

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE  
FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D A PARTIR DE BOTELLAS RECICLADAS**



**GIANCARLO RAMOS ESPINOSA  
2140566  
GUILLERMO ANDRÉS LOMBANA GÓMEZ  
2141316**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA INGENIERÍA MECATRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2019**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE  
FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D A PARTIR DE BOTELLAS RECICLADAS**



**ACREDITACIÓN  
INSTITUCIONAL  
DE ALTA CALIDAD**

Vigilada MinEducación.  
Res. No. 16740, 2017-2021.

**GIANCARLO RAMOS ESPINOSA  
GUILLERMO ANDRÉS LOMBANA GÓMEZ**

**Proyecto de grado para optar al título de  
Ingeniero Mecatrónico**

**Director  
ALVARO JOSÉ ROJAS ARCINIEGAS  
Ph. D. en Ciencias de la Imagen**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA INGENIERÍA MECATRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2019**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en  
cumplimiento de los requisitos exigidos  
por la Universidad Autónoma de  
Occidente para optar al título de  
Ingeniero Mecatrónico**

---

**Miguel Ángel Hidalgo Salazar**

---

**Juan Pablo Correa Aguirre**

**Santiago de Cali, 6 de junio de 2019**

*A...*

*Nuestros padres y abuela*

*Por su apoyo constante*

*Freddy Ramos y Claudia Espinosa*

*Guillermo Lombana Morales, Sandra Gómez y Silvia Gómez*

*A Bryan Ramos y Jesús Romualdo por su inspiración....*

*A la Fundación Sociedad Portuaria por ayudarme a cumplir este sueño*

*A Yohana Burbano Henao por su gran apoyo y confianza en todo momento*

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales para la organización Fundautónoma por permitirnos acercarnos a la comunidad usuaria del dispositivo que se desarrolla en este trabajo, especialmente para Felipe Hurtado Ardila, el director ejecutivo de esta fundación, agradecemos su recibimiento y todas las herramientas que nos facilitaron durante el proceso de interacción con los usuarios ayudándonos a conocer sus necesidades.

Igualmente agradecemos a Paula Andrea Capera Tobar y a Camilo Andrés Arias Niño, estudiantes del programa de ingeniería mecatrónica de la Universidad Autónoma de Occidente por su colaboración en la fase de identificación de necesidades de los usuarios y comunicación con la fundación.

Reconocimiento especial al personal de los laboratorios quienes han dado soporte a la realización de las pruebas de rendimiento del dispositivo, en especial a María Carolina Sánchez y Nelson Álvarez operadores de máquinas en el laboratorio FabLab.

Y, finalmente, agradecemos al docente Álvaro José Rojas por su apoyo desde el comienzo de este trabajo, con su interés en todo lo concerniente al proceso de diseño y su apoyo para la participación en congresos y ponencias.

Al GITEM por su colaboración con la financiación de algunos elementos del trabajo presentado y a Precious Plastic por la información proporcionada.

A Dios por absolutamente todo.

CONTENIDO	pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4. ANTECEDENTES	22
4.1 APLICACIONES EN EL RECICLAJE DE MATERIALES	25
5. MARCO TEÓRICO	28
5.1 RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS	28
5.1.1 Tereftalato de Polietileno (PET)	29
5.1.2 Polietileno de alta densidad (HDPE)	30
5.1.3 Polipropileno (PP)	31
5.2 PROCESAMIENTO DE MATERIALES PLÁSTICOS	31
5.2.1 Proceso de triturado de plásticos	32
5.2.2 Proceso de extrusión de plásticos	33
5.2.3 Proceso de moldeo por inyección de plásticos	35
5.3 PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN	35

5.3.1	Punto de transición vítrea (Tg)	35
5.3.2	Punto de fusión (Tm)	36
5.3.3	Temperatura de fusión en procesamiento de polímeros (Polymer Melt Temperature)	37
5.4	MANUFACTURA ADITIVA	37
5.5	MEDIDAS DE RUGOSIDAD	38
5.5.1	Rugosidad media aritmética – Ra	38
5.5.2	Rugosidad media Rz	39
6.	METODOLOGÍA	40
6.1	DESARROLLO CONCEPTUAL	41
6.2	DISEÑO A NIVEL DE SISTEMAS	53
6.3	DISEÑO DETALLADO	58
6.3.1	Sistema de triturado	58
6.3.2	Sistema de extrusión	65
6.3.3	Sistema de enrollado	67
7.	RESULTADOS	70
7.1	PLAN DE VALIDACIÓN	71
7.2	ESPECIFICACIONES FINALES	91
8.	CONCLUSIONES	92
9.	RECOMENDACIONES	95
	REFERENCIAS	96
	ANEXOS	103

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Fig. 1. Diagrama de árbol del problema.	19
Fig. 2. Ilustración del sistema de extrusión Felfil EVO.	23
Fig. 3. Ilustración de la estructura externa del Filabot.	24
Fig. 4. Estructura física general de “Perpetual Plastic Project”.	25
Fig. 5. Ladrillos WOBO a partir de botellas de cerveza Heineken.	26
Fig. 6. Ejemplos de artículos diseñados con madera plástica.	27
Fig. 7. Clasificación de los plásticos reciclables.	29
Fig. 8. Cuchillas de molinos convencionales.	33
Fig. 9. Cribas con perforaciones de diversos diámetros.	33
Fig. 10. Maquina Extrusora Battenfel BEX-90 y sus partes.	34
Fig. 11. Partes de inyectora de moldeo.	35
Fig. 12. Puntos de transición vítreo para algunos polímeros.	36
Fig. 13. Puntos de fusión para algunos polímeros.	36
Fig. 14. Representación gráfica de Ra.	38
Fig. 15. Representación gráfica de Rz.	39
Fig. 16. Fases de proceso de diseño en un enfoque multidisciplinario.	40
Fig. 17. Diagrama de caja transparente de funciones.	45
Fig. 18. Diagrama de caja transparente subfunción de extrusión.	46
Fig. 19. Concepto de diseño 1.	46
Fig. 20. Concepto de diseño 2.	47
Fig. 21. Concepto de diseño 3.	47

Fig. 22. Concepto de diseño 4.	48
Fig. 23. Concepto de diseño 5.	48
Fig. 24. Concepto de diseño 6.	50
Fig. 25. Concepto de diseño 7.	50
Fig. 26. Concepto de diseño 8.	51
Fig. 27. Concepto de diseño 9.	53
Fig. 28. Relación función - concepto.	54
Fig. 29. Subsistemas del dispositivo.	54
Fig. 30. Diagrama costo - valor de QFD.	57
Fig. 31. Diagrama de cuerpo libre de cuchilla de triturado.	58
Fig. 32. Esquema de fuerzas y reacciones en la cuchilla.	61
Fig. 33. Resultado de esfuerzos para la cuchilla.	61
Fig. 34. Resultado de deformaciones en la cuchilla.	62
Fig. 35. Resultado de factor de seguridad confiable para la cuchilla.	62
Fig. 36. Cargas y sujeteciones en el sistema eje-cuchilla.	63
Fig. 37. Resultados de esfuerzos en sistema eje-cuchilla.	63
Fig. 38. Vista isométrica de trituradora.	64
Fig. 39. Vista explosionada de Felfil.	65
Fig. 40. Vista isométrica del sistema de extrusión.	67
Fig. 41. Diagrama cinemático simplificado de funcionamiento.	68
Fig. 42. Vista isométrica externa sistema de enrollado.	69
Fig. 43. Módulo sistema de triturado.	70
Fig. 44. Módulo sistema de extrusión.	70
Fig. 45. Módulo sistema de enrollado.	71

Fig. 46. Resultados proceso de triturado.	72
Fig. 47. Resultados de extrusión de RPET.	75
Fig. 48. Resultados de extrusión de RPET con deshumidificación.	76
Fig. 49. Señalización de tramo de filamento extruido.	77
Fig. 50. Operación sistema de triturado.	80
Fig. 51. Operación sistema de extrusión.	81
Fig. 52. Operación sistema de enrollado	82
Fig. 53. Sistema de desplazamiento longitudinal.	82
Fig. 54. Interfaz de mando sistema de extrusión.	83
Fig. 55. Interfaz de mando sistema de enrollado.	83
Fig. 56. Pieza impresa con FDM en PLA.	86
Fig. 57. Resultados de impresión a partir de material reciclado con tratamiento previo.	87
Fig. 58. Resultados de impresión a partir de material comercial PETG.	87
Fig. 59. Toma de rugosidad de superficie entre las capas en PET (dirección z).	88
Fig. 60. Toma de rugosidad de superficie en capa superior PET.	88
Fig. 61. Resultados de impresión con filamento a partir de material reciclado sin un tratamiento especial previo.	90

## LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA I. Melt Temperature de materiales plásticos reciclables.	37
TABLA II. Lista de necesidades.	41
TABLA III. Análisis de competencia en extrusoras.	42
TABLA IV. Análisis de competencia en trituradoras.	43
TABLA V. Resumen de especificaciones preliminares.	44
TABLA VI. Matriz 1 de iteración.	49
TABLA VII. Matriz 2 de iteración.	51
TABLA VIII. Matriz 3 de iteración.	52
TABLA IX. Matriz 4 de iteración.	52
TABLA X. QFD Fase II. Análisis de calidad por sistemas.	55
TABLA XI. Relación costo - valor de los componentes.	56
TABLA XII. Datos resistencia a la tracción y esfuerzo cortante.	59
TABLA XIII. Tiempo de triturado por material.	72
TABLA XIV. Porcentaje de aprovechamiento de material en el triturado.	73
TABLA XV. Rango de temperatura de trabajo para cada plástico.	74
TABLA XVI. Tiempo de extrusión por material.	75
TABLA XVII. Longitud de filamento obtenido de 100 g de material.	76
TABLA XVIII. Medida del filamento en tramo de 1 m.	77
TABLA XIX. Peso de filamento por prueba	.79
TABLA XX. Número de operaciones para el manejo del dispositivo por prueba.	79
TABLA XXI. Potencia eléctrica consumida por el dispositivo en dos casos.	84

TABLA XXII. Parámetros de trabajo de impresión 3D con PET, PP, HDPE Y PS.	86
TABLA XXIII. Medidas de rugosidad Ra y Rz de las piezas impresas a partir de pellets con tratamiento previo.	89
TABLA XXIV. Medidas de rugosidad Ra y Rz de las piezas impresas a partir de plástico reciclado sin tratamiento.	90
TABLA XXV. Lista de especificaciones técnicas finales.	91

## **LISTA DE ANEXOS**

	<b>pág.</b>
Anexo A. Diagrama QFD.	103
Anexo B. Matrices de comparación métricas generales, componentes subsistemas.	104
Anexo C. Diagrama eléctrico de sistema de control de temperatura.	107
Anexo D. Planos sistema de extrusión.	108
Anexo E. Esquema electrónico de control por lógica cableada sistema de triturado.	113
Anexo F. Planos de trituradora.	114
Anexo G. Diagrama de conexiones electrónica sistema enrollado.	124

## RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y la implementación de un sistema capaz de transformar el reciclaje de botellas y recipientes de plástico en filamento para suplir el proceso de impresión 3D en FDM con el fin de que las personas tengan la materia prima para hacer realidad sus diseños, mientras se contribuye a la construcción de bases tecnológicas en algunos sectores marginados en la ciudad de Santiago de Cali como lo es el distrito de Aguablanca.

El proyecto consta en el desarrollo de dos etapas de procesamiento de material reciclado: por una parte, está la etapa de triturado de los recipientes en la cual se busca convertir el material plástico en trozos pequeños utilizando un sistema de cuchillas capaz de despedazar los contenedores. Por otra parte, está el sistema de extrusión de plástico que utiliza el material previamente triturado, obteniendo de este módulo el filamento insumo para las impresoras 3D, este consta de un extrusor guiado por un tornillo sin fin en el cual funde el material plástico y se empuja por la boquilla moldeándolo del diámetro estándar (1,75 mm) utilizando un controlador para la regulación de temperatura.

Este proyecto busca reducir los costos de insumos en los sistemas de impresión 3D para que sean más asequibles a personas de escasos recursos y que pueden encontrar en estos procesos de manufactura una alternativa para crear objetos con un valor agregado y pueda convertirse, incluso en una fuente de ingresos para ellos. Nuestro equipo está enfocado en la población del Distrito de Aguablanca en Cali – Colombia, donde se viene trabajando con Fundautonoma, fundación que desde hace varias décadas realiza una labor importante con esta comunidad para brindar alternativas para los jóvenes de estos barrios que suelen estar involucrados en actividades delictivas o pandillas, se está conformando un maker space cuyo objetivo es que estas personas usen la creatividad para diseñar artículos útiles para la comunidad usando procesos de manufactura tales como el corte láser, impresión 3D o termoformado, para que estos artículos puedan ser comercializados por ellos mismos, adquieran habilidades útiles para su vida laboral y se generen oportunidades de empleo o de emprendimiento.

Los plásticos reciclados que destacan frente a los demás plásticos reciclables por mejor acabado y manejo durante el proceso de obtención son el HDPE y el PP, encontrados comúnmente en envases contenedores de detergente, tapas de botellas y contenedores de alimentos presentando un buen comportamiento en el proceso de obtención de filamento e impresión de piezas 3D.

**Palabras claves:** Aguablanca, triturado, extrusión, impresión 3D.

## ABSTRACT

This work reports the design and implementation of a system capable of transforming recycled plastic bottles and containers in filament to feed a 3D printing process so that people have the raw material to make their designs come true, while contributing to the construction of technological bases in marginalized sectors in the city of Santiago de Cali such as the Aguablanca district.

The project entails the development of two stages of processing recycled material: One stage is shredding the recycled containers in which it is sought to transform the containers into small pieces using a system of blades capable of tearing the containers apart.

The other stage is the extrusion system of the previously shredded plastic obtaining from this module the filament to supply a 3D printer, this consists of an extruder guided by a screw in which the material is melted and pushed through a nozzle of standard diameter using a controller for temperature regulation.

This project seeks to reduce the costs of supplies for 3D printing systems so they become more affordable to people with fewer resources and they can find in these manufacturing systems an alternative to create objects with added value that may even become a source of income for them. Our team is focused on the population of the Aguablanca district in Cali - Colombia, where we are working with Fundautonoma, a foundation that for several decades has been doing an important job to offer alternatives for youth of these neighborhoods, a maker space is being established whose objective is that these people use their creativity to design useful articles for the community using manufacturing processes such as laser cutting, 3D printing or thermoforming, so that these items could be commercialized by themselves, they acquire useful working skills and new employment or entrepreneurship opportunities are generated.

The recycled plastics that stand out against the other recyclable plastics for better finishing and handling during the process of obtaining are HDPE and PP, commonly found in containers containing detergent, bottle caps and food containers presenting a good behavior in the process of obtaining filament and printing of 3D pieces.

Keywords: Aguablanca, shredder, extrusion, 3D printing.

## INTRODUCCIÓN

El proyecto “diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas” nace como una idea para reducir la problemática ambiental de la contaminación por el consumo excesivo de plásticos desde el diseño de productos mecatrónicos con la construcción de un dispositivo capaz de transformar recipientes plásticos en insumo para las impresoras 3D; el proyecto se está validando con la participación de una comunidad de escasos recursos de la ciudad de Cali: el distrito de Aguablanca, específicamente personas vinculadas a la sede de Fundautonoma, la cual es una subdivisión de la Universidad Autónoma de Occidente con una razón social que piensa en las comunidades segregadas y el cómo poder ayudarles; con ayuda de esta entidad se logra tomar datos de los comportamientos de las personas de la población como las condiciones de vida de los mismos y una predicción de la interacción de los posibles usuarios con el dispositivo, esto para utilizarlos como requisitos de diseño en la construcción de la máquina dentro de la fase de diseño conceptual.

Colombia se ha quedado corto en el tema del reciclaje, generando un mayor desperdicio por el uso intensivo de recipientes plásticos, haciéndolos difíciles de manejar puesto que no son degradables como si lo es el papel, por lo que hay que iniciar medidas más inclusivas en la población para reducir dicho problema ambiental. En EEUU se han generado campañas prometedoras en el estilo de vida de los estadounidenses en pro del reciclaje, dado que esta práctica mantiene los materiales valiosos fuera de los basureros de modo que puedan convertirse en nuevos productos [1].

Los plásticos reciclados, por ejemplo, se utilizan para fabricar una vasta variedad de productos de consumo, tales como, ropa, utensilios de cocina y herramientas de jardín, que pueden ser excelentes regalos ecológicamente afables. En 2012 la compañía REPREVE convirtió cerca de mil millones de botellas plásticas en hilos y telas utilizados para fabricar productos para compañías tales como, Patagonia, Ford Motor Company y LK Life Khaki. El número y tipos de productos elaborados con plásticos reciclados aumentan dramáticamente a medida que el reciclaje plástico se expande [2].

El procedimiento para transformar recipientes y material plástico en filamento insumo del proceso de FDM es utilizar un dispositivo que consta de dos etapas de procesamiento de material, el triturado de elementos plásticos y la extrusión del mismo material.

Las pruebas de funcionamiento del dispositivo han sido realizadas con materiales plásticos reciclados de PET (Tereftalato de Polietileno), PP (Polipropileno), HDPE (Polietileno de Alta Densidad) y PS (Poliestireno), debido a que son los materiales más comunes entre el reciclaje de plásticos, hallado en botellas, tapas, contenedores plásticos, cubiertos, entre otros usos cotidianos; a raíz de esto y la serie de pruebas realizadas, los materiales reciclados que mejor se comportan en la impresión 3D y en la generación de filamentos son el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno (PP), los criterios para la selección de estos depende de aspectos como la calidad de salida del material (diámetro uniforme, rugosidad en la impresión 3D), los peligros que puede generar el procesamiento de material, entre otros aspectos.

El proceso de diseño implementado para la generación del dispositivo se basa en la metodología del diseño concurrente.

Finalmente se plantea utilizar el reciclaje de recipientes plásticos para la elaboración de materia prima aplicado a la manufactura aditiva, la cual por lo general es implementada en el prototipado de piezas plásticas que con moldes de inyección es complicado de realizar, buscando con esto, reducir la problemática ambiental generada por los desperdicios plásticos, aprovechándose en la manufactura aditiva (específicamente en el proceso de FDM) la cual es incipiente en Colombia.

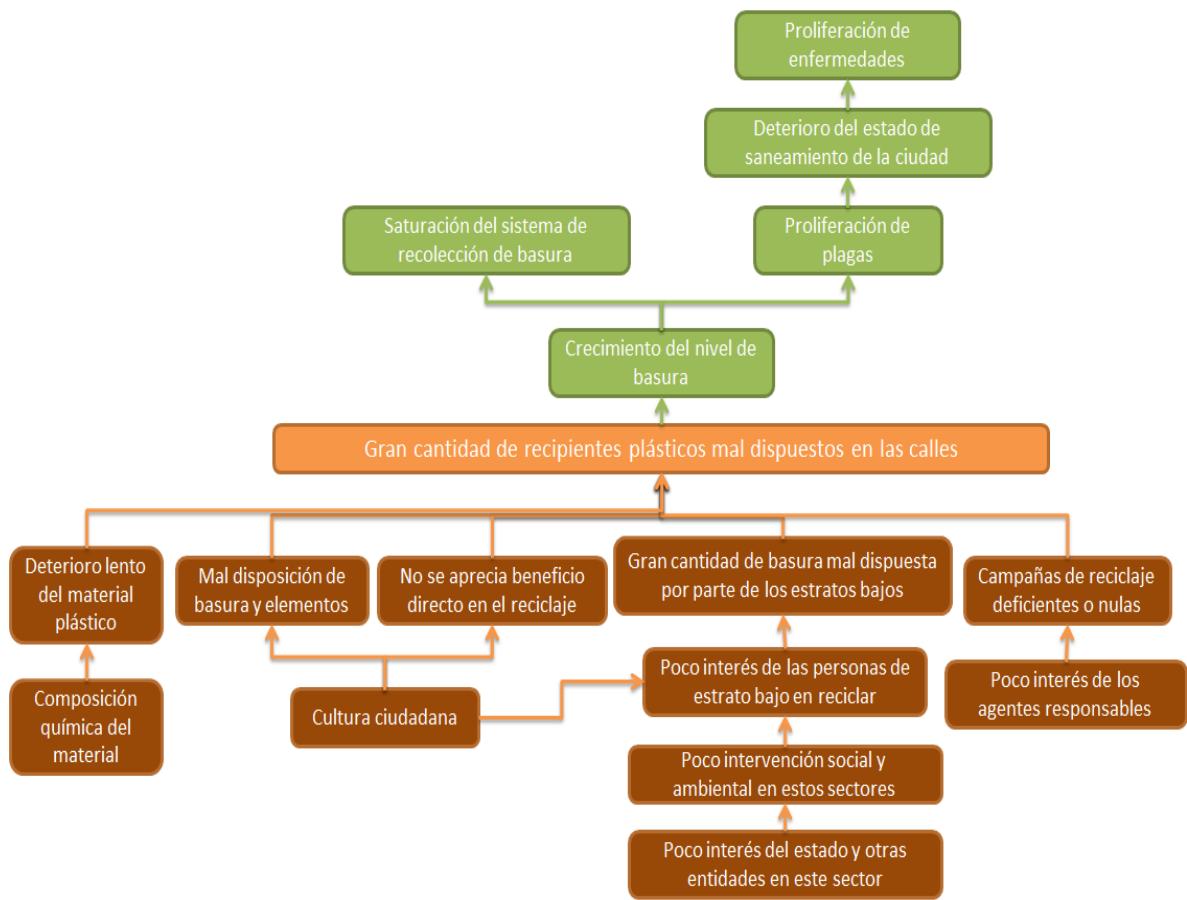
## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El exceso de producción desmedida de material plástico para la fabricación de recipientes y las grandes cantidades de desechos de este tipo que se generan y terminan en el ambiente, ha logrado convertirse en un problema ambiental a gran escala. En Colombia, el reciclaje de botellas plásticas no es un tema muy común, se han realizado campañas para separar residuos y poder reusar botellas, sin embargo, solo el 26% de las botellas plásticas se recicla, ya que las costumbres de algunos colombianos impiden que estas campañas tengan resultados positivos a gran escala [3].

