1990). *Fatiga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Parker, L. (Junio de 2019). The world's plastic pollution crisis explained. *National Geographic*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution>
- Parra. (2017). *Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados*. Santiago, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Parra, R. (2017). *Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados*. Santiago de Chile: Universidad Técnica Federico Santa María. Obtenido de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/40932/3560902038562UTFSM.pdf?sequence>
- Perales, A. (2011). Material de clase. En A. Perales, *Tema 6: Clasificación directa. Cribado* (pág. 63). Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Obtenido de https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5551/mod_resource/content/1/Tema_6_-_Cribado.pdf
- PET to PET. (2021). *PET flakes and PET pellets in everyday life*. Obtenido de <http://www.pet2pet.at/en/node/37>

Piñeros & Acosta. (2019). *Rediseño de una máquina extrusora para reciclaje de plástico producido en la facultad tecnológica de la UD*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Piñeros & Acosta. (2019). *Rediseño de una máquina extrusora para reciclaje de plástico producido en la facultad tecnológica de la UD*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.

Plastics Technology. (1 de Abril de 2019). *Acerca e nosotros: Plastics Technology*. Obtenido de Plastics Technology México: <https://www.pt-mexico.com>

Poveda, R., González, M., & Gómez-Senent, E. (2011). *Fundamentos de la dirección y gestión de proyectos*. España - Mexico: Universidad Politecnica de Valencia. doi:978-968-18-7158-1

Precious Plastic Spain. (2022). *Precious Plastic*. Obtenido de <https://www.ppcapispain.com/como-reciclar>

Quintero Diaz, L. A. (2015). *Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de polietileno*. Universidad Politécnica de Valencia, Química, España. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59710/QUINTERO%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20una%20planta%20de%20reciclado%20de%20Tereftalato%20de%20polietileno%20%28PET%29%2C%20con%20una%20producc....pdf?sequence=1>

Reductores y potencia SAS. (2022). *Cotización motorreductor de 1 HP*. Bucaramanga.

Ritchie, H. (Septiembre de 2018). FAQs on Plastics. *Our world in Data by Oxford University*. Obtenido de <https://ourworldindata.org/faq-on-plastics#are-plastic-alternatives-better-for-the-environment>

- Sandoya, D., & Macias, C. (2021). *Diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor de material plástico reutilizable tipo tereftalato de polietileno (PET) para la elaboración de filamento para impresión 3D*. Quevedo, Ecuador: Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Savgorodny, V. (1978). *Transformación de plástico*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, S.A.
- Savgorodny, V. K. (1978). *Transformación de plásticos*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, S.A.
- Sepe, M. (29 de 09 de 2012). Poliésteres PBT y PET: la cristalinidad hace la diferencia. *Resinas Commodity*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/columnas/polisteres-pbt-y-pet-la-cristalinidad-hace-la-diferencia>
- SEW. (2022). *Eurodrive*. Obtenido de Motorreductores de tornillo sin fin: https://www.sew-eurodrive.es/productos/motorreductores/motorreductores_estandar/motorreductores_de_tornillo_sin_fin_sdr/motorreductores_de_tornillo_sin_fin_sdr.html
- SKChemicals. (2012). *Product Data Sheet of SKYGREEN K2012*. Korea: R&D Center Polymer Division.
- SKF. (2019). *Rodamientos*. Gotenburgo, Suecia: Grupo SKF. Obtenido de https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf
- Tseng, M., & Wang, C. (2014). Modular Design. En T. I. Engineering, *CIRP Encyclopedia of production engineering* (págs. 1226–1235). Springer. doi:10.1007/978-3-642-20617-7
- Weather Spark. (s.f.). *El clima en Bucaramanga, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia)*. Obtenido de es.weatherspark.com:

<https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-año>

Wileman, J., Choudhury, M., & Green, I. (1991). Computation of Member Stiffness in Bolted Connections . *ASME Journal of Mechanical Design*, 6.

Woern, A. L., McCaslin, J. R., Pringle, A. M., & Pearce, J. M. (Octubre de 2018). RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. *HardwareX*, 4, 58. doi:10.1016/j.ohx.2018.e00026

Zebra Gearbox. (s.f.). *Banebots*. Obtenido de Banebots site: <https://banebots.com/m7-rs775-12/>; <https://banebots.com/p6s-444-s/>