El excesivo consumo de productos envasados en botellas plásticas junto con la falta de cultura e información de los ciudadanos sobre contaminación, ocasiona que las botellas no sean depositadas en los lugares dispuestos para tal almacenaje, por lo tanto, hace que un gran porcentaje de éstas no sean recogidas para realizar correctamente su disposición final [4].

Por otro lado, el uso de plásticos se vuelve un aliado en las nuevas tecnologías desarrolladas, tal como lo es la manufactura aditiva y el uso de impresoras 3D, en el que este material se convierte en la materia prima de este tipo especial de proceso, por esta razón resulta llamativo una máquina capaz de transformar recipientes plásticos directamente en insumos para la impresión 3D de bajo costo, beneficiando e incentivando a las comunidades de bajos recursos, para que vean en el reciclaje una forma alternativa de sostén para su vida diaria [5].

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de árbol de problema, mostrando las principales causas y sus consecuencias.



**Fig. 1. Diagrama de árbol del problema.**

Debido a estas connotaciones, ¿cómo es posible desarrollar un sistema que permita transformar recipientes y elementos plásticos en filamentos y aplicarlo a nuevas tecnologías como la impresión 3D?

## 2. JUSTIFICACIÓN

El exceso de contaminación causado por las botellas plásticas mal administradas es un problema que crece hoy en día a pasos agigantados [4], el consumo de la sociedad en la cual vivimos sumado a la falta de conciencia de las personas (centrando la mirada en Colombia) y el largo tiempo de vida que posee el material (de 100 a 1000 años) [7], son las principales causas de este dilema; al degradarse tan lentamente, hay un crecimiento excesivo en la población de estos contenedores, generando perjuicios a la sociedad como la incontrolable cantidad de basura, el aumento de plagas, entre otras; la solución de esto es demandada para evitar complicaciones mayores en la comunidad y controlar los niveles de desechos plásticos, dándole un uso especial a la basura (reciclaje), obteniendo de esto un nuevo producto con la ayuda de nuevos procesos de manufactura, como lo es la manufactura aditiva.

Las botellas plásticas (hechas con materiales como el PET y Polietileno de alta densidad), en el país son consumidas de manera masiva y esto ocasiona que sea un elemento habitual en las basuras generadas por las comunidades, afirmando lo anterior, “en Colombia de los 11,6 millones de toneladas que genera al año, sólo aprovecha un 17 por ciento, según cifras oficiales. Por no entender que lo que usualmente se denomina basura, que no son más que recursos mal manejados, se está enterrando la plata [8].” Pero, el reciclaje de botellas plásticas no es un tema muy común, por tal razón se hace necesario implementar un mecanismo que permita atraer la atención de las personas y que genere una disminución en el volumen de desechos plásticos, esta puede ser una alternativa para mitigar el problema del uso masivo de plásticos y por lo tanto controlar la disposición final de los mismos, siendo esto el objetivo que se pretende realizar con este proyecto.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sistema capaz de transformar botellas plásticas en filamentos que sirva como insumo para el proceso de impresión 3D.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar los procesos involucrados para transformar botellas plásticas en filamento para impresión 3D en una única máquina.
- Construir un sistema capaz de triturar contenedores plásticos para así transformarlos en pellet.
- Construir un sistema que permita extruir filamento plástico a partir de pellet
- Integrar estos sistemas en una única máquina que pueda ser adquirida y operada por habitantes de una comunidad de bajos recursos.

#### 4. ANTECEDENTES

J. R. Whinfield y J. T. Dickson, investigadores del poliéster termoplástico, definieron el polietileno Tereftalato (PET) como un polímero para fibra. Desde que comenzó la producción comercial del PET, este ha producido un gran desarrollo tecnológico, logrando de esta manera un alto nivel de sofisticación por su crecimiento a nivel mundial.

Los envases PET se presentan por primera vez en 1977, haciéndose muy populares y revolucionando el mercado. Así los envases de polietileno tereftalato han llegado a tener distintas funciones como envase para las bebidas refrescantes, aguas minerales, aceite comestible y detergentes; también bandejas termoformadas, envases de salsas, farmacia, cosmética, licores, etc. [9, p. 7]

Numerosos proyectos sobre el reciclaje del PET han surgido, uno de estos es el de ecoeficiencia propuesto por estudiantes de la universidad Espíritu Santo en Ecuador, en este proyecto los estudiantes dictan una serie de procedimientos para transformar botellas en productos ornamentales y prendas de adornos, convirtiendo el reciclaje en una oportunidad de negocio para las personas, el proyecto no es dirigido a un estrato socioeconómico exacto, pero plantearlo para comunidades de escasos recursos podría mitigar un poco el problema de contaminación ambiental y el de pobreza que se presenta en todo el mundo [9].

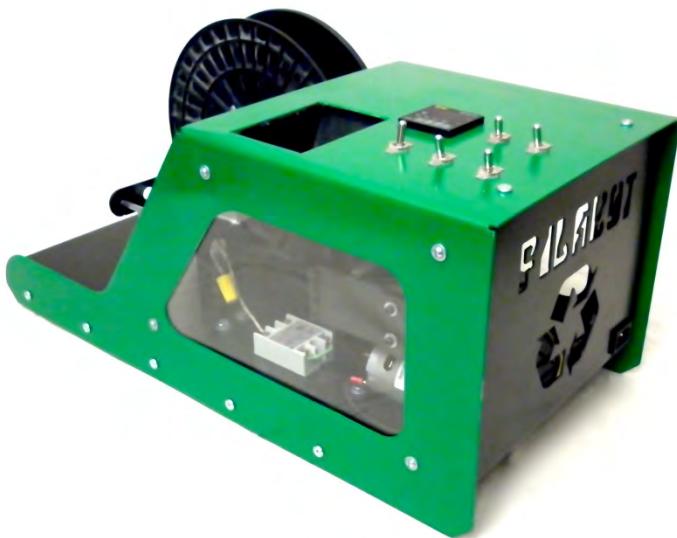
Dentro de proyectos y/o productos que abordan las temáticas de procesos de transformación de materiales y extrusión de plásticos se encuentra el Felfil EVO, el cual es un extrusor de filamentos plásticos normalmente usado en la impresión 3D realmente sencillo en su principio de funcionamiento basándose en un tornillo sin fin que transporta los pellets del material plástico por medio de la camisa calefactora del extrusor hasta la boquilla la cual es calentada por resistencias térmicas incrustadas en el mismo, este dispositivo es comercializado por la empresa FE e inclusive se encargan de la comercialización de artículos complementarios como lo es el kit completo de extrusión [10], dentro de la información técnica del dispositivo que se comercializa está el rango de temperatura de trabajo (hasta 250°), la velocidad de extrusión (150g/h), el volumen que almacena (250g). El dispositivo en conjunto con un portafolio de otros elementos como el IceCalibur y el CupPC que son dispositivos ornamentales, fueron diseñados por tres estudiantes italianos de maestría en Ecodiseño del Politécnico di Torino en 2016: Frabrizio Mesiano, Alessandro Severini y Fabricio Pasquero, los cuales fueron beneficiados por esta institución con un fondo monetario para poder seguir con el desarrollo de este dispositivo [10]. Los productos de este grupo se basan en la filosofía de que sean ecodiseños,

productos open source, y que sean el resultado de un proceso de diseño colaborativo [10]. En la Fig. 2 se muestra una imagen de este producto.



**Fig. 2. Ilustración del sistema de extrusión Felfil EVO. [10]**

Por otro lado, dentro de la misma línea de obtención de suministros para la impresión 3D en forma de filamentos se encuentra el Filabot representado en la Fig. 3, que guarda características similares con el FELFIL descrito anteriormente, este dispositivo es usado por la NASA, MIT, Dupont y otras compañías internacionales. La compañía, Filabot, no solo comercializa sistemas de extrusión de plástico, sino que dentro de sus instalaciones poseen una línea de producción para convertir plásticos en filamentos para la impresión 3D, además la filosofía de la compañía se basa en principios ambientalistas. En cuanto al producto, este posee un tornillo sin fin capaz de presurizar los plásticos durante el proceso de extrusión, lo cual le permite una veloz producción y un mayor control del diámetro extruido, la capacidad de mezcla de este se mejora por medio de una sección de compresión progresiva, el cual aplica fuerzas de cizallamiento entre el plástico y las paredes del cilindro; además de esto el dispositivo cuenta con un sistema de control para la velocidad del husillo ubicado en una de las paredes de la estructura produciendo inclusive 2 lb/h de material [11]. En la Fig. 3 se muestra una imagen de este producto.



**Fig. 3. Ilustración de la estructura externa del Filabot. [11]**

Además de solo equipos de extrusión para la obtención de filamentos también se desarrolla un proyecto denominado “Perpetual Plastic Project” (PPP) que fue realizado en el año 2012 en Holanda, el cual es una estructura interactiva de reciclaje la cual transforma los productos desechados plásticos en nuevos productos por la impresión 3D, al ser una estructura esta se puede reservar para eventos, festivales o demás ocasiones en la que las personas pueden interactuar con ella, su principio básico de funcionamiento consta en que el usuario introduzca el material que desea reciclar (vasos desechables, botellas, u otro material plástico) a la primera estación, un dispositivo se encarga de secar los productos para luego entregárselo a la personas y que sea introducido a la parte de triturado con una rejilla de protección, de aquí los trozos triturados pasan a la extrusora de manera manual y luego sacar los filamentos que van a la impresora 3D [12]. En la Fig. 4 se muestra el diseño del proyecto PPP.



**Fig. 4. Estructura física general de “Perpetual Plastic Project”. [12]**

Otro proyecto de ídole similar al “PPP” de la Fig. 4 lo realiza Dave Hakkens con el programa Precious Plastic en el año 2013 en Holanda y que ahora está a nivel mundial, lo que él denomina como una comunidad cuya filosofía se basa en Open Source, Dave crea una serie de cuatro dispositivos (trituradora, extrusora, inyectora y compresora de plásticos) con la finalidad de promover el reciclaje de materiales plásticos y transformarlo en elemento cotidianos y ornamentales, con esta gestión el equipo de Precious Plastic tienen como objetivo compartir conocimiento y experiencias relacionadas al hábito de reciclar para obtener algo a cambio. La compañía deja a entera disposición de la comunidad los planos para el diseño de las estructuras de los dispositivos e invita a todas las personas miembros a compartir sus hallazgos y resultados en el proceso de crecimiento del proyecto. [13]

#### **4.1 APLICACIONES EN EL RECICLAJE DE MATERIALES**

Los materiales reciclados reducen ampliamente el nivel de energía necesario para la creación de nuevos materiales. Dentro del uso que se le da al material reciclado y tratado se encuentra el de la construcción como lo hicieron Alfred Heineken y John Habraken en 1963, ellos desarrollaron el Heineken WOBO (world bottle) que se refiere a un envase rectangular de cuello corto que por sus características físicas puede funcionar como ladrillo, visible en la Fig. 5. Este elemento es considerado la primera producción masiva diseñada para tener un uso adicional [14, p. 15].



**Fig. 5. Ladrillos WOBO a partir de botellas de cerveza Heineken. [15]**

El procedimiento de construcción es sencillo, parte del llenado de las botellas con tierra, que deberán estar debidamente compactadas. Posteriormente son colocadas de forma horizontal (se utiliza un aglomerante entre hiladas para asentarlas y nivelarlas) y son atadas entre sí para formar una red entre las tapas, lo que le da una mayor firmeza.

En México, se adoptó esta técnica y fue construida la primera vivienda (prototipo) en el municipio de San Pablo del Monte, Tlaxcala en el año 2010, la cual benefició a una familia de escasos recursos a través de la Fundación Liderazgo Joven A.C. [14, p. 17]

Otro caso ejemplo de reciclaje e innovación lo presenta National Geographic en un artículo mencionando a Eduardo Uribe Salgo, representante de la línea de ropa Ternua, la cual se enfoca en el diseño de ropa de montaña; esta compañía fabrica camisetas funcionales, chaquetas, membranas impermeables, mochilas, entre otros elementos de montaña a partir de PET reciclado (RPET) recogido en el mar, además reciclan otro tipo de residuos tomados de redes de pesca en desuso y residuos agrícolas para producir tinte natural para los textiles. [16]

La madera plástica es una alternativa moderna utilizada para el diseño de estructuras y piezas ornamentales como se muestra en la Fig. 6, la empresa TREX es una de las compañías que desarrolla productos de este tipo, la madera

se obtiene de la mezcla del 50% de madera natural y 50% de polietileno reciclado proveniente de bolsas plásticas (LDPE), esta mezcla no solo disminuye la cantidad de madera necesaria para la fabricación de productos, además mezcla los beneficios del plástico: durabilidad y resistencia combinándola con la belleza y elegancia de la madera. [17]



**Fig. 6. Ejemplos de artículos diseñados con madera plástica. [17]**

Un ejemplo que relaciona el hábito de reciclar y los contenidos multimedia lo desarrollan la empresa Carrefour en unión con la compañía Dondelotiro, la aplicación se llama Reciclaya, la cual permite a sus clientes escanear el código de barras y define en qué bolsa de basura debe ser dispuesto el residuo del producto. [18]

## 5. MARCO TEÓRICO

Esta sección comprende, en primer lugar, una revisión teórica sobre los materiales plásticos y el reciclaje de los mismos junto con su obtención y algunas características físicas de estos; el segundo apartado hace mención a los procesos que se realizan comúnmente para el procesado de plástico incluyendo el tema de manufactura aditiva como mecanismo de transformación de plástico, el tercer apartado menciona algunas de las características de los materiales plásticos tenidas en cuenta en los procesos de transformación de este tipo de materiales y finaliza con los temas de rugosidad como parámetro de calidad de las impresiones usado en este trabajo.

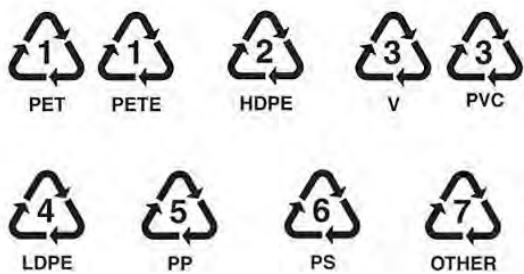
### 5.1 RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS

La base del proyecto se encuentra en la transformación del plástico desde recipientes y contenedores a filamento extruido. La atención se centra en el PET, el polietileno de alta densidad, el polipropileno y el poliestireno que se encuentran en elementos de uso cotidiano como el transporte de alimentos y bebidas, dejando a un lado el PVC debido a que es un material nocivo en los procesos de fundición de plástico para los humanos por sus gases emitidos y el LDPE (Polietileno de baja densidad) ya que este se encuentran principalmente en bolsas plásticas y su comportamiento en procesos de triturado supone problemas de homogeneidad.

En el área del reciclaje de plásticos existen los métodos llamados primario, secundario, terciario y cuaternario. El primario tiene que ver con la utilización de partes del plástico, pero en aplicaciones diferentes y se obtiene por recortes del material original. El secundario es el más empleado y se refiere a la fusión de los desechos que son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor aplicación, las cuales son diferentes a las del plástico original. El terciario es un proceso de tipo químico, que consiste en el aprovechamiento de los componentes químicos del plástico. El cuaternario, consiste en la incineración para recuperar energía [19, p. 25].

Existe gran cantidad de tipos de plásticos, debido a que estos materiales poseen procesos de reciclaje distintos normalmente se codifican con un número dentro de un triángulo, según el SPI (Sistema de Identificación de Plásticos). Dentro de estos se encuentra el Tereftalato de polietileno (*PET*), codificado con el número 1, utilizado en envases de bebidas, cosméticos, fibras textiles, películas radiográficas, entre otras aplicaciones similares a estas; otro de los plásticos de uso muy común es el *Polietileno de alta densidad*, (PEAD) utilizado comúnmente en envases de aceites de vehículos, detergente, bolsas para supermercados,

baldes para pinturas, tuberías para gas, drenaje y uso sanitario [20, p. 25]. El polipropileno codificado con el número 5 y el poliestireno con el número 6. En la Fig. 7 se muestra una imagen de la clasificación de los plásticos reciclables, el grupo 7 pertenece a aquellos plásticos cuyo proceso de reciclaje es mucho más complejo y por eso recibe el nombre de “otros”.



**Fig. 7. Clasificación de los plásticos reciclables. [21]**

### 5.1.1 Tereftalato de Polietileno (PET)

Es un termoplástico, o sea que es un material que a temperaturas relativamente altas se deforma hasta ser un líquido viscoso y al enfriarse se endurece en su punto de transición vítrea sin presentar un cambio químico [22], este polímero tiene un punto de transición vítrea de 60 a 80°C y un punto de fusión de 255 a 265°C [23, p. 2], “un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos de gas natural y 13% de aire [12, p. 125].” El PET resulta de la combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol. Entre los usos más generalizados de este polímero destaca la fabricación de preformas de botellas para la industria de bebidas gaseosas y agua mineral, así como para cosméticos, medicinas, aceites y frascos de todo tipo. También se fabrican cintas de video y audio, bandejas para microondas, geotextiles y fibras para la industria textil. [19, p. 21]

En cuanto al PET, usado masivamente en la industria de bebidas, registra una participación de alrededor del 65% de todos los envases. Este insumo se exporta como resina desde el país ante el escaso desarrollo de la industria petroquímica en países como Perú y su costo incide considerablemente en los márgenes industriales. Ello hace que la industria de bebidas gaseosas sea muy dependiente de las fluctuaciones en la cotización internacional del insumo. En el año 2007 el precio promedio de importación de resina PET alcanzó los US\$1.471 por TM. La principal

procedencia de la resina para la elaboración de envases es Estados Unidos (43%) y Taiwán (41%).<sup>4</sup> Otros países proveedores son China, Corea y Hong Kong [24, p. 125].

Frente a la demás familia de material plástico, el PET posee la característica de necesitar un tratamiento especial en su proceso de reciclaje, debido a las exposiciones térmicas en la vida útil del material, este logra reducir su viscosidad intrínseca pasando de 0,82 dl/g a 0,76 dl/g por lo que la integridad de este plástico es afectada negativamente, la empresa OHL Apparatebau & Verfahrenstechnik GmbH de Alemania desarrolla el proceso de reciclaje de PET Stehning para combatir este problema con la adición de aditivo (blanqueadores o abrillantadores ópticos o extensores de cadena para aumentar la viscosidad [25]), las etapas del proceso que se utilizan son:

- Lavado y separación del desperdicio de PET.
- Separación de PET transparente y de color.
- Remoción de contaminantes como metales y PVC.
- Molienda, lavado y secado.
- Extrusión reactiva con aditivos y filtración de material fundido.
- Post-condensación de material reciclado. [26, p. 1]

### **5.1.2 Polietileno de alta densidad (HDPE)**

El polietileno es el polímero más simple de todos, su estructura química corresponde a  $(CH_2=CH_2)$ , es un plástico económico que puede manufacturarse en procesos de extrusión, moldeo, soplado, inyección y roto-moldeo. El polietileno de alta densidad, conocido comúnmente como soplado, posee una alta resistencia al impacto, es impermeable, inerte (gran estabilidad) y de baja reactividad, su densidad es de  $0,95\ g/cm^3$  lo cual lo hace un material más rígido que el LDPE (Polietileno de baja densidad). La temperatura de fusión (melting point) se encuentra entre los 130 a 137 °C [27, p. 2].

Entre los usos más comunes del HDPE se encuentran la fabricación de envases de detergentes, contenedores de aceites automotor, shampoo, talco, envases de lácteos, bolsas de supermercados, envases para pintura y helados, tambores, macetas, tuberías e inclusive en los componentes de embarcaciones. [19, p. 21]

### **5.1.3 Polipropileno (PP)**

El polipropileno es un polímero termoplástico (moldeado por calefacción) producido por la polimerización del propileno, su estructura está conformada por un metilo (CH<sub>3</sub>) unido a un grupo vinilo (CH<sub>2</sub>)<sub>5</sub> [19, p. 22]. Es utilizado en el embalaje, estibas, dentro de la industria textil como cuerda, ropa interior térmica, alfombras, vasos desechables, tapas de botellas, juguetes, envases de yogurt, pitillos y elementos de laboratorio. Este material puede ser transformado por moldeo por inyección, moldeo por soplado, termoformado, extrusión, producción de películas. Es inodoro y no tóxico, reciclable y un excelente aislante térmico. La temperatura de extrusión de este material está entre los 208 y 257 °C. [28, p. 2]

Una vez es reciclado se pueden obtener productos como escobas, cepillos, raspadores de hielo, bastidores de bicicleta, rastillos, cubos, paletas de pintura, bandejas, entre otros materiales de este tipo de uso [21].

### **5.1.4 Poliestireno (PS)**

El poliestireno es un polímero vinílico versátil inerte (no reacciona con otros materiales), económico y duradero, es fácil de esterilizar y transparente, este material se obtiene de la reacción química entre el etileno y el benceno que forman el monómero de estireno que al polimerizar se obtiene el poliestireno; es usado para fabricar refrigeradores, aire acondicionados, hornos, autopartes, perillas, carcásas de elementos electrónicos, envases de alimentos, tubos de ensayo, cubiertos [19, p. 22].

“Algunas organizaciones lo consideran un material difícil de reciclar y puede emitir toxinas [21].”

Este material posee una temperatura de degradación que se encuentra entre los 200 a 220 °C, a estas temperaturas el material fundido empieza a desprender una serie de vapores entre los que se encuentran el dióxido de carbono, oligómeros, estireno, etileno y acetileno principalmente [29].

## **5.2 PROCESAMIENTO DE MATERIALES PLÁSTICOS**

Gracias a las características de los materiales plásticos, estos pueden cambiar su forma y dimensiones aplicando calor y presión; entre estos procesos de transformación de plásticos se encuentra la extrusión, moldeo por inyección,

soplado, calandreo, inmersión, rotomoldeo, compresión, termoformado, etc. Sin embargo, para el proceso de obtención de filamento que se desarrolla en este trabajo se centrará la mirada en el proceso de extrusión e inyección.

### 5.2.1 Proceso de triturado de plásticos

El proceso de triturado es uno de los mecanismos más comunes al momento de reciclar plásticos, consiste en desgarrar el material para obtener trozos más pequeños del mismo, este proceso nos proporciona un material más homogéneo; la razón por la que se recicla es que es un material con mucho volumen y poca densidad, en otras palabras, ocupa mucho y pesa muy poco, por lo que este proceso permite reducir su volumen para aprovecharse en otros mecanismos de transformación de material [30].

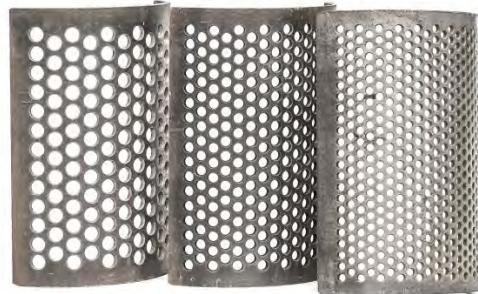
La molienda se realiza dentro de un molino de cuchillas giratorias, las cuales tienen como función triturar las botellas hasta convertirlas en hojuelas con dimensiones específicas, dichas cuchillas están unidas a unos porta cuchillas; los porta cuchillas están unidos a un eje rotatorio por medio de cuñas colocado sobre un par de chumaceras; en un extremo del eje está acoplado un volante de inercia, el cual tiene como función almacenar energía para moderar las fluctuaciones de la velocidad a la que gira el eje cuando se esté triturando el material, y por el otro extremo del eje está unida una polea que es parte del sistema de transmisión de potencia.

Para determinar la capacidad del molino se debe tomar en cuenta la cantidad de plástico que se quiere triturar, la velocidad con la que el material será alimentado y cómo el material será transportado después de obtenido. Todos estos factores ayudan a determinar el tamaño apropiado de la trituradora, el sistema de alimentación, la cámara de molienda, la disposición del rotor y las cuchillas, la velocidad de giro del rotor, la potencia del motor, la configuración de la criba y el sistema de extracción del material molido [31, p. 516].

Un árbol en los sistemas de triturado hace referencia a los ejes que poseen carga de cuchillas, así una trituradora de 4 árboles hace referencia a una trituradora que posee 4 ejes con juegos de cuchillas, en la Fig. 8 se visualizan ejemplos de cuchillas de molinos tradicionales. Las cuchillas suelen ser nombradas como fresas dentro de los catálogos de las trituradoras [32]. Es común que en los procesos de triturado se encuentre una criba o tamiz que filtra el paso de los trozos triturados de un tamaño deseado como lo muestra la Fig. 9.



**Fig. 8. Cuchillas de molinos convencionales.** [33]



**Fig. 9. Cribas con perforaciones de diversos diámetros.** [34]

### 5.2.2 Proceso de extrusión de plásticos

Este es un proceso por el cual es posible obtener productos acabados o semiacabados en régimen continuo. Utilizándose equipos que funden, homogeneizan y fuerzan al polímero a pasar a través de matrices de forma definida asociados a equipos auxiliares como corte, conformación, etc. se pueden producir tubos, películas, chapas, filamentos perfiles, frascos, bidones, etc. Este proceso puede ser también empleado para el revestimiento de sustratos como papel, aluminio y conductores eléctricos [35, p. 52].

Existen varios tipos de extrusión, pero el más utilizado en el mercado es aquel que utiliza un husillo roscado para transportar y generar presión al material, forzando a

pasar por la matriz dándole al producto su forma final. En la Fig. 10 se muestra la estructura de una extrusora industrial.



**Fig. 10. Maquina Extrusora Battenfel BEX-90 y sus partes. [35]**

Las principales partes de un sistema de extrusión convencional son:

- a) Tolva de alimentación: Es por donde se introduce el material plástico aun en polvo o en pellets, ya sea en súper-sacos o por el sistema neumático.
- b) Dosificador: Sirve para controlar la alimentación del material hacia la extrusora y así evitar variaciones de amperaje muy fuertes por la demanda excesiva de torque para el movimiento del husillo.
- c) Tablero de control: Mediante el cual se controlan los parámetros de la extrusora, temperatura del barril, temperatura del cabezal, velocidad del motor principal, velocidad del dosificador y también sirve para monitorear parámetros como: temperatura de la masa, presión de fundido, así como verificar las alarmas que se presenten durante el proceso.
- d) Cañón o Barril: Es donde se alojan los tornillos (husillos) y donde se lleva a cabo la plastificación por métodos de calentamiento de material, es en esta zona donde se encuentran los actuadores de calor.
- e) Tornillos o husillos: Se encargan del transporte del material por medio de movimiento rotatorio y también acelera el proceso de plastificación. [35, pp. 65–66]

### 5.2.3 Proceso de moldeo por inyección de plásticos

El moldeo por inyección es un proceso de transformación de materiales plásticos el cual consiste en depositar el plástico fundido que sale de la boquilla de la inyectora continuo al molde cerrado a presión y frío a través de la compuerta, el material fundido se desplaza por el interior del molde en cada una de las cavidades mientras se solidifica; es en este proceso donde el molde define la forma final del producto, se exemplifica en la Fig. 11. Normalmente la inyectora posee un tornillo sin fin que impulsa el material fundido plástico a la salida hacia el molde [36, p. 182].

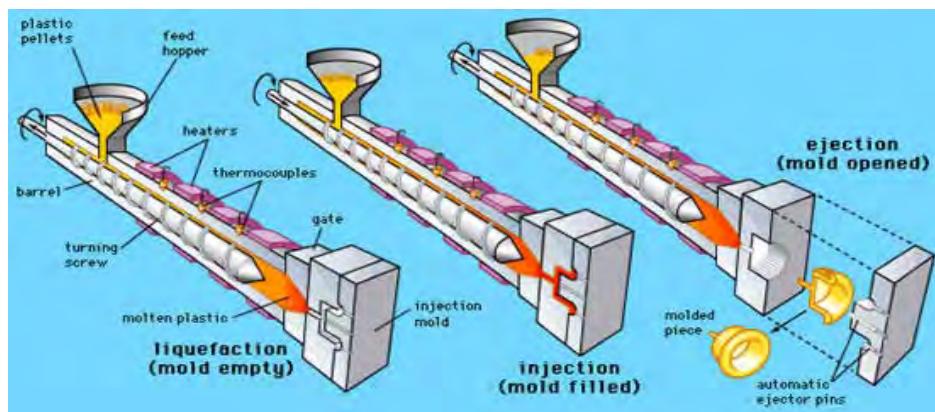
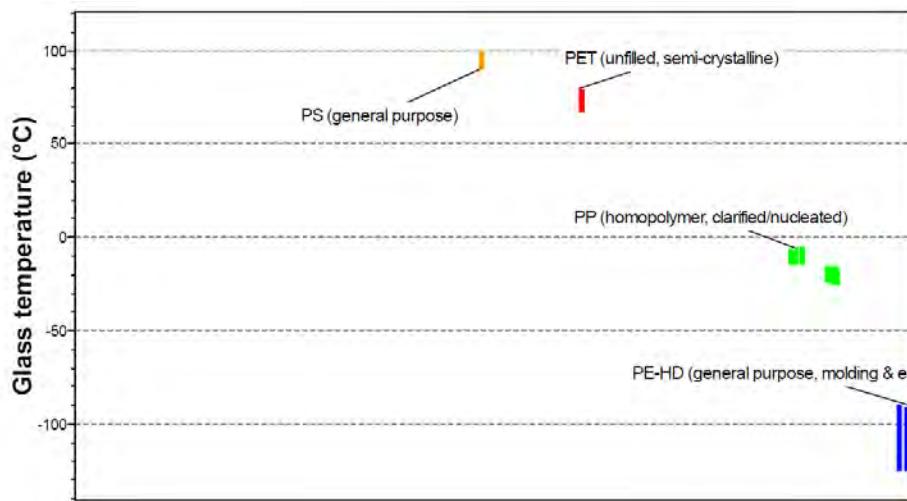


Fig. 11. Partes de inyectora de moldeo. [37]

## 5.3 PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

### 5.3.1 Punto de transición vítrea (Tg)

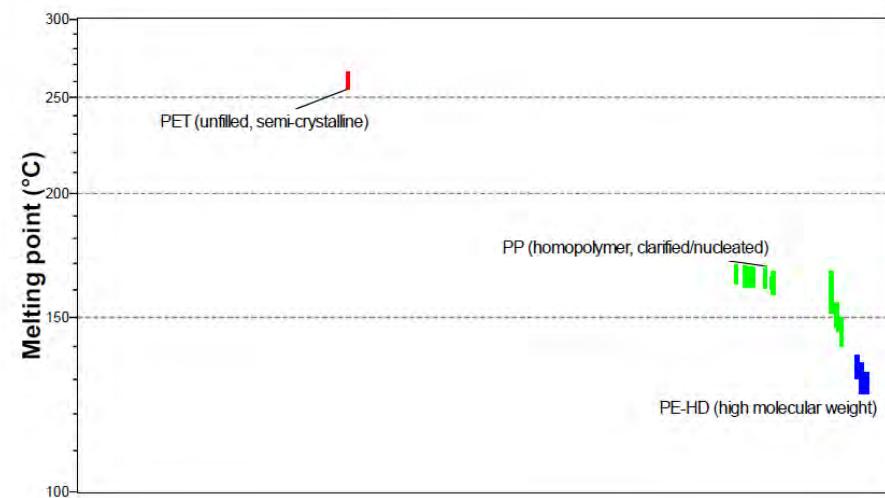
Es una propiedad de los sólidos no cristalinos, los cuales no tienen un punto de fusión dominante. Caracteriza la transición de un sólido a un líquido viscoso en estos materiales. Los elastómeros y ciertos plásticos (como el PP y PE) tienen Tg por debajo de la temperatura ambiente pues Tg normalmente representa la temperatura de uso más baja para estos materiales, o sea la temperatura a la que se vuelven frágiles. Para plásticos amorfos, Tg representa una temperatura de uso superior, refiriéndose a la temperatura a la cual se vuelven fluidos. [38] En la Fig. 12. Se visualizan los valores de Tg para los polímeros con los que se trabajará en este proceso de diseño.



**Fig. 12. Puntos de transición vítreo para algunos polímeros. [38]**

### 5.3.2 Punto de fusión (Tm)

También llamado “melting point”, en el proceso de inyección de plásticos este término representa el valor de temperatura que debe tener el material plástico justo al momento de salir de la boquilla de la inyectora e ingresa al molde [39]. Representa la temperatura a la cual un material cambia bruscamente de sólido a líquido, este valor se reporta únicamente para materiales semi-cristalinos. [40] En la Fig. 13 se muestran los valores de Tm para los polímeros de interés.



**Fig. 13. Puntos de fusión para algunos polímeros. [40]**

### 5.3.3 Temperatura de fusión en procesamiento de polímeros (Polymer Melt Temperature)

Se refiere a aquel valor de temperatura requerido para lograr características de procesamiento estable. En la tabla I el extremo superior de temperatura representa el valor usado comúnmente en los procesos de inyección y el límite inferior es el valor utilizado en los procesos de extrusión y moldeo por compresión.

**TABLA I.**  
**Melt Temperature de materiales plásticos reciclables.**

Plástico	Melt Point
PET (unfilled, amorfico) [41]	260 - 280 °C
HDPE (unfilled, uso común) [27]	177 - 274 °C
PP (homopolímero) [28]	208 - 251 °C
PS (unfilled, uso común) [42]	177 - 260 °C

## 5.4 MANUFACTURA ADITIVA

La tecnología del proceso de manufactura aditiva fue desarrollada en 1980 y se utiliza ampliamente en el prototipado de partes, la cual utiliza en gran medida procesos automatizados y de tecnología de manufactura flexible; la técnica más común de este tipo de mecanismo de producción es la *impresión 3D por FDM (Modelado por deposición fundida)*, la cual produce piezas o partes previamente diseñadas a partir de la sobrepuestas por capas gracias a la extrusión de material por el cabezal de la máquina dirigido por los motores que esta posee permitiéndole desplazamientos en los ejes cartesianos para la producción de la figura en 3D diseñada previamente en un software CAD; la eficiencia de este tipo de proceso y la calidad del producto que se imprime es responsabilidad en su gran mayoría por el tipo de material que se utiliza como materia prima para la impresión, como son los plásticos o cerámicos, igualmente el tamaño del producto se restringe por las dimensiones de la máquina de impresión, las impresoras 3D convencionales utilizan filamentos de materiales plásticos como materia prima, los cuales varían en precios entre \$150.000 a \$350.000 dependiendo del material a utilizar y el proveedor [43].

Dentro de las ventajas que plantea este proceso se hace referencia al poco número de operaciones que se requieren al momento de diseñar un prototipo, ya que la misma impresora se encarga de realizar toda la pieza gracias al modelo 3D que ella recibe de alguna herramienta de dibujo y el código G de un programa procesador, sin embargo, la producción de materiales a gran escala, como

elementos de construcción y piezas para autos eran más sencillas de obtener por medio de los métodos de mecanizado convencional, ya que las impresoras tardan mucho en la fabricación de prototipos para los procesos de gran formato, debido a esto diariamente equipos de investigación desarrollan mejoras a tal punto que hoy en día se obtienen impresoras de grandes áreas de trabajo y que producen a mayores velocidades de impresión, entre otras ventajas [44].

## 5.5 MEDIDAS DE RUGOSIDAD

Para identificar la calidad de las impresiones realizadas a partir de material plástico reciclado se utilizan las mediciones de rugosidad Ra y Rz como patrones de evaluación y comparación entre los resultados.

### 5.5.1 Rugosidad media aritmética – Ra

Este valor hace referencia a la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos de perfil de rugosidad a la Línea Media dentro de la longitud de medición (Fig. 14). Desde un punto de vista aritmético la medida de rugosidad Ra hace referencia a la altura de un rectángulo en la que su área es igual a la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil de rugosidad y la línea media Lm [45].

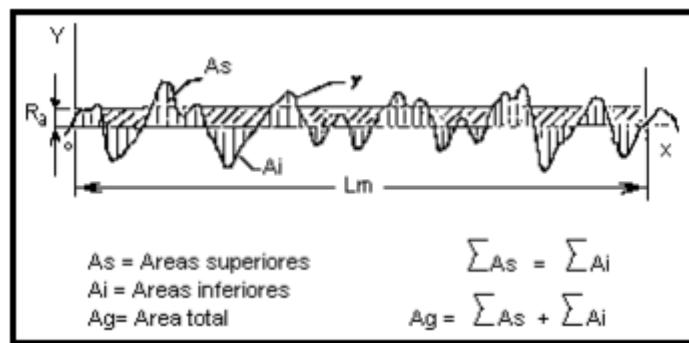


Fig. 14. Representación gráfica de Ra. [45]

$$R_a = \frac{1}{Lm} \int_0^{Lm} |y| dx$$

### 5.5.2 Rrugosidad media Rz

Este valor hace referencia a la media aritmética de los valores de rugosidad parcial  $Z_i$  (Fig. 15), utilizada en casos en que los puntos aislados no influencien la función de la pieza a ser controlada [45].

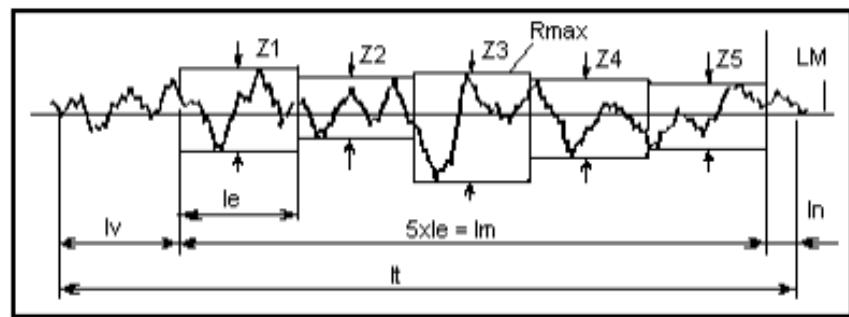


Fig. 15. Representación gráfica de Rz [45]

$$R_z = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$$

## 6. METODOLOGÍA

Para cumplir los objetivos del proyecto se realiza un proceso de diseño de producto a nivel de diseño conceptual y diseño detallado basado en la metodología implementada por Ulrich y Eppinger en el libro “diseño y desarrollo de productos” seguido de la validación correspondiente al funcionamiento con pruebas del dispositivo, partiendo desde la introducción del material plástico para reciclar hasta la salida del material extruido [46].

El proceso que se describe como metodología en el libro se muestra en la Fig. 16.



Fig. 16. Fases de proceso de diseño en un enfoque multidisciplinario. [46, p. 9]

Las fases que poseen relevancia en la metodología implementada van desde la etapa 1 a la 4. El *Desarrollo conceptual* es la primera fase del proyecto y la que mayor creatividad demanda, es en esta fase donde se buscan las necesidades, se definen características técnicas y se generan conceptos que pueden dar solución al problema de nuestro diseño investigando su factibilidad. Dentro de esta etapa se encuentra:

- Identificación de necesidades.
- Análisis de métricas.
- Análisis de la competencia.
- Análisis de Casa de las calidades QFD.
- Especificaciones preliminares.
- Análisis de funcionalidades.
- Generación de conceptos.
- Selección de alternativas.

El *Diseño a nivel de sistemas* se centra en el desarrollo de alternativas de arquitectura del producto, sea modular o integral, definiendo los principales subsistemas y sus interrelaciones.

En cuanto al *Diseño detallado* se define la geometría de las partes, se realiza la selección de materiales y se especifica el diseño industrial, electrónico, mecánico y computacional.

La cuarta fase es la de *Prueba y refinamiento* en la que se hace un plan de validación y se ejecuta para comprobar que el diseño cumpla los objetivos para lo cual fue realizado y se implementen cambios necesarios o recomendaciones futuras resumiendo los datos obtenidos en una ficha de especificaciones técnicas finales del producto [46].

## 6.1 DESARROLLO CONCEPTUAL

La búsqueda de información para iniciar el proceso de diseño se realiza por medio de encuestas virtuales a personas relacionadas con el tema de la manufactura y operarios, se realizan visitas a los habitantes de la zona beneficiada y empresas que trabajan con reciclaje, con esta información se organizan las necesidades de las personas y los requerimientos para el posterior diseño de la solución. De este proceso de recolección de datos deriva la TABLA II lista de necesidades y la importancia de las mismas tomando valores de 1 como de poca importancia frente a las demás y 9 como muy importante ponderada por el equipo de diseño.

**TABLA II.**  
**Lista de necesidades**

Necesidad interpretada	Importancia
El dispositivo sea de fácil uso y manipulación	9
El dispositivo sea de bajo costo	3
El dispositivo sea replicable	3
El dispositivo sea productor mínimo de residuos	9
El dispositivo sea veloz	3
El dispositivo sea consumidor bajo de energía eléctrica	9
El dispositivo sea seguro	9
El dispositivo sea semiautomático	3
El dispositivo sea de dimensiones pequeñas	1
El dispositivo sea transportable	1
El dispositivo sea apto para todas las edades	3

Tabla II. (Continuación).

Necesidad interpretada	Importancia
El dispositivo sea de fácil instalación	9
El dispositivo sea de fácil mantenimiento	9
El dispositivo sea liviano	1
El dispositivo sea silencioso en su proceso	1
El dispositivo sea robusto	3
El dispositivo sea confiable en trabajo continuo	3

Con las necesidades estipuladas se procede a convertir las mismas en especificaciones técnicas de diseño, siendo parámetros medibles.

Dentro de la investigación realizada sobre la competencia, se encuentran un pequeño número de empresas que se dedican actualmente al diseño de máquinas de extrusión de plástico para espacios pequeños o domésticas (de tamaño no industrial). En la TABLA III se nombran 3 compañías que le han apostado a estos productos.

**TABLA III.**  
**Análisis de competencia en extrusoras.**

Producto/ Características	<i>FILABOT</i> [1]	<i>FELFIL</i> [2]	<i>FILASTRUADER</i> [3]
<b>Tipo de producto</b>	Filabot EX2 Filament Extruder	Felfil Evo Assembled	Filastruder KIT
<b>Tamaño (mm)</b>	457,2 x 177,8 x 228,6	350 x 180 x 110	457.2 x 152.4 x 101.6
<b>Precio</b>	\$2,499.00 USD o \$7.464.512.42 COP	520,49€ o 1.828.868.25 COP	\$300.000.00 USD o \$896.170.89 COP
<b>Alimentación</b>	(110 - 220) VAC	110 VAC	(110 - 240) VAC
<b>Potencia</b>	500 Watts	180 Watts	60 Watts
<b>Diámetro extrusor</b>	(1.75 y 2.85) mm	(1.75 y 2.85) mm	(1.75 y 3) mm

Al momento de analizar el entorno de mercado se presenta una ventaja clara frente a ellas: *la condición geográfica*, con la generación de este dispositivo se puede comercializar el producto en Colombia con menos problemas que importar una de estas extrusoras desde otro país, sin embargo, entre las desventajas destaca el hecho de que estas empresas y productos ya han ingresado al mercado y es algo difícil romper la lealtad de marca que los clientes poseen.

En cuanto al análisis de Benchmarking en sistemas de molienda y/o triturado de plásticos se obtiene la información de la TABLA IV, cabe destacar que los sistemas de triturado de material descritos en esta tabla suelen ser sistemas industriales robustos de gran potencia y para producciones elevadas.

**TABLA IV.**  
**Análisis de competencia en trituradoras.**

Producto/ Características	Tritotutto 4 árboles 2566 [32]	Hammer Crusher PC 300x400 [47]	Tritotutto mono-árbol MR 17-40 [48]
<b>Material procesado</b>	Materiales no ferrosos	Minerales y materiales resistencia < 320 MPa	Residuos de baja y alta resistencia
<b>Rev./min</b>	25	11	95
<b>Potencia transmitida</b>	7,5 HP	-	10 HP
<b>Producción</b>	80 – 150 kg / hora	3 – 8 ton / hora	80 - 150 kg / hora
<b>Equipamiento de seguridad</b>	Parada de emergencia, contacto de cierre de tolva	-	Parada de emergencia, sistema inversión cajón
<b>Número de fresas por árbol</b>	13	-	12

Ya obtenidas las métricas, las necesidades especificadas y hecho un análisis de competencia se procede a realizar un análisis de casa de la calidad, el cual relaciona las necesidades de los usuarios con los requerimientos de funcionalidad y la oferta en el mercado, indicando los aspectos a prestar más detalle en el proceso de diseño resumiéndolo en las especificaciones preliminares del producto a diseñar. El diagrama de casa de calidad se puede visualizar con detalle en el Anexo A.

Dentro de los resultados de este análisis se encuentra que en la *confrontación entre métricas* se presentan controversias entre el tiempo de operación y el sonido, pues a menor tiempo que es lo que se desea muy probablemente el sonido aumente, igual entre velocidad de salida del producto y la temperatura del sistema, a mayor velocidad habrá más fricción y se puede calentar más el sistema.

Por otro lado, en *las comparaciones de las necesidades con las métricas* se ve que entre las necesidades críticas se encuentran la seguridad, velocidad de transformación de plástico, que sea semiautomático y de fácil mantenimiento pues poseen más de una métrica relacionada con ellos. La métrica que obtuvo mayor peso frente a las demás es la del rango de temperatura de trabajo con un 12% de peso relativo frente a las demás, asegurando ser una especificación crucial para el proceso de diseño y desarrollo del producto; las métricas de potencia eléctrica consumida, tiempo de mantenimiento y distancia entre el usuario y zonas de riesgo tienen un peso de 10% frente a las demás, lo que las vuelve métricas de importancia secundaria y por ende es necesario tenerlas presente en el diseño.

Las especificaciones preliminares de diseño se demarcán en la TABLA V en conjunto con la importancia relativa de cada métrica como resultado del análisis de la QFD.

**TABLA V.**  
**Resumen de especificaciones preliminares.**

Métrica	Rango	Importancia
Número de operaciones para el manejo	< 25 operaciones	9%
Número de partes	< 200 partes	7%
Peso de residuos en el proceso	< 500 g	7%
Tiempo de transformación de 100 g de plástico	< 2 h	9%
Potencia eléctrica consumida	< 10 kW/h	10%
Distancia segura del dispositivo	> 15 cm	10%
Altura del producto	< 60 cm	6%
Ancho del producto	< 100 cm	6%
Peso del producto	< 2 kg	4%
Nivel de sonido	< 85 dB	1%
Rango de temperatura de trabajo	200 – 300 °C	12%

Tabla V. (Continuación).

Tiempo de instalación	< 2 h	8%
Tiempo de mantenimiento	< 3 h	10%
Días de trabajo antes de una falla	60 días	6%

Una vez realizado el proceso de la definición de especificaciones técnicas se realiza la descomposición funcional de las tareas que debe ejecutar el producto en la Fig. 17, para esto se utiliza el diagrama de caja transparente que relaciona la funcionalidad del concepto de diseño.

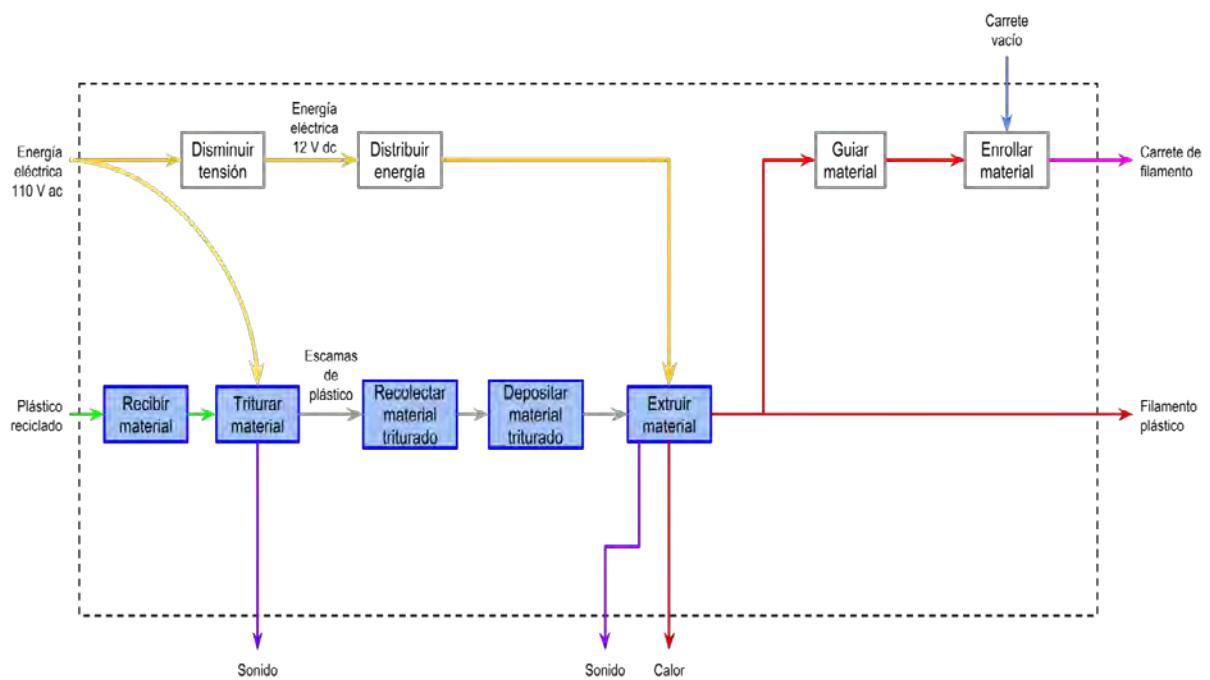
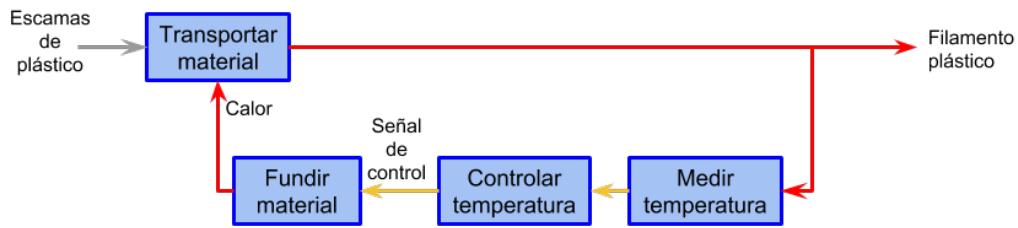


Fig. 17. Diagrama de caja transparente de funciones.

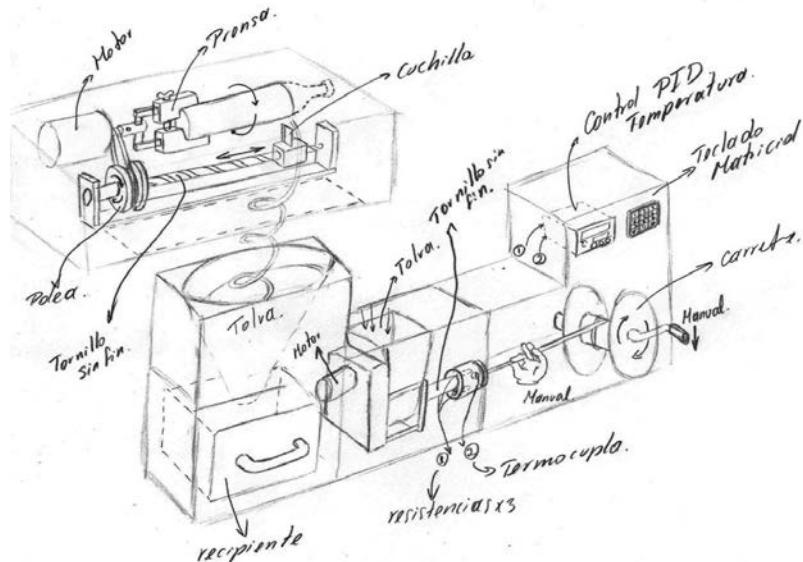
La función de “Extruir material” tiene inmersa en ella un lazo de control de temperatura con las siguientes subfunciones.



**Fig. 18. Diagrama de caja transparente subfunción de extrusión.**

En la Fig. 18 se puede observar las funciones de ruta crítica con recuadros de color azul, estas son las funciones generales estipuladas para poder transformar materiales plásticos a filamento extruido, este diagrama incluye un modo de entrega de filamento y otro de entrega de carrete ya armado.

Ya especificadas las funciones que tendrá el dispositivo se realiza la *generación de conceptos*; se dibujan los primeros bocetos que integran las necesidades expuestas por los usuarios con las funcionalidades planteadas en la caja transparente. En las Fig. 19, 20, 21 y 22, se muestran cinco de los bocetos generados como alternativas de solución.



**Fig. 19. Concepto de diseño 1.**

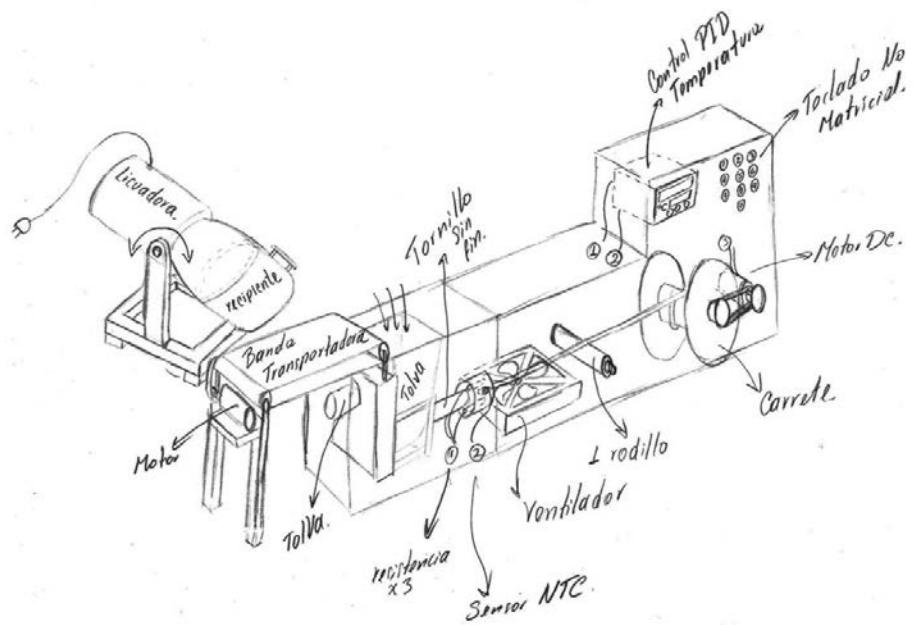


Fig. 20. Concepto de diseño 2.

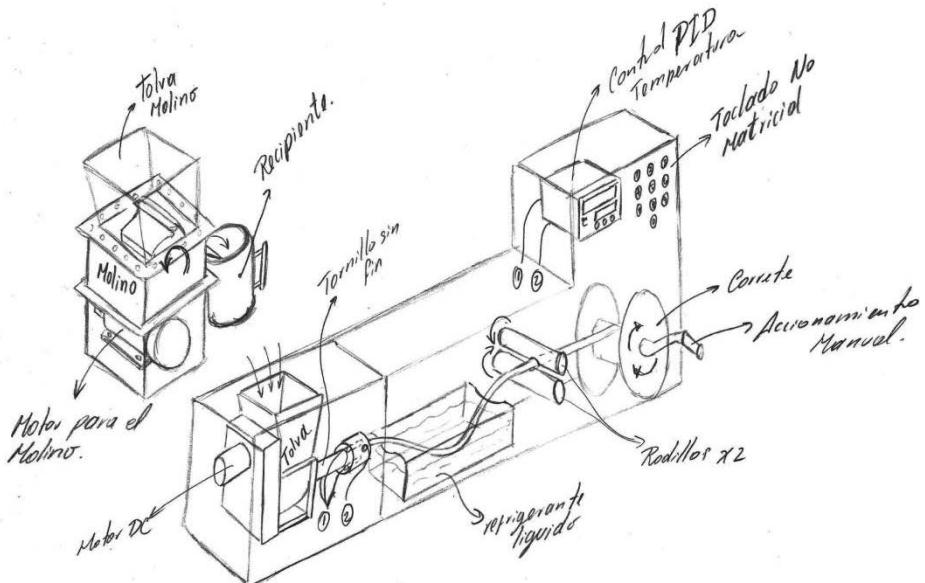


Fig. 21. Concepto de diseño 3.

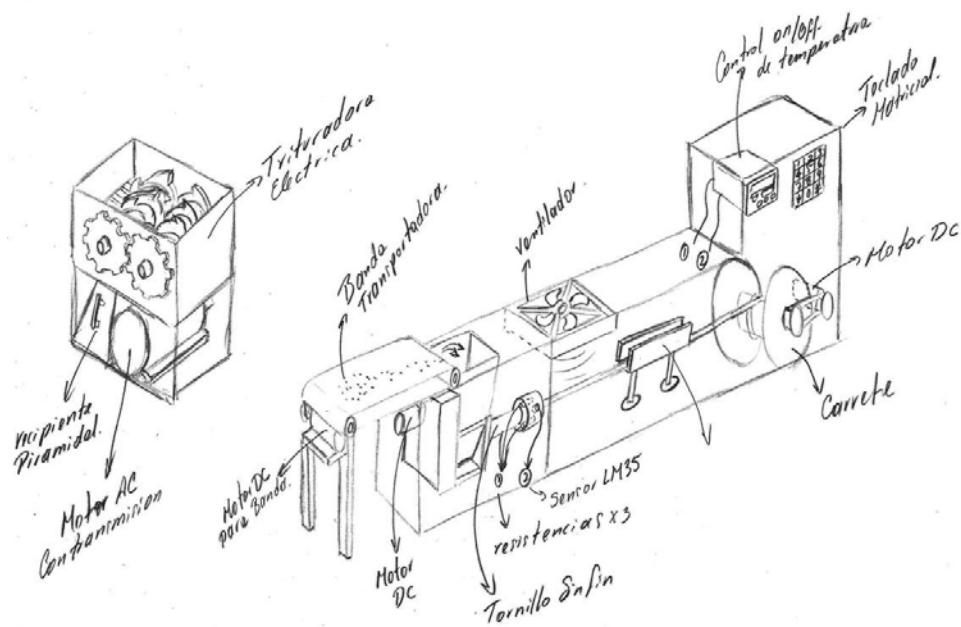


Fig. 22. Concepto de diseño 4.

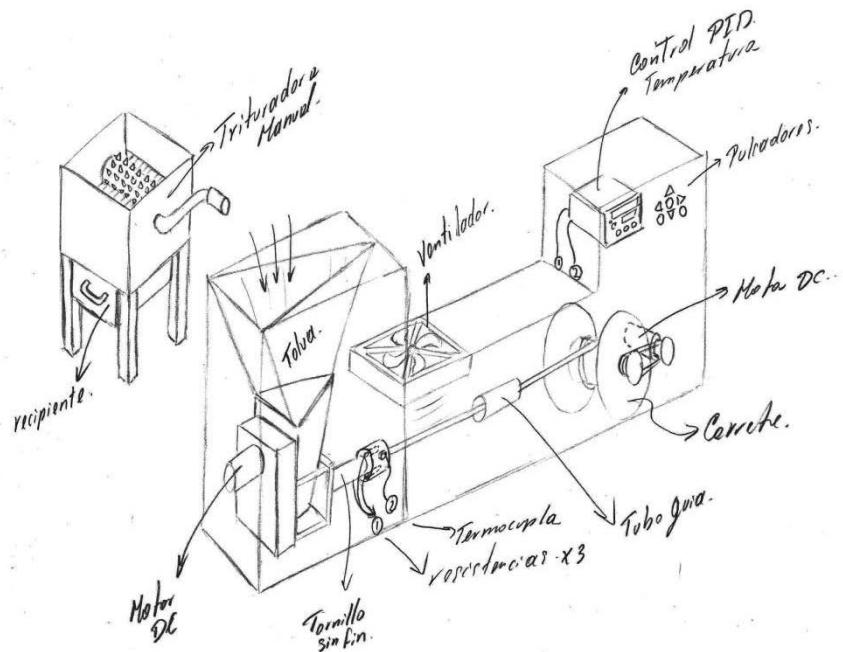


Fig. 23. Concepto de diseño 5.

Para la selección de una alternativa y su posible mejoramiento se utilizó la técnica de iteraciones de las *matrices de selección de conceptos*, para esto es necesario tener un referente con el cual comparar los criterios de selección, el modelo que se utiliza es la Filabot (Fig. 3), uno de los productos competidores en el mercado.

La matriz de la primera iteración se presenta en la TABLA VI, los signos (+) en la matriz implica que el concepto puede superar las especificaciones del referente, los signos (-) implican que no los supera. De esta primera iteración el concepto número 5 es aquel que sale más provechoso, sin embargo, se pueden combinar los conceptos 1 y 4 debido a su respuesta homogénea, buscando así que se complementen y generando dos nuevos conceptos con potencial de éxito.

**TABLA VI.**

CRITERIOS DE SELECCIÓN	VARIANTES DE CONCEPTOS					REF	
	1	2	3	4	5		
Debe recibir botellas de varios tamaños	-	-	(+)	(+)	0	0	A
Debe ser silencioso durante el proceso	(+)	-	-	0	(+)	0	A
Debe ocupar poco espacio	(+)	(+)	-	0	0	0	A
Debe ser Automatico	0	0	0	0	-	0	B
Debe ser de facil mantenimiento	(+)	-	-	-	(+)	0	B
Debe ser seguro para el operario	-	-	0	(+)	(+)	0	C
	Positivo	3	1	1	2	3	
	Iguales	1	1	2	3	2	
	Negativo	2	4	3	1	1	
	Total	1	-3	-1	1	2	
	Orden	2	5	4	3	1	
	¿Continuar?	comb	no	comb	comb	si	

Con esto se obtienen los siguientes dos conceptos (Fig. 24, Fig. 25), que son las combinaciones entre conceptos anteriores.

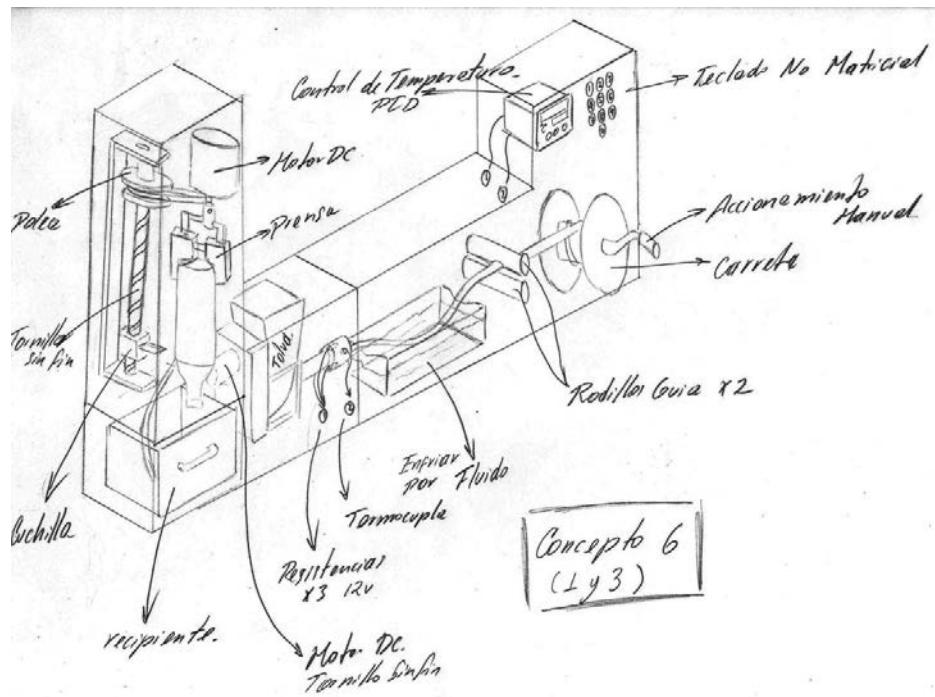


Fig. 24. Concepto de diseño 6.

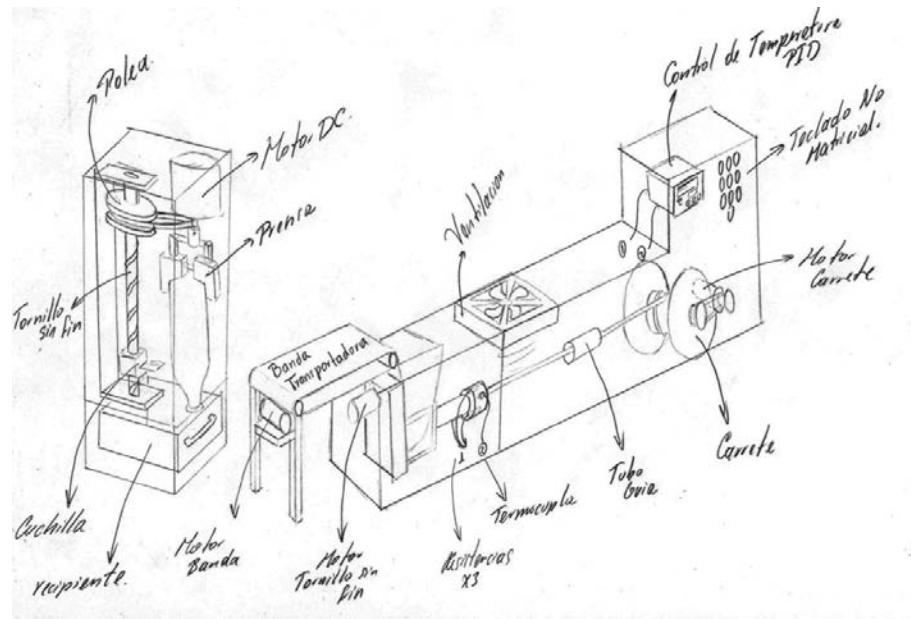


Fig. 25. Concepto de diseño 7.

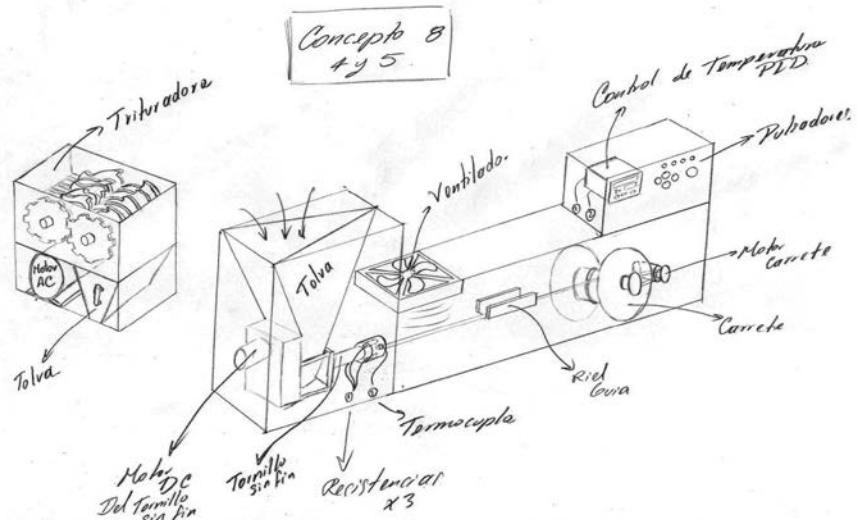
Ahora se hace la iteración con los modelos que obtuvieron un puntaje mayor a 0 en la comparación 1, además se usan las combinaciones entre los modelos 1:3 formando el modelo 6 y los modelos 1:4 formando el modelo 7

**TABLA VII.**  
**Matriz 2 de iteración.**

CRITERIOS DE SELECCIÓN	ITERACIÓN 2						REF
	1	4	5	6 Comb (1,3)	7 Comb (1,4)	FUNCIONAL	
Debe recibir botellas de varios tamaños	-	(+)	0	(+)	(+)	0	A
Debe ser silencioso durante el proceso	(+)	0	(+)	(+)	(+)		A
Debe ocupar poco espacio	(+)	0	0	(+)	(+)		A
Debe ser Automatico	0	0	-	0	0		B
Debe ser de facil mantenimiento	(+)	-	(+)	(+)	(+)		B
Debe ser seguro para el operario	-	(+)	(+)	0	(+)		C
	Positivo	3	2	3	4	5	
	Iguales	1	3	2	2	1	
	Negativo	2	1	1	0	0	
	Total	1	1	2	4	5	
	Orden	4	5	3	2	1	
	¿Continuar?	si	comb	comb	si	si	

Por la valoración con el referente ahora la propuesta 7 fue la que mejor desempeño obtuvo, esta continua para una próxima iteración, igualmente la combinación entre 1,3 que obtuvo un puntaje significante.

En la tercera iteración se hace una revisión entre el proceso 1 que obtuvo poca valoración en la iteración 2 y el concepto 5 que ha tenido calificaciones interesantes en los procesos anteriores; de nuevo entra la combinación entre el modelo 1,3 y el 1,4, adicionalmente se presenta una nueva combinación entre los conceptos 4,5 (Fig. 26), variando un poco los elementos para estudiar las posibilidades de una nueva combinación.



**Fig. 26. Concepto de diseño 8.**

**TABLA VIII.**  
**Matriz 3 de iteración.**

CRITERIOS DE SELECCIÓN	ITERACIÓN 3					REF	
	VARIANTES DE CONCEPTOS						
	1	5	6 Comb (1,3)	7 Comb (1,4)	8 Comb (4,5)		
Debe recibir botellas de varios	-	0	(+)	(+)	(+)	0	
Debe ser silencioso durante el	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	0	
Debe ocupar poco espacio	(+)	0	(+)	(+)	0	0	
Debe ser Automatico	0	-	0	0	0	0	
Debe ser de facil mantenimiento	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	0	
Debe ser seguro para el operario	-	(+)	0	(+)	(+)	0	
Positivo	3	3	4	5	4		
Iguales	1	2	2	1	2		
Negativo	2	1	0	0	0		
Total	1	2	4	5	4		
Orden	5	4	3	1	2		
¿Continuar?	no	si	si	comb	comb		
¿Continuar?	no	si	si	comb	comb		

La última iteración se hace ahora con la propuesta ganadora de las 3 iteraciones anteriores y las combinaciones de las 5 propuestas principales, inclusive se hacen combinaciones de las combinaciones como es el caso del concepto 9 que une tres conceptos básicos de los que primero se plantearon.

**TABLA IX.**  
**Matriz 4 de iteración.**

CRITERIOS DE SELECCIÓN	ITERACIÓN 4					REF	
	VARIANTES DE CONCEPTOS						
	5	6 Comb (1,3)	7 Comb (1,4)	8 Comb (4,5)	9 Comb (7,8)		
Debe recibir botellas de varios	0	(+)	(+)	(+)	(+)	0	
Debe ser silencioso durante el	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	0	
Debe ocupar poco espacio	0	(+)	(+)	0	(+)	0	
Debe ser Automatico	-	0	0	0	0	0	
Debe ser de facil mantenimiento	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	0	
Debe ser seguro para el operario	(+)	0	(+)	(+)	(+)	0	
Positivo	3	4	5	4	5		
Iguales	2	2	1	2	1		
Negativo	1	0	0	0	0		
Total	2	4	5	4	5		
Orden	5	3	2	4	1		
¿Continuar?	no	si	si	si	si		
¿Continuar?	no	si	si	si	si		

Para esta iteración se presentan dos ganadores principales, la combinación 9 y la 7. El modelo que se piensa diseñar y seguir desarrollando es la combinación 9 en la Fig. 27 que representa una modificación entre los conceptos 1, 4, 5.

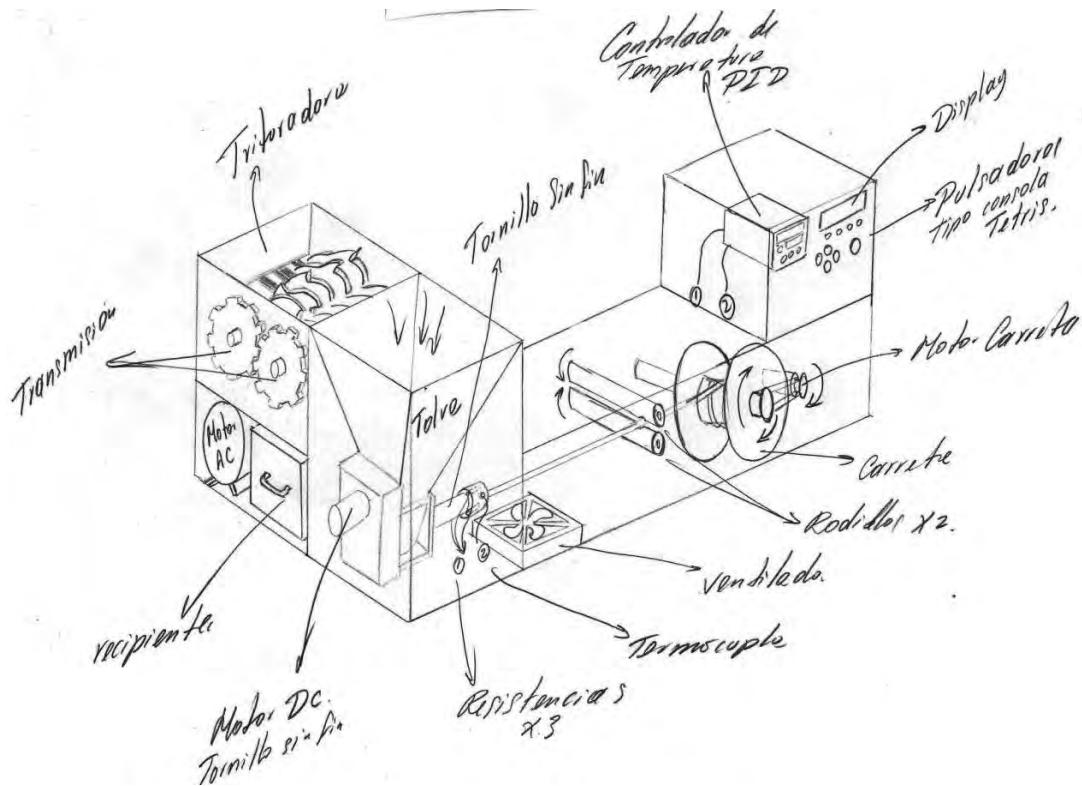


Fig. 27. Concepto de diseño 9.

De este análisis se logra identificar desde la primera iteración que los 5 modelos inicialmente propuestos no lograban competir contra el referente de manera eficiente, logrando bajos valores en la puntuación, al final, la combinación entre conceptos, especialmente la de tres conceptos logra llevarse la mayor atención y es la que potencialmente puede competir con las demás alternativas en el mercado y es la escogida como objeto a diseñar.

## 6.2 DISEÑO A NIVEL DE SISTEMAS

Para esta fase de diseño básico a nivel de sistemas del producto se define el tipo de arquitectura que poseerá el dispositivo ya que esto define en amplia medida el proceso de ensamblaje, mantenimiento y corrección de fallas que el producto tendrá en su implementación y puesta en marcha y es una de las especificaciones de diseño que mayor importancia relativa tienen. Primero se escoge para las funciones indicadas en la caja transparente realizada anteriormente un concepto o varios para suplir cada funcionalidad (los conceptos a los que se hace referencia son conceptos básicos y que han podido cambiar en el transcurso del proceso, más adelante en el diseño detallado se especifican técnicamente), en la Fig. 28 se

muestra la relación entre función - concepto identificando una tendencia hacia un tipo de arquitectura modular de producto (no del todo).

FUNCIONES	RELACIONES	CONCEPTO SELECCIONADO
Recibir material	→	Tolva
Triturar material	→	Cuchiillas de metal
Recolectar material triturado	→	Recipiente - Cubo
Depositar material triturado	→	Tornillo sin fin
Extruir material	→	Motor DC 1
Calentar material	→	Boquilla de 1.75 mm
Controlar temperatura	→	Resistencia 12V
Medir temperatura	→	Controlador PID regulador de Temperatura
Guiar material	→	Termocupla
Enrollar material	→	Guia disminuye esfuerzos
Disminuir tensión eléctrica	→	Motor DC 2
Distribuir energía eléctrica	→	Fuente regulada de voltaje

**Fig. 28. Relación función - concepto.**

Una vez realizado esto se definen los sistemas que conforman el producto a diseñar (Fig. 29).



**Fig. 29. Subsistemas del dispositivo.**

Retomando el trabajo realizado con la QFD (Casa de calidades) y el análisis de

funciones-conceptos se realiza ahora un análisis de QFD más detallado para cada subsistema del producto, denominado QFD II, esto con la finalidad de encontrar la importancia relativa de cada concepto que cubren las funcionalidades en comparación a todo el dispositivo que se diseña y al final realizar un *análisis costo-valor* ligero de los mismos con el fin de verificar las inversiones que se realizarán y su importancia general en el funcionamiento del dispositivo.

**TABLA X.**  
**QFD Fase II. Análisis de calidad por sistemas.**

Engineering Metrics	Phase I Relative Weights	Part Characteristics									
		Extrusora	Tolva Extrusora	Tolva Trituradora	Carcasa Extrusora	Carcasa Trituradora	Motor	Cuchillas	Controlador de temperatura	Fuente de poder	Enrolladora
Nivel de sonido	1%	3					9	3	1		3
Potencia eléctrica consumida	10%	9					9		3	9	3
Número de operaciones para manejo	9%	1				1			9		3
Tiempo de transformación de plástico	9%	9					3	9			9
Tiempo de instalación	8%	1			1	1	1	3			1
Tiempo de mantenimiento	10%	3			3	3				1	1
Distancia entre usuario y zonas de riesgo	10%	9			3	3		9			1
Rango de temperatura de trabajo	12%	9	1	1	3				9		
Número de piezas de la máquina	7%	3			1	1		3			3
Dimensiones del producto	6%	1	1	1	3	3	9	1		1	3
Peso del producto	4%	1		1	3	1	9			1	3
Días de trabajo antes de una falla	6%	3					1	3	1		
Peso de residuos en el proceso	7%				3		3				
	Raw score	26% 4,7	1% 0,2	1% 0,2	8% 1,4	7% 1,3	13% 2,4	15% 2,7	12% 2,3	6% 1,1	12% 2,2
	Relative Weight										

Teniendo en cuenta la ponderación de las métricas del sistema, se implementa la QFD II para determinar la importancia de los elementos más característicos de la máquina, es decir, de los subsistemas tanto de triturado como de extrusión y enrollado; por lo cual, es necesario hacer un cruce y evaluación de las métricas generales con las que debe cumplir el dispositivo con los elementos del mismo, de este análisis se obtiene como resultado que los elementos que poseen mayor relación con las métricas para el diseño en el prototipo son:

- Extrusor con 26%.

- Cuchillas de la trituradora con 15%.
- Motor trifásico con 13%.

De esta matriz se observa la importancia que posee el extrusor dentro de todo el producto y la fuerte relación con la mayoría de las especificaciones de diseño (métricas de ingeniería) por lo que resulta indispensable una buena justificación y análisis de selección de este artefacto. Las iteraciones entre métricas y partes de los subsistemas y las iteraciones entre métricas generales y métricas de cada subsistema se encuentran en el Anexo B.

Se realizó una cotización de primera mano sobre cada uno de los macro elementos relevantes que se implementaran en la máquina y se ponderaron según el porcentaje de su costo con respecto al valor total de la cotización, se realiza la relación costo/importancia de cada uno de esos elementos para determinar si se está haciendo la suficiente inversión de dinero o por el contrario, se está invirtiendo mucho para su finalidad en el sistema global. Esta relación la podemos cuantificar en la TABLA XI.

**TABLA XI.**  
**Relación costo - valor de los componentes.**

Part #	Part	Part Cost USD	Relative Worth * * From QFD Phase II	Part Relative Cost	Cost / Worth
1	Extrusora	\$300,00	26%	38%	1,47
2	Tolva Extrusora	\$9,17	1%	1%	1,18
3	Tolva Trituradora	\$3,67	1%	0%	0,38
4	Carcasa Extrusora	\$20,42	8%	3%	0,33
5	Carcasa Trituradora	\$42,35	7%	5%	0,76
6	Motor	\$156,71	13%	20%	1,54
7	Cuchillas	\$158,83	15%	20%	1,36
8	Controlador de temperatura	\$58,36	12%	7%	0,60
12	Fuente de poder	\$20,82	6%	3%	0,43
13	Enrolladora	\$29,35	12%	4%	0,30
<b>Total Part Cost</b>		<b>\$799,68</b>	100%	100%	

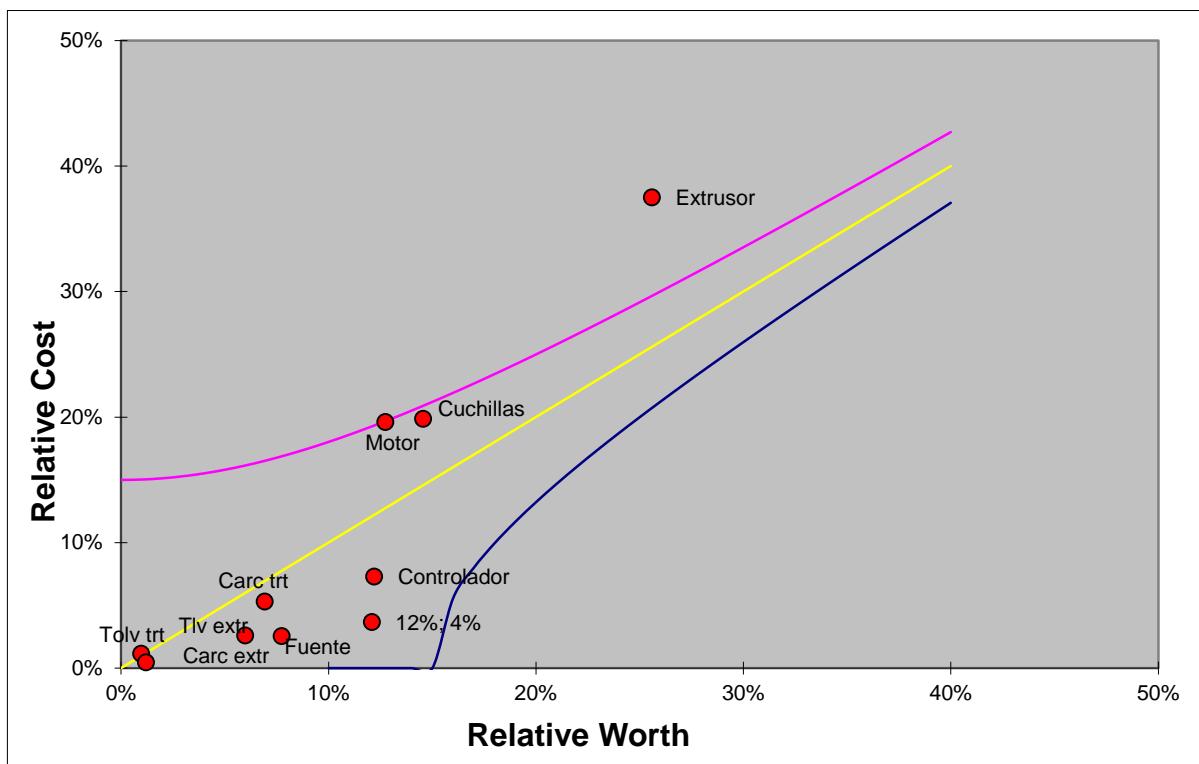
El sistema total tendrá un costo alrededor de \$799,68 USD (\$ 6.020.289), en donde los elementos que tienen un mayor porcentaje de inversión son:

- Extrusora \$300 USD, siendo el 38% de la inversión total.
- Cuchillas de la trituradora \$158.83 USD, para un 20% de la inversión total.
- Motor de la trituradora \$156,71 USD, para un 20% de la inversión total

Dando como resultado que la extrusora, la cual debe estar compuesta por un

motor reductor, tornillo sin fin, parte de la tolva y la camisa calefactora del tornillo, es el elemento más costoso y también el más importante por los resultados de la QFD I, este elemento tiene una relación directa con el rango de temperatura, la cual es la métrica de mayor importancia en el diseño, con una relación costo/importancia de 1.30. La inversión a este elemento del producto es elevada, sin embargo, dentro del país es posible encontrar extrusores más económicos que cumplen con la misma funcionalidad siendo alternativas alcanzables.

Para ver de manera gráfica los resultados de la tabla, se muestra en la Fig. 29 un diagrama indicando la relación del porcentaje de inversión con respecto a su importancia para cada uno de los elementos más relevantes del sistema global, aquellas partes que se encuentran dentro de la campana de dispersión tienen una relación costo – valor aceptable.



**Fig. 30. Diagrama costo - valor de QFD.**

Dentro de los componentes que se encuentran fuera de la campana de distribución está el extrusor de filamento, pues gracias a las matrices QFD se descubre que su importancia es relativamente grande y es conseguido a precios elevados, sin embargo su desviación no es abismal, por lo que no se asegura que sea una mala decisión su posible compra a ese valor no obstante, sería pertinente conseguir el sistema de extrusión con un valor que no supere los 240 USD de

manera local para que su relación costo/importancia no sobrepase el margen estipulado.

### 6.3 DISEÑO DETALLADO

El diseño detallado se realiza de manera integral el proceso de diseño mecánico, electrónico y computacional requerido.

#### 6.3.1 Sistema de triturado

Este sistema es el encargado de transformar los elementos plásticos en pequeños trozos o escamas que puedan depositarse en el sistema de extrusión.

Para la trituradora se usa como guía el diseño presentado por la compañía Precious Plastic nombrada en la sección 4 (Antecedentes). El primer paso es calcular el torque y potencia necesario que debe poseer el motor a utilizar para el sistema, para hallar estos valores es necesario inicialmente definir la fuerza que ejercerán los materiales de corte (cuchillas de corte). En la Fig. 30 se muestra la forma de las cuchillas y la fuerza crítica a la que estará sometida justo en la punta  $F_D$ , la distancia radial desde el punto de aplicación del torque  $M_D$  y la fuerza es de 60 mm.

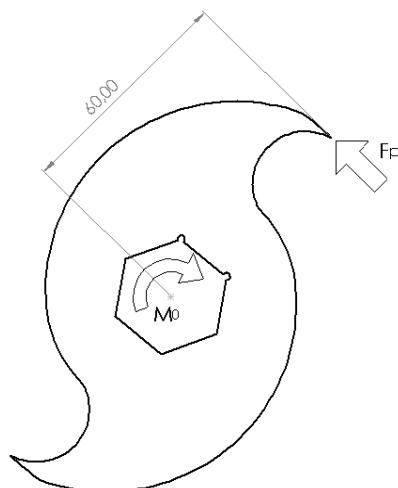


Fig. 31. Diagrama de cuerpo libre de cuchilla de triturado.

Para poder lograr que la trituradora desgarre el material plástico es necesario que la fuerza de contacto entre la punta de cuchilla ( $F$ ) y el área transversal ( $A$ ) del objeto a romper sea igual o mayor al esfuerzo cortante (shear stress  $\tau_{max}$ ) del polímero en caso, el valor del esfuerzo cortante tiende a ser el 50% del valor de resistencia a la tracción (límite elástico). El valor de resistencia a la tracción se define con la ecuación  $\sigma_{max} = F/A$  [49] y es un valor único para cada material. En la tabla XII se presentan los valores de resistencia a la tracción y esfuerzo cortante para los polímeros con los que se desea trabajar (PET, PP, PS y HDPE).

**TABLA XII.**  
**Datos resistencia a la tracción y esfuerzo cortante**

Material	PET [41]	PP [28]	PS [42]	HDPE [27]
$\sigma_{max}$	50 MPa	34,65 MPa	35,05 MPa	28,6 MPa
$\tau_{max}$	25 MPa	17,33 MPa	17,53 MPa	14,3 MPa

Para la ejecución de los cálculos se escoge el valor mayor de  $\tau_{max}$  debido a que este sería el material que requiere de un mayor esfuerzo para corte, en este caso es el PET con un  $\tau_{max} = 25 \text{ MPa}$ . El valor del área transversal de corte se define a  $300 \text{ mm}^2$  considerando que los recipientes a triturar son en su mayoría vasos y envases de pared muy delgada cercano a los 2 mm y de circunferencia de 15 mm. De la ecuación de  $\sigma_{max}$  se despeja el valor de la fuerza  $F$  y se obtiene

$$F = A \tau_{max} \quad [50]$$

$$F = (300 \text{ mm}^2)(25 \text{ MPa}) = 7500 \text{ N}$$

El momento en un sistema es la multiplicación de la fuerza ejercida ( $F$ ) por la distancia desde su punto de aplicación ( $r$ ) [48]. La distancia radial en la cuchilla desde el punto de aplicación del momento y la fuerza es de 60 mm, por lo que el torque o momento máximo requerido es de  $331,9 \text{ lb - f}$ .

$$M = F r \quad [48]$$

$$M = (7500 \text{ N})(60 \text{ mm}) = 450 \text{ Nm} = 331,9 \text{ lb - f}$$

Para el funcionamiento de la trituradora se desea una velocidad nominal de 30 rpm con el fin de que el impacto generado por la fuerza de corte no produzca un momento demasiado grande en las partículas y salgan con gran fuerza hacia la persona que opera el dispositivo. Para hallar la potencia del motor se utiliza la siguiente ecuación que relaciona la velocidad y torque con la potencia. El valor

5252 hace referencia a un valor de conversión de unidades.

$$Potencia (hp) = \frac{Torque (libra - pie) * Velocidad motor (RPM)}{5252} \quad [49]$$

$$Potencia (hp) = \frac{331,9 \text{ lb - f} * 30 \text{ rpm}}{5252} = 1,9 \text{ hp}$$

Definido esto el valor de potencia de salida del eje debe ser de 2 hp, proporcionar una velocidad de 30 rpm y un torque de 332 lb-f o 450 Nm.

Para calcular la potencia eléctrica requerida para el trabajo del dispositivo teniendo en cuenta el desgaste mecánico se utiliza la siguiente fórmula.

$$Pot_{electrica} = \frac{Pot_{consumida} * FS}{\eta_{fuente} \prod \eta_{transmitida}} \quad [50]$$

Donde,

- $Pot_{consumida}$ , se refiere a la potencia calculada a la salida del eje, en este caso es de 1,9 hp.
- $FS$ , el cual es un factor de servicio y se recomienda  $FS > 1$ , se utilizará un valor de 1.5.
- $\eta_{fuente}$  es la eficiencia de la fuente, definiremos al 98%.
- $\eta_{transmitida}$  es la eficiencia de transmisión y depende del tipo de elemento del sistema. Para engranajes es de 90% y para ejes es de 99% debido a la fricción en los cojinetes y elasticidad torsional. [50]

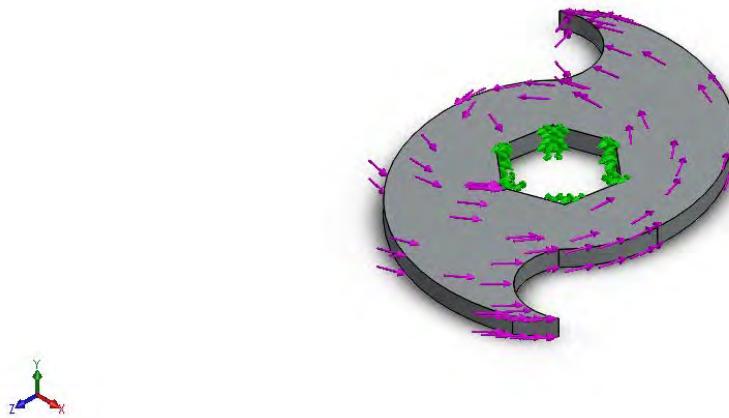
$$Pot_{electrica} = \frac{1,9 \text{ hp} * 1,5}{0,98 * (0,90 * 0,99)} = 3,2 \text{ hp} = 2,23 \text{ kW}$$

Por lo que para un funcionamiento más confiable se debe recurrir a un motor cercano a los 2 kW que supere el desgaste mecánico generado por las cajas reductoras y la transmisión por ejes.

Ya realizado esto y con el valor de grosor de la cuchilla de 4,5 mm se realiza un estudio de elementos finitos a una de las cuchillas con el momento hallado y la fuerza máxima que debe producir para verificar su comportamiento y justificar un buen diseño.

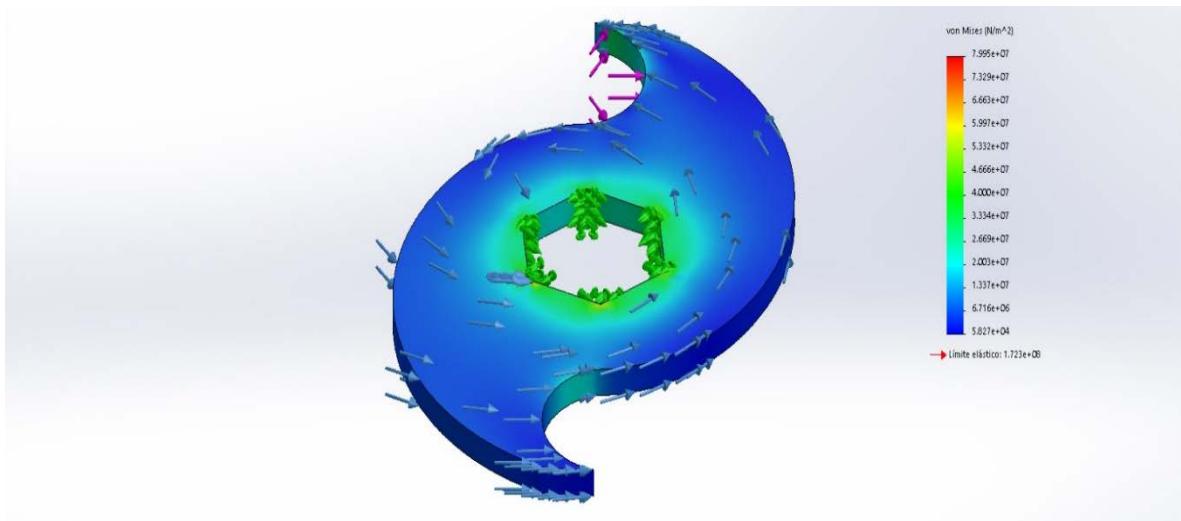
Primero se realiza un estudio estático para la cuchilla en la cual se aplica una fuerza en la sección cóncava de la punta (es quien realmente realiza el corte), con

el valor obtenido de 7500 N, igualmente se aplica el torque de 450 Nm que le transmite el eje por el motor, con uniones rígidas en la zona de contacto hexagonal entre el eje y la cuchilla (Fig. 32).

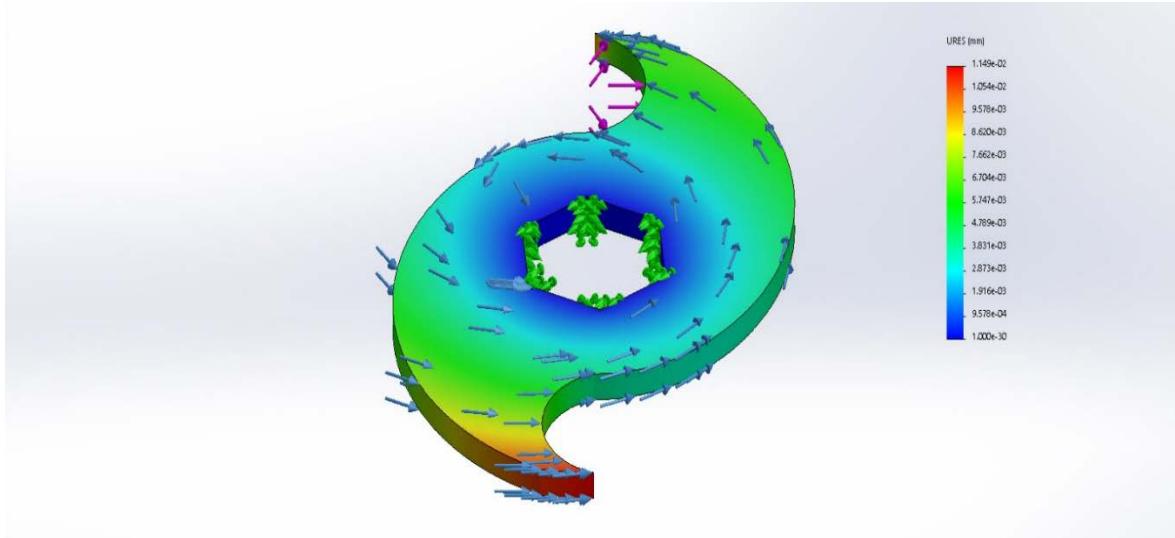


**Fig. 32. Esquema de fuerzas y reacciones en la cuchilla.**

Los resultados de este análisis se presentan en la Fig. 33 y 34. Entre los resultados de esfuerzos y deformaciones se observa que es justo en la punta de la cuchilla donde se presenta el mayor esfuerzo con la mayor deformación (0.01 mm) y por ende donde podría fallar la pieza, sin embargo, con las fuerzas aplicadas no se logra alcanzar el límite a la tracción del material de la cuchilla 172 MPa (Acero Inoxidable).



**Fig. 33. Resultado de esfuerzos para la cuchilla.**



**Fig. 34. Resultado de deformaciones en la cuchilla.**

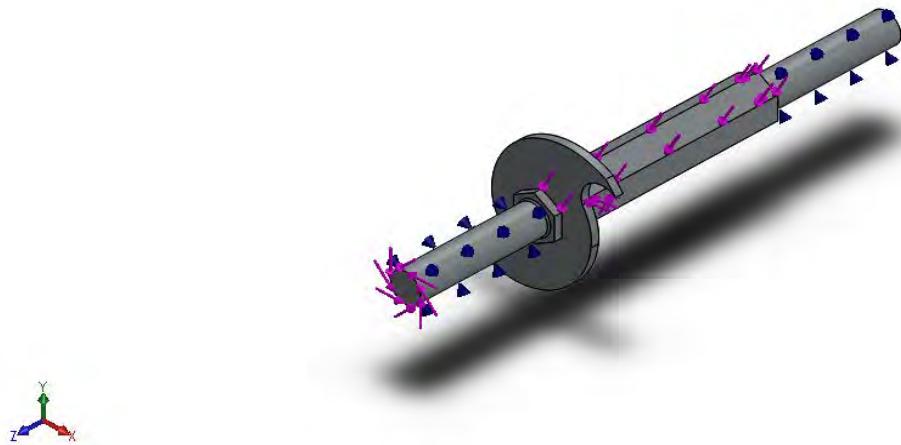
En cuanto a los resultados de factor de seguridad para el análisis, el valor mínimo de  $fs$  es de 2.15, infiriendo con esto un diseño confiable al tener un valor mayor a 1.0.



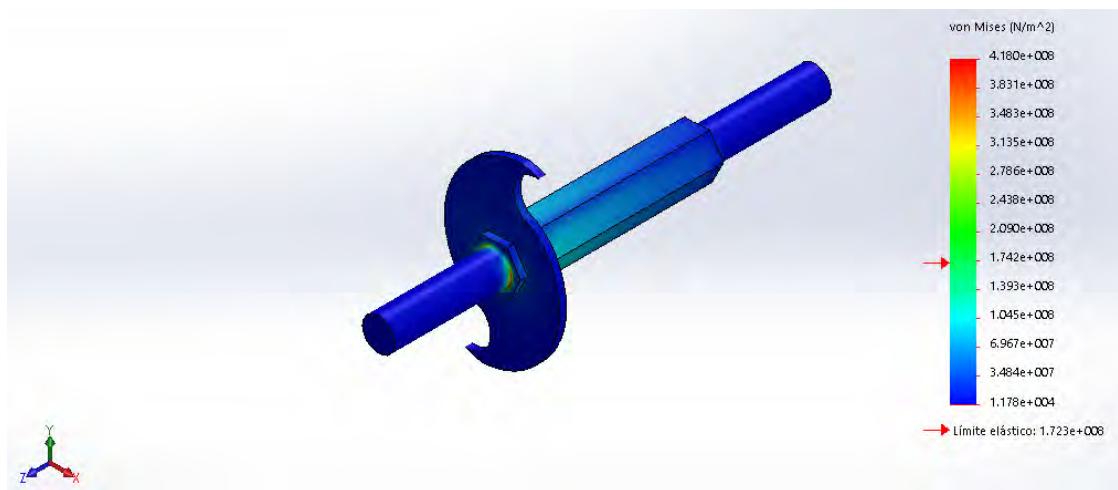
**Fig. 35. Resultado de factor de seguridad confiable para la cuchilla.**

Se realiza un análisis dinámico del sistema eje-cuchilla, las cargas definidas se presentan en la zona cóncava de la cuchilla, el peso de las cuchillas distribuido en el eje y el torque que propaga el motor al eje, las sujeciones aplicadas se posicionan en los extremos cilíndricos del eje como rodamientos (Fig. 36). En este

estudio de deformación se prevé un fallo en la discontinuidad entre el eje hexagonal y la sección de diámetro disminuido pues supera el límite elástico, sin embargo, el resto de la estructura no parece sufrir gran esfuerzo (Fig. 37).



**Fig. 36. Cargas y sujeciones en el sistema eje-cuchilla.**



**Fig. 37. Resultados de esfuerzos en sistema eje-cuchilla.**

Dentro de los recursos adquiridos para el desarrollo del proyecto se tiene un motor trifásico con una velocidad de salida de 163 rpm, debido a que se requiere de una salida cercana a 30 rpm, se debe adquirir un reductor de velocidad de relación 5:1, lo que otorgará 32 rpm aproximadas a su salida siendo un valor aceptable. Para acoplar el motor con el reductor y el eje de la trituradora se utiliza de una estructura adicional que soporte los tres elementos.

Para atender la necesidad de seguridad para quien lo opere y destacando el alto nivel de riesgo que representa el sistema de cuchillas de corte impulsado por el motor trifásico previamente descrito se diseña una tolva la cual asegurará al usuario y que este no tenga ningún tipo de contacto con las cuchillas separando la zona de acción del lugar de deposición de material plástico con una distancia de 24 cm, esta tolva no solo protege al usuario sino que además asegura que el material que sale disparado por el impacto de corte no golpee a la persona y no se quede dentro de los soportes de la misma gracias a la inclinación de paredes internas, aprovechando en mayor medida todo el material triturado.

Para la protección del dispositivo se diseña un sistema de control con lógica cableada a partir de un variador de velocidad que asegure un arranque suave y progresivo hasta que el motor alcance su valor de velocidad nominal además asegura el cambio de giro del sistema de cuchillas en el caso de posibles accidentes y/o atascos de material, dentro del sistema de control también se hace uso de un relé térmico que mide el nivel de corriente que pasa por él y se dispara en caso de presentarse sobre carga, como método de protección al usuario se utiliza un micro-switch que abre el sistema trifásico y por ende desactiva el motor en el caso que la tolva no se encuentre en su lugar y las cuchillas estén expuestas. El diagrama de lógica cableada diseñado se anexa al documento (Anexo E).

El diseño de la trituradora se presenta en la Fig. 38, los planos del mismo se encuentran en Anexo F.



**Fig. 38. Vista isométrica de trituradora.**

### 6.3.2 Sistema de extrusión

Basado en el análisis de competidores potenciales se toma la decisión de implementar un extrusor estándar, más exactamente el Felfil EVO (Fig. 39), el cual provee un filamento extruido que cumple el valor estándar de 1,75 mm de diámetro.

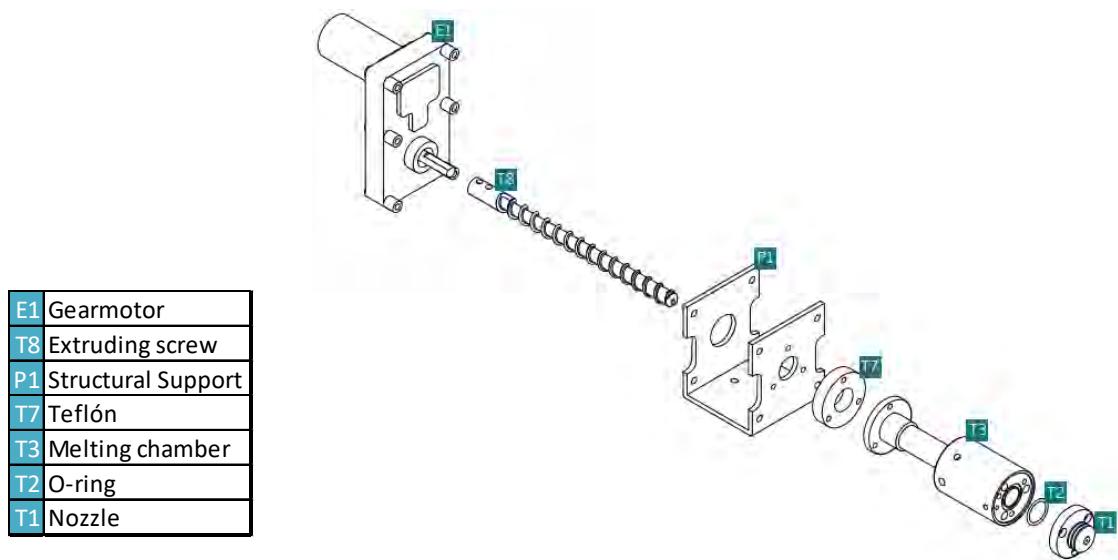


Fig. 39. Vista explosionada de Felfil. [51]

Un criterio de selección para el sistema de extrusión es encontrar un dispositivo que trabaje a temperatura de extrusión teórica de los materiales reciclado: PET a 245 °C, HDPE a 230 °C, PS a 220°C y PP a 230 °C, todos estos valores logran estar en el rango de temperaturas de trabajo del Felfil EVO (valores menores a 250 °C) [10].

El sistema de extrusión debe realizar el proceso de calentamiento y fundición de plástico, por lo que requiere variar la temperatura a niveles estándar, debido a esto se requiere de un sistema de control para alcanzar este objetivo y es necesario escoger el sensor, el actuador y aquel controlador para llevar a cabo el proceso.

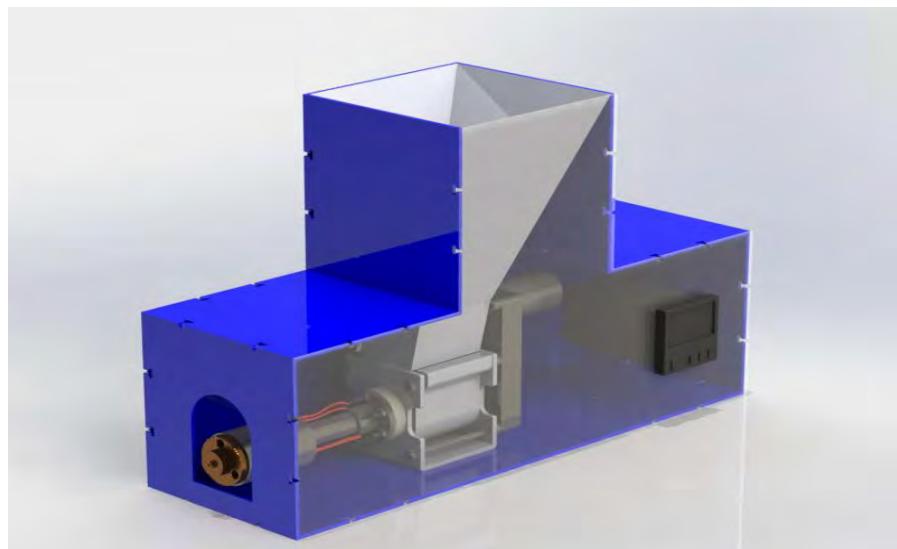
El sistema posee un juego de 3 resistencias de 12V / 3 A que tomarán el rol de actuador. El lazo de control diseñado se muestra en el Anexo C en un diagrama eléctrico.

Para el controlador se decide utilizar el Inkbird ITC100VH, el cual requiere una

alimentación AC de 100 - 240 V, soporta una amplia cantidad de termocuplas trabajando con rangos de temperatura entre -50 a 1300 °C, con una interfaz de interacción de usuario sencilla para la programación del valor estándar de temperatura, otras características relevantes es el tamaño del controlador y su peso que no representan consideraciones relevantes para el diseño formal del sistema de extrusión.

El sensor utilizado es una termocupla tipo K, debido a que el controlador trabaja especialmente con termopares y sensores resistivos, por la forma roscada que poseen estas termocuplas industriales en su junta caliente se utiliza por su facilidad y adecuada medición en la zona caliente del extrusor (camisa de calefacción); los rangos de trabajo de este sensor son de -270 a 1370 °C [52] siendo un rango tolerable para el funcionamiento normal del sistema de extrusión de plástico, gracias al controlador comercial la termocupla no requiere de un acondicionamiento de instrumentación adicional.

Ya realizada las conexiones respectivas se procede a diseñar la estructura externa del sistema de extrusión que tiene como función proteger al usuario de la zona de calor, además de que lleva consigo el diseño industrial formal referente a una ficha de tetris y localiza los componentes electrónicos aislándolos de la zona caliente del proceso, se diseña el modelo de la extrusora del Felfil y en base a esto, con ayuda de la herramienta Solidworks 2018, se realiza el esquema del contenedor de este sistema pensando en la sujeción de las piezas de la parte de control. Esta estructura se realiza en su mayoría en madera, la cual no le da mayor peso al sistema permitiéndole ser portable y sin complejidad de manejo haciendo referencia a algunas de las necesidades de los usuarios estipuladas inicialmente, una de sus caras se realiza con acrílico para permitirle al usuario visualizar que sucede en el interior y en caso de algún fallo tomar acciones correctivas y/o de mantenimiento. La imagen del diseño realizado en Solidworks se presenta en la Fig. 40, los planos de este sistema se adjuntan en el Anexo D.



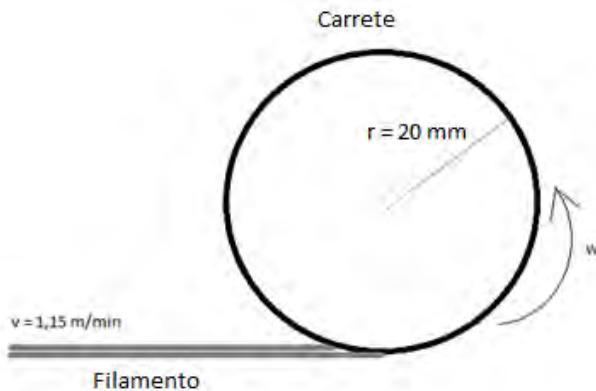
**Fig. 40. Vista isométrica del sistema de extrusión.**

### 6.3.3 Sistema de enrollado

Este sistema es el encargado de enrollar el filamento que sale del sistema de extrusión en carretes para su utilización directa en las impresoras 3D, el proceso de enrollado se efectúa en el carrete mientras se encuentra en rotación, a medida que este permanece girando el subsistema de movimiento lineal conduce un riel que direcciona el filamento de manera longitudinal por medio de todo el cuerpo del tubo del carrete.

Este sistema posee dos sub sistemas, por un lado se encuentra el sistema de movimiento rotacional continuo de carrete, este apartado consta de un eje torneado de aluminio que es el encargado de transmitir el movimiento rotacional, este eje de aluminio se une a un motor nema 17 por medio de un acople cilíndrico hecho en PLA, el movimiento del motor es controlado por medio del driver Pololu drv8825 el cual es escogido debido a su fácil manejo y un sistema de protección interno compuesto por diodos. El eje de aluminio está sostenido por un rodamiento posicionado en la pared de la estructura de este sistema. Para evitar el deslizamiento del carrete sobre el eje de aluminio se diseñan dos piezas con ayuda de la impresión 3D que funcionan como sujeción.

Para definir la velocidad de giro del eje de este subsistema es necesario realizar un análisis de cinemática básico. Considerando la velocidad de salida del filamento de extrusor como una velocidad lineal constante de 1,15 m/min [10] y suponiendo la velocidad del carrete como una velocidad constante.



**Fig. 41. Diagrama cinemático simplificado de funcionamiento.**

La velocidad tangencial en el punto de contacto entre el filamento y el carrete debe ser igual a la velocidad lineal que lleva el filamento para evitar que se detenga su continuidad en la extrusión y se rompa, de ser esto así y considerando la velocidad angular como constante el valor de esta se calcula como la velocidad lineal en aquel punto dividido entre el radio del carrete.

$$\omega = \frac{1,15 \text{ m/min}}{20 \text{ mm}} = 57,5 \text{ rad/min}$$

El valor de la velocidad angular constante del carrete debe ser de 57,5 rad/min, que es equivalente a 9,15 rpm.

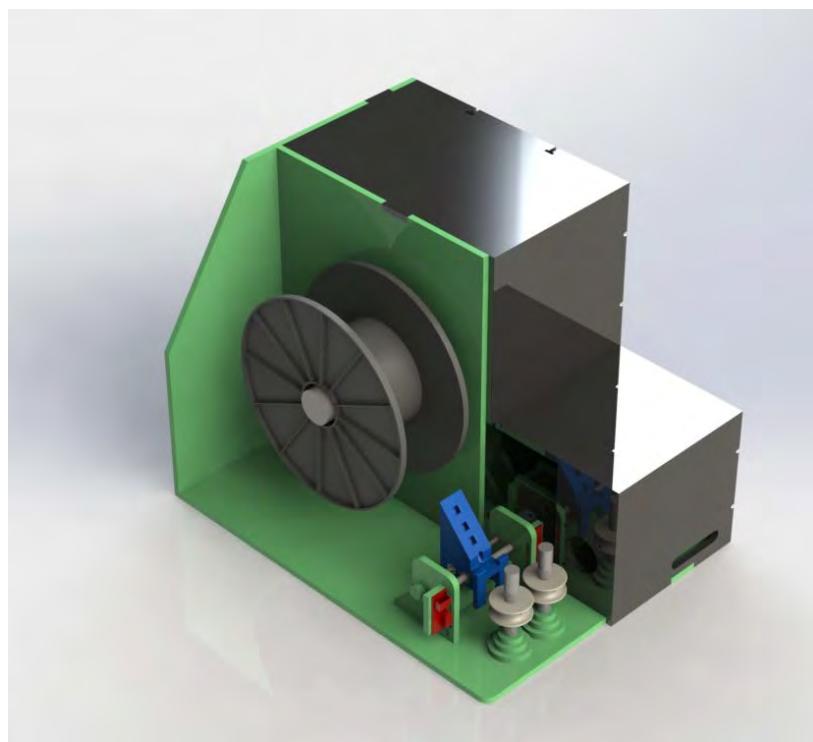
Con respecto al análisis anterior es necesario considerar que luego de que el carrete ha completado una vuelta el diámetro que recibe el filamento cambia y se hace 3,5 mm mayor (dos veces 1,75 mm que es el diámetro del filamento); por lo que la velocidad angular se debe ajustar a la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{1,15 \text{ m/min}}{20 \text{ mm} + (n * 3,5 \text{ mm})}$$

Donde  $n$  hace referencia al número de vueltas que ha realizado el carrete iniciando en 0 como la primera vuelta y 3,5 mm como la proporción que aumenta el diámetro del carrete en cada vuelta.

El otro subsistema es el de movimiento lineal, el cual permite que el enrollado sea un embobinado y se realice de manera longitudinal por el cuerpo del carrete. Para esta sección se utilizó un mecanismo de tipo tuerca - tornillo que transforma el

movimiento rotacional de un motor Nema 17, este mecanismo tuerca - tornillo permite el movimiento lineal a partir del rotacional y mueve un riel especial que es quien direcciona el filamento; el riel posee a ambos lados finales de carrera que por medio de la programación cargada al controlador, al llegar a los extremos, el motor invierte su sentido de giro, es importante destacar que mientras el motor de este subsistema está trabajando, la rotación del carrete debe seguir ejecutándose, para esto la programación se ejecuta con interrupciones independientes de corta duración y que son quienes definen la frecuencia de trabajo de cada motor. El esquema de conexiones electrónicas corresponde al Anexo G. La vista isométrica de este sistema se presenta en la Fig. 42.



**Fig. 42. Vista isométrica externa sistema de enrollado.**

## 7. RESULTADOS

Continuando con la metodología utilizada, la cuarta fase hace referencia a las pruebas y verificación de funcionamiento del producto y cumplimiento de los objetivos; para esto se realiza un plan de validación especificando el procedimiento a realizar para verificar el cumplimiento de las necesidades y métricas estipuladas al principio del proyecto y el correcto funcionamiento del dispositivo consignando los resultados que estas pruebas obtuvieron al poner en operación todo el sistema.

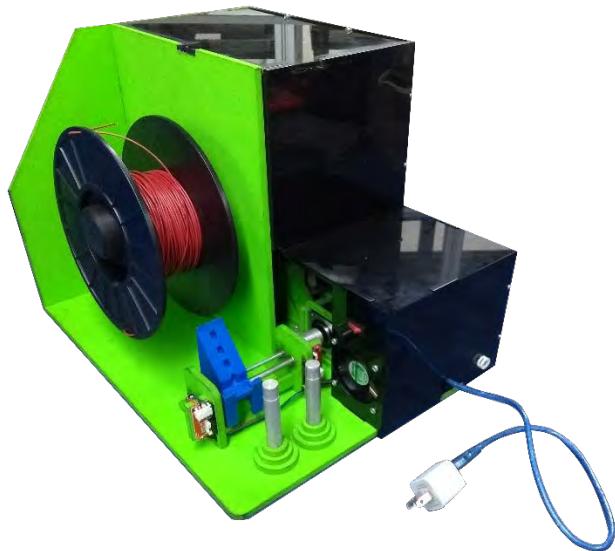
La implementación del diseño se muestra en las Fig. 43, Fig. 44 y Fig. 45 con los tres módulos del dispositivo (triturado, extrusión y enrollado).



**Fig. 43. Módulo sistema de triturado.**



**Fig. 44. Módulo sistema de extrusión.**



**Fig. 45. Módulo sistema de enrollado.**

## 7.1 PLAN DE VALIDACIÓN

### a) Prueba 1.

Objetivo: Calcular el tiempo en el que 100 g de material plástico es procesado por la trituradora.

- Se pone en funcionamiento el sistema de triturado encendiendo el motor y posicionando el recipiente recolector de trozos triturados.
- Se debe separar los plásticos por su nomenclatura según el código de reciclaje recolectando 100 g por material.
- Se introducen en la trituradora los elementos plásticos a reciclar al mismo tiempo que se inicia el conteo del cronómetro.
- El cronómetro se detiene cuando el flujo de trozos triturados se detenga y se registra el tiempo en minutos.

- Se realiza para cada uno de los cuatro tipos de materiales escogidos para el reciclaje.

**TABLA XIII.**  
**Tiempo de triturado por material**

Material	PET	HDPE	PP	PS
Tiempo de triturado (min)	6 min 03 seg	8 min 10 seg	10 min 12 seg	7 min 32 seg

El valor de referencia es de 24 segundos y es atribuido a la compañía plástico infinitos en la cual para un sistema de triturado similar al que se utilizó tienen una producción de 15 kg de tapas de HDPE en 1 hora, suponiendo un comportamiento lineal en la producción serían 250 g por minuto, o sea que para producir 100g de material tardan 24 segundos, debe considerarse que este valor se toma de una máquina de dimensiones mayores a la utilizada y que el proceso de vertimiento de estas tapas son de gran cantidad por operación.

Los datos registrados de tiempo de procesamiento para cada material varían entre sí por pocos minutos, y con respecto al valor de referencia ninguno logra cumplir la meta debido a que los materiales procesados no pueden ser vertidos al mismo tiempo como sucede con las tapas. Es importante resaltar que debido a que son distintos tipos de materiales el volumen para cada caso es distinto y debido a esto es que se presentan las diferencias en los tiempos, los trozos de material triturado se presentan en la Fig. 46.



**Fig. 46. Resultados proceso de triturado.**  
**a) PET. b) PP. c) PS.**

De esta prueba se puede obtener datos adicionales, pesando el material en trozos recogido para encontrar un valor de porcentaje de material aprovechado en el proceso, calculado como los gramos de material en trozos divido 100 gramos que es el peso del material que se ingresa al sistema de triturado.

**TABLA XIV.**  
**Porcentaje de aprovechamiento de material en el triturado.**

Material	PET	HDPE	PP	PS
Aprovechamiento de material (%)	90,2%	94,8%	87,7%	91,8%

Frente a estos valores porcentuales se concluye que el proceso aprovecha en promedio un 91,13% del material que es ingresado dentro del proceso de triturado, el porcentaje restante (equivalente a material que no se utiliza posteriormente para el proceso de extrusión) es aquel material que no posee dimensiones inferiores a 8 mm de diámetro (medida de las perforaciones del tamiz de la trituradora) y por ende no cae en el recipiente recolector.

**b) Prueba 2.**

Objetivo: Identificar los valores de temperatura en los cuales se logra obtener un filamento uniforme (o medianamente uniforme) a partir del material plástico reciclado comparándolos con los valores teóricos de extrusión.

- Se pone en funcionamiento el sistema de extrusión, se vierten los trozos triturados de material específico para la prueba (PET, HDPE, PP o PS).
- Se lleva el control de temperatura a la referencia indicada como valor teórico de extrusión.
- Se verifica el resultado de la extrusión a este valor y se ajusta de ser necesario hasta que salga el filamento de manera uniforme.
- Se documenta el valor con el que la extrusora trabaja correctamente para cada material.

**TABLA XV.**  
**Rango de temperatura de trabajo para cada plástico**

Material	PET	HDPE	PP	PS
Rango de temperatura (°C)	255	220	220 – 230	200
Referencia	210 [10]	200 [10]	208 [27]	170 – 190 [28]

Frente a esta prueba se presenta una gran desviación con los valores obtenidos como punto de extrusión o Melt point con valores de diferencia de 10 a 40 °C lo cual representa una desviación promedio entre los datos registrados de cerca del 12,43%, sin embargo según los valores de referencia se destaca el PET como el material que mayor temperatura requiere para poder ser extruido, al momento de realizar la extrusión de PET a esta temperatura el sistema era muy sensible a perturbaciones como corrientes pequeñas de viento lo cual implica la necesidad de un control más robusto para el extrusor, mientras que el poliestireno requiere de menor temperatura, este comportamiento se mantiene al realizar las pruebas con los materiales reciclados cuyo ordenamiento por rango de temperatura de menor a mayor es PS → HDPE → PP → PET.

**c) Prueba 3.**

Objetivo: Calcular el tiempo en el que 100 g de material plástico es procesado por la extrusora.

- Se debe cerciorar de que en la camisa calefactora no haya material plástico, de ser así debe ser extruido todo el material y limpiar la tolva.
- Se vierte en la tolva de la extrusora los trozos que se obtuvieron del proceso de triturado.
- Se pone en funcionamiento el sistema de extrusión para el trabajo de cada uno de los cuatro tipos de plásticos ajustando la temperatura de extrusión.
- Se acciona el motor del tornillo extrusor al momento que se empieza a tomar el tiempo con un cronómetro.
- En el momento en que empieza a salir el filamento por la boquilla de la extrusora, se detiene el cronómetro y se registra el valor para cada plástico en minutos.

- Para cada tipo de plástico se debe extruir todo el material que se encuentre en la camisa calefactora hasta que no salga más material.

**TABLA XVI.**  
**Tiempo de extrusión por material**

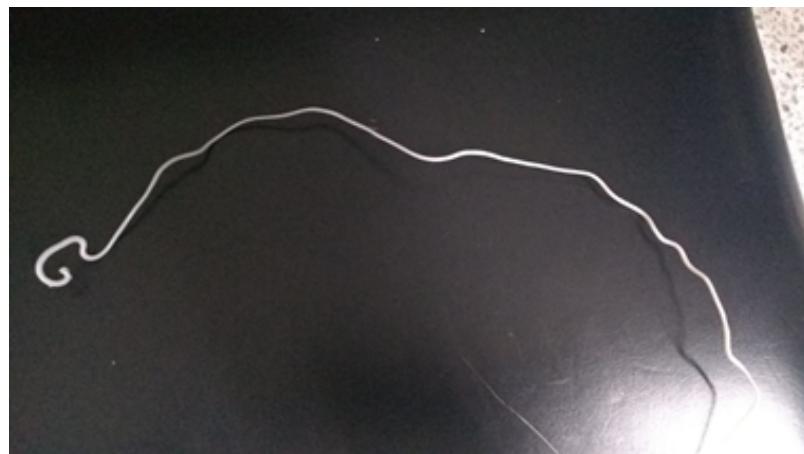
Material	HDPE	PP	PS
Tiempo de extrusión (min)	1 h 8 min 30 seg	1 h 4 min 30 seg	56 min 40 seg
Referencia		1 hora	

Para esta prueba se trabajó con los cuatro materiales plásticos más abundantes entre las basuras cotidianas: PET, HDPE, PP y PS. Aunque se trabajó con las temperaturas ajustadas encontradas en el apartado de la prueba 2 del plan de validación, el material RPET no tenía un proceso de extrusión de manera uniforme con este dispositivo, obteniendo pedazos deformes entregados por la boquilla de la extrusora como se muestra en la fig. 47, entre las causas de este comportamiento se identifica que el PET es un material que absorbe gran humedad (material higroscópico), 0,18 % al día [40] frente a 0,01% de absorción que presentan los tres materiales restantes [27], [41], [26].



**Fig. 47. Resultados de extrusión de RPET.**

Frente a esto se realizan pruebas con un sistema externo de deshumidificación a temperatura de 80 °C obteniendo un trozo de filamento continuo de 25 cm, los resultados se muestran en la Fig. 48.



**Fig. 48. Resultados de extrusión de RPET con deshumidificación.**

Los datos se comparan frente a un referente ideal, que agilice el proceso de obtención de filamento y permita el aprovechamiento de material. Frente a los resultados las pruebas con los materiales la desviación con respecto al referente no es significativa, la mayor desviación es de 8 minutos lo cual implica que esta prueba es satisfactoria y se obtuvieron resultados cercanos a lo esperado. Un dato adicional de esta prueba es que se logra registrar, aparte del tiempo de procesamiento de los 100 g, la cantidad de metros obtenidos del procesamiento de cada material, estos se consignan en la Tabla XVII.

**TABLA XVII.**  
**Longitud de filamento obtenido de 100 g de material.**

Material	HDPE	PP	PS
Longitud de filamento (m)	3,42	3,17	3,97

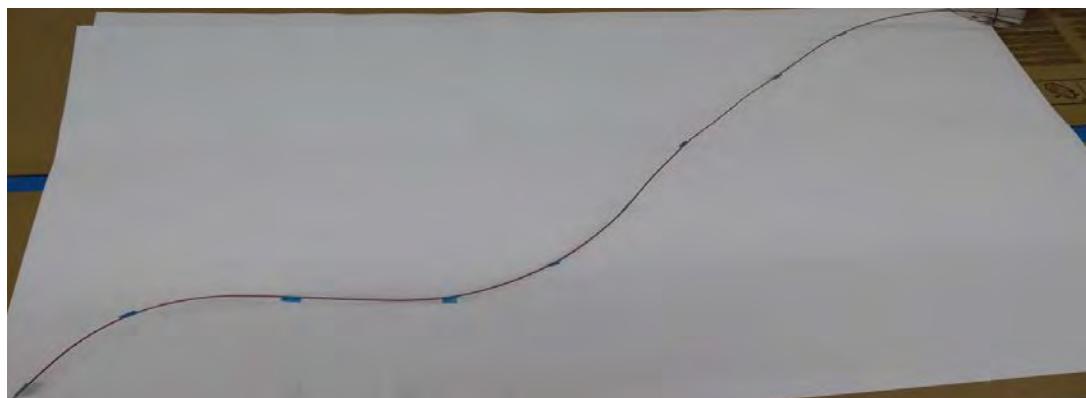
Frente a estos resultados se evidencia la gran cantidad de material que se produce de la extrusión a partir de 100 g de material triturado. Dentro de los casos, los materiales poseen un valor promedio de 3,52 m de filamento; en los casos del PP y HDPE (en los cuales fue posible el enrollado del filamento) esta cantidad logró llenar un tramo del carrete, por lo que se define que para obtener un carrete lleno se requiere de aproximadamente un poco más de dos horas de trabajo de extrusión y enrollado. Con el PS no fue posible enrollarlo en el carrete debido a que es un material muy frágil al momento de ser doblado y manipulado.

**d) Prueba 4.**

Objetivo: Verificar la continuidad del diámetro de filamento extruido.

- Desenrollar un metro de filamento de carrete previamente obtenido del dispositivo.
- Marcar en el filamento la distancia de un metro.
- Marcar con una seña cada 10 cm en el tramo de un metro.
- Tomar la medida de los 10 puntos del tramo de un metro de filamento y registrarla para PP y HDPE con ayuda de un calibrador.

**Valor de referencia: 1,75 mm**



**Fig. 49. Señalización de tramo de filamento extruido.**

**TABLA XVIII.**  
**Medida del filamento en tramo de 1 m.**

Distancia (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	$\sigma_{prom}$
Diámetro PP (mm)	1,5	1,75	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,7	1,65	1,7	6,8%
Diámetro HDPE (mm)	1,7	1,65	1,65	1,75	1,7	1,65	1,6	1,7	1,75	1,75	3,4%

De los datos muestrados de diámetro dentro del metro de filamento se presenta para el caso del PP un diámetro promedio de 1,63 con una desviación de 6,8%, mientras que para el caso del HDPE el promedio de los datos de diámetro de filamento es de 1,69 con una desviación del 3,4% el cual es un poco más cercano al calor de referencia de 1,75 mm; este valor de referencia es el tamaño de la boquilla del cabezal al que ingresa el filamento en la impresora 3D, un valor muy por encima de 1,75 mm impediría que el filamento ingrese al cabezal para ser fundido y un diámetro inferior tiene la desventaja de que en el sistema de tracción (el cual se basa en un sistema de piñones que agarran el filamento y lo empujan) el filamento se deslizaría entre los piñones y este se flexiona al momento de ingresar a la boquilla impidiendo la continua deposición de material fundido y afectando el resultado de la impresión 3D, según estas consideraciones se puede inferir que el material HDPE al tener un diámetro promedio más cercano a los 1,75 mm que el PP será un material con menos dificultades en el proceso de impresión 3D.

**e) Prueba 5.**

Objetivo: Calcular el peso del material plástico enrollado en 30 min.

- Se debe ajustar el carrete al eje de la máquina enrolladora y cerciorarse de que el carrete esté vacío.
- Se extruye filamento de alguno de los tipos de plástico, la prueba se realizará con PP y HDPE.
- El filamento se conduce por el riel de la enrolladora y se engancha al carrete.
- Se acciona el sistema de enrollado al mismo tiempo que se empieza a cronometrar el tiempo.
- Cuando se cumplan 30 min, se toma registra el peso del filamento como la diferencia entre el valor del peso final carrete con material enrollado y el carrete vacío.

$$\text{gramos filamento} = \text{gramos carrete con filamento} - \text{gramos carrete vacío}$$

**TABLA XIX.**  
**Peso de filamento por prueba**

Prueba	PP	HDPE
Peso de filamento (g)	37,5	26,7

Los valores obtenidos por el peso del filamento junto con el tiempo de salida de filamento permiten conocer datos adicionales como cuál de los plásticos reciclados requiere menos tiempo para ser procesado, o desde otra perspectiva, cual es el material del que se obtiene más filamento en un periodo de tiempo. Según los resultados de la TABLA XIX en 30 min se obtiene 37,5 g de PP, mientras que con el HDPE se obtiene 26,7 g, lo que implica que se presenta *un proceso más veloz con el PP que con el HDPE*.

**f) Prueba 6.**

Objetivo: Registrar el número de operaciones necesarias al momento de poner en funcionamiento para obtener el filamento plástico.

- Se posicionan los tres módulos del dispositivo cercano unos a otros.
- Se contabiliza todas las acciones necesarias para que el usuario pase de tener reciclaje plástico a filamento con la simulación de operación normal.

**TABLA XX.**  
**Número de operaciones para el manejo del dispositivo por prueba**

Prueba	Triturar	Extruir	Enrollar
Número de operaciones	6	3	5

Para evidenciar este apartado se hace uso de imágenes ilustrando las tareas que se realizan para la operación de cada uno de los sistemas.

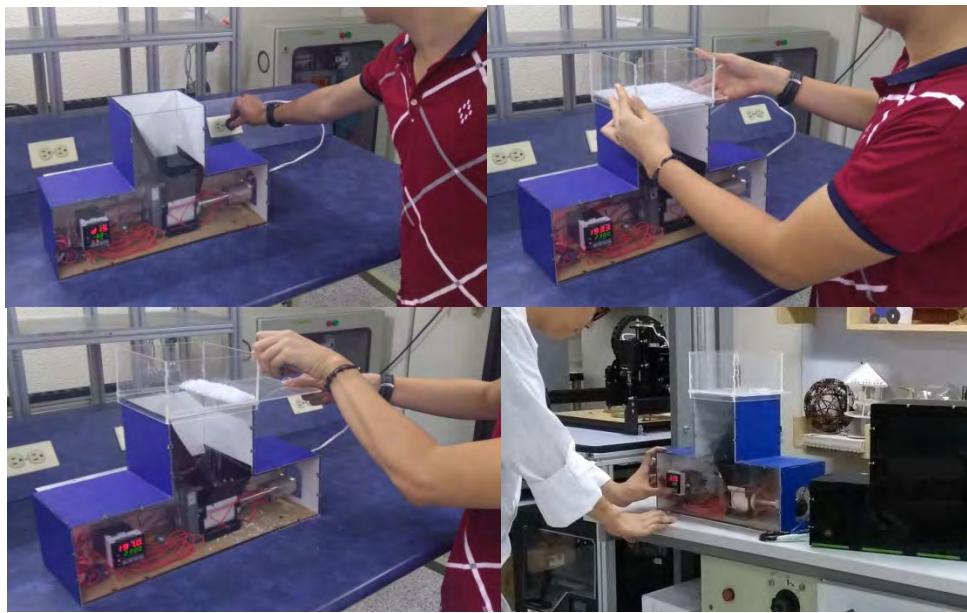
En el sistema de triturado, simulando la operación normal del dispositivo, el usuario primero debe conectar el sistema a una red trifásica y automáticamente se encenderá el variador de velocidad, seguido a esto se arranca el motor accionando el botón de Inicio RUN cerciorándose de que el modo del variador esté en "f o r" (forward or reverse), el usuario levanta la tapa superior de protección en la tolva de la trituradora y deposita el material reciclado (el material debe estar

previamente lavado y secado antes de ingresar a la trituradora para evitar la abrasión en las cuchillas de acero inoxidable), la tapa se cierra y el usuario recoge de la parte inferior los trozos procesados. Es necesario que después del proceso de triturado con un material se limpie la trituradora con cuidado retirando el material sobrante del tamiz y recolocándolo.



**Fig. 50. Operación sistema de triturado.**

En el sistema de extrusión se debe conectar la fuente del dispositivo a la red eléctrica, inmediatamente se encenderá el controlador de temperatura, seguido a esto se debe posicionar el recipiente de material triturado en el orificio superior del sistema, luego se retira la lengua de este recipiente ubicada en la parte inferior para que el material triturado caiga a la tolva de transporte de la extrusora, se ajusta el valor de referencia de temperatura de extrusión del material específico depositado en el controlador (este valor es distinto para cada material TABLA XV) y se enciende el sistema de calefacción con el botón demarcado como “Calentar!”; esto indica un total de 3 macro operaciones para este trabajo.



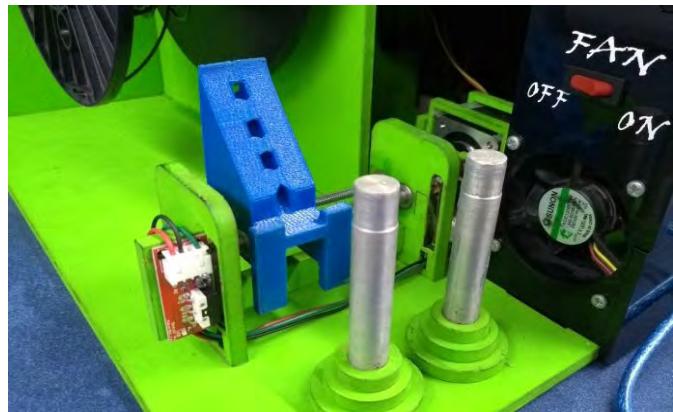
**Fig. 51. Operación sistema de extrusión.**

En cuanto al sistema de enrollado, una vez se ha ajustado la temperatura de extrusión y el controlador indica que se encuentra en el valor de referencia (o cercano +/- 4 °C) se deja el sistema calentar el material en la tolva por 15 minutos, mientras esto sucede se debe posicionar el sistema de enrollado de la manera que se muestra en la Fig. 52. a. Seguido a esto se conecta la extensión de energía proveniente del sistema de extrusión al plug del sistema de enrollado delimitado como "12V" (Fig. 52. b.), luego se debe conectar la clavija proveniente del cable delimitado como "120V" a un toma de energía eléctrica, con estas conexiones realizadas se debe ajustar el carrete al eje superior ubicado en la zona verde del dispositivo amarrado a los acoples de color negro (Fig. 52. c.). Una vez transcurre el tiempo de precalentamiento se acciona el motor del sistema de extrusión con el botón "Extruir!", luego de que el material empieza a salir del extrusor (50 seg. aproximadamente si no había material en el interior del extrusor) se debe encaminar el filamento por el agujero en el riel de direccionamiento longitudinal (pieza azul) mostrado en la Fig. 53. y se lleva hasta el carrete, el cual en su cara lateral posee agujeros en los que se incrusta la punta del filamento (normalmente este tramo suele salir un poco defectuoso) inmediatamente esto sucede se acciona el sistema de enrollado con el botón "Acción" (Fig. 52. d.), y se espera mientras el filamento termina de enrollarse o hasta que el usuario desee cortando el tramo de filamento. Al finalizar este proceso la persona puede cortar el primer tramo de filamento enrollado que suele salir defectuoso. Para el caso del HDPE este requiere de un sistema de enfriamiento adicional, por lo que se debe accionar el ventilador ubicado en la zona de recepción de filamento de la enrolladora. Esto infiere un total de 5 macro operaciones.



**Fig. 52. Operación sistema de enrollado**

- a) Posicionamiento de sistemas. b) Conexiones. c) Posicionamiento carrete. d) Accionamiento y funcionamiento.**



**Fig. 53. Sistema de desplazamiento longitudinal.**

Para una mejor comprensión de las operaciones en la Fig. 54 y Fig. 55 se muestran las interfaces de los sistemas de extrusión y enrollado respectivamente.



Fig. 54. Interfaz de mando sistema de extrusión.



Fig. 55. Interfaz de mando sistema de enrollado.

a) Acción de motores y conexiones externas. b) Ventilación.

**g) Prueba 7.**

Objetivo: Calcular el nivel de potencia eléctrica consumida por el dispositivo en funcionamiento en 30 min.

- Se ponen en funcionamiento los tres módulos del dispositivo.
- Tomar el valor de corriente de los dispositivos en AC cada 10 min y se calcula el valor de potencia eléctrica consumida.

- Se registran estos valores para dos ensayos, uno procesando material como HDPE en botellas, y otro sin procesar material.

**TABLA XXI.**  
**Potencia eléctrica consumida por el dispositivo en dos casos**

Material	Sin procesar material	Procesando material HDPE	Referencia
Potencia eléctrica consumida sistema triturado	566,48	673,82	750 W
Potencia eléctrica consumida sistema extrusión	14,26 W	243,54 W	211,3 W

El valor de referencia del sistema de extrusión es hallado al sumar la potencia independiente del motor de la extrusora (12 W), las resistencias térmicas (144 W), los motores del sistema de enrollado (40,8 W) y el Led del sistema de enrollado (0,24 W), a esto se le debe adicionar el valor de potencia que consume la fuente sin una carga conectada el cual hace referencia al valor de la izquierda de la TABLA XXI, el valor de referencia del sistema de triturado es tomado directamente de la placa característica del motor como 0,75 kW.

Para calcular los valores reales de potencia activa del dispositivo procesando material se hace la medición del valor RMS de corriente alterna y se multiplica por el valor de la tensión de red y el factor de potencia satisfaciendo la siguiente fórmula

$$P = V I \cos \varphi$$

Para el sistema de extrusión – enrollado el valor de voltaje en la red es constante como 120 V, la fuente posee un factor de potencia  $\cos \varphi = 0,99$  (según sus especificaciones técnicas) y las medidas de corriente sin carga son 0,12 A y con carga son de 2,05 A, considerando con carga todos los dispositivos conectados a la fuente en estado encendido, esta medición de corriente se realiza desde una de las líneas de la red.

Para la potencia activa del sistema de triturado es necesario hallar la potencia de cada fase como  $P_F = V_F I_F \cos \varphi$ , y al final multiplicar el valor por  $\sqrt{3}$  [53]. El voltaje de cada una de las fases de la línea trifásica es de 110V, el factor de potencia es sacado del valor de la placa característica del motor y es de 0,975, la

corriente de fase de cada línea mientras que la trituradora no posea carga adicional es de 1,6 A en cada una, cuando el sistema empieza a triturar plástico el valor RMS de la corriente es de 1.9 A en cada línea.

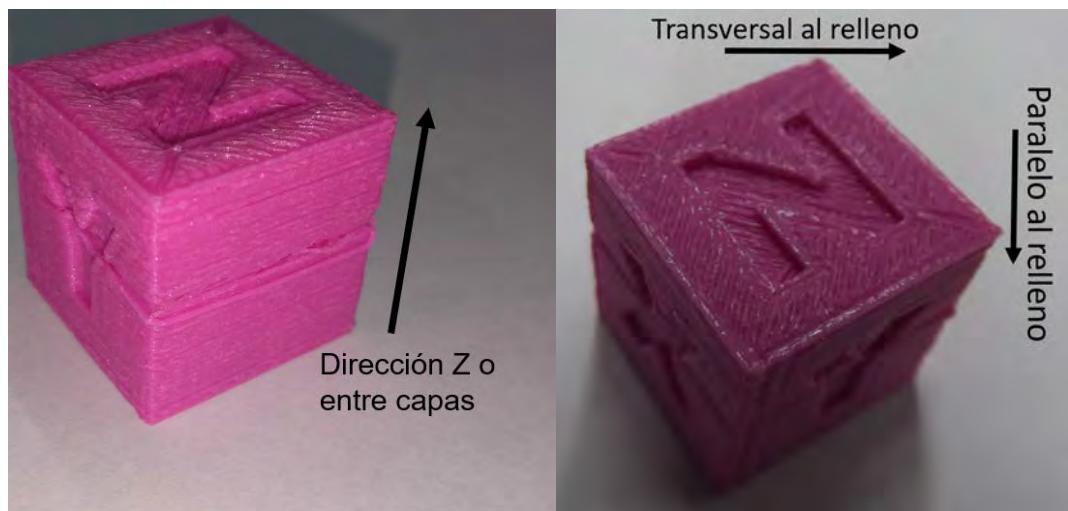
Frente a los valores de referencia el sistema de extrusión supera por 32,24 W el valor teórico calculado, mientras que en el sistema de triturado está por debajo del referido en la placa característica en alrededor de 76,18 W.

**h) Prueba 8.**

Objetivo: Cuantificar la calidad de las impresiones con material reciclado gracias a los índices de rugosidad del producto obtenido en el proceso de FDM con el filamento suministrado por el dispositivo.

- Se utiliza uno de los rollos (o trozo de filamento si es el caso) de cada uno de los materiales que se pudo obtener buenos resultados.
- Se calibra la impresora 3D de FDM para cada uno de los materiales en los que se desea imprimir, cargando el código G del archivo CAD para la pieza a realizar y ajustando los parámetros de impresión para cada material.
- Se realiza la impresión de la misma pieza para cada caso del plástico y tomando como referente una impresión de la misma a partir de material reciclado con tratamiento especial de reciclaje.
- Se toman las medidas de Ra como índice de rugosidad media y Rz como medida de profundidad de rugosidad media, comparando con el PLA.

**Valores de referencia:** Como medida referente se realiza una impresión FDM en material PLA (el cual es el material convencional y con un acondicionamiento especial para este proceso) de la cual se tomaran los valores de rugosidad Ra y Rz y con los cuales se comparará los obtenidos con los materiales reciclados.



**Fig. 56. Pieza impresa con FDM en PLA.**

En las mediciones de rugosidad en la última capa se tienen los valores de Ra 11 $\mu$  y Rz 78 $\mu$  para la medición paralela al relleno y los valores de Ra 45 $\mu$  y Rz 200 $\mu$  para la medición transversal al relleno, para la medición entre capas (dirección z) el valor de Ra es 35 $\mu$  y Rz de 205 $\mu$ .

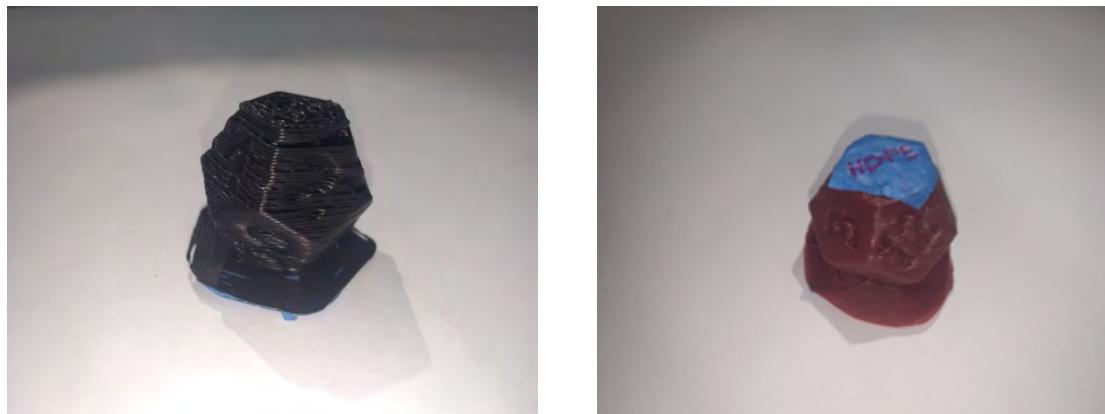
Para realizar esta prueba es necesario identificar los parámetros de trabajo de la impresora 3D convencional de FDM para cada tipo de material.

**TABLA XXII.**  
**Parámetros de trabajo de impresión 3D con PET, PP, HDPE Y PS.**

Material	PETG	PP	HDPE	PS
Temperatura de extrusión	235 °C	220 °C	225 °C	240 – 255 °C
Temperatura de cama calefactora	80 °C	65 °C*	60 °C	90 – 100 °C
Velocidad de impresión	40 mm/seg	15 mm/seg**	25 mm/seg	40 mm/seg
¿Método de adición?	Si	Si	Si	No

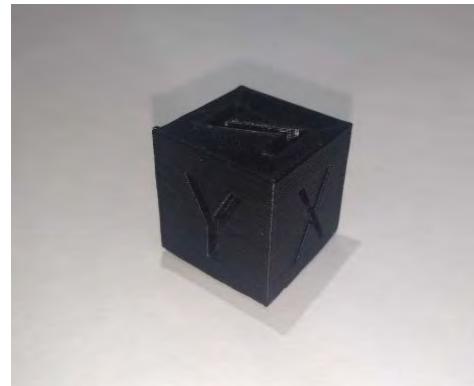
\*\* Parámetro ajustado e identificado al momento de realizar la prueba de impresión con el material.

Con los parámetros de trabajo indicados en la tabla XXII se obtuvieron los modelos de la Fig. 57 y Fig. 58 impresos por FDM con PETG, PP y HDPE a partir de pellets previamente tratados en la impresora Delta 4070 PRO de WASP.



**Fig. 57. Resultados de impresión a partir de material reciclado con tratamiento previo.**

a) PP (izquierda). b) HDPE (derecha).

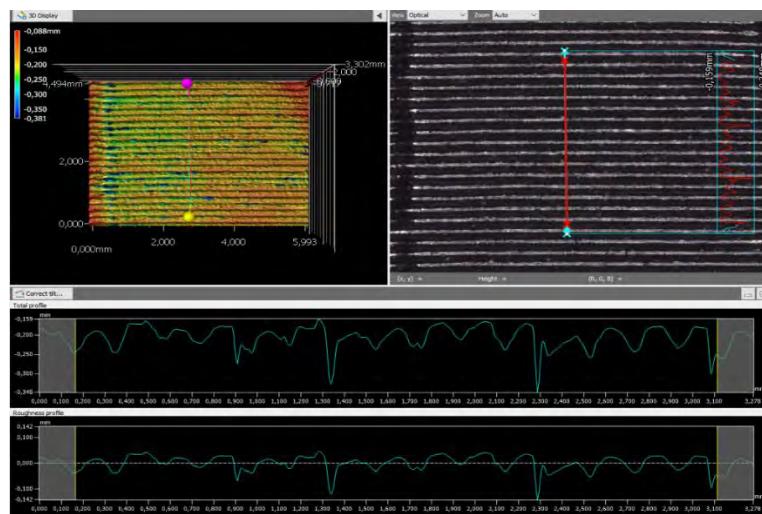


**Fig. 58. Resultados de impresión a partir de material comercial PETG.**

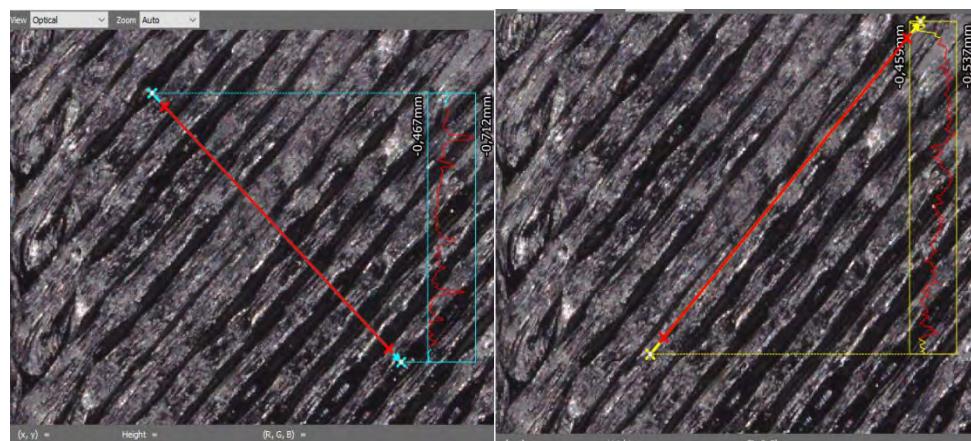
Una vez obtenido los modelos impresos en 3D, para el PETG un cubo XYZ normalmente usado para la calibración con altura de capa 0,2 mm y testeo de las

impresoras 3D y para el HDPE y PP un dodecaedro con altura de capa 0,3 mm, se procede a analizar la calidad de la pieza por medio de la rugosidad de la misma identificando los parámetros Ra y Rz con ayuda de un microscopio e ingresando estos valores en la Tabla XXIII, a continuación se muestran las medidas identificadas con este equipo y el equipo KEYENCE para cada tipo de material.

Se toman tres tipos de medidas de rugosidad de las piezas impresas: entre las capas (dirección z) Fig. 59 y en la superficie de la pieza: en dirección transversal al relleno y en dirección paralela a él, Fig. 60.



**Fig. 59. Toma de rugosidad de superficie entre las capas en PET (dirección z).**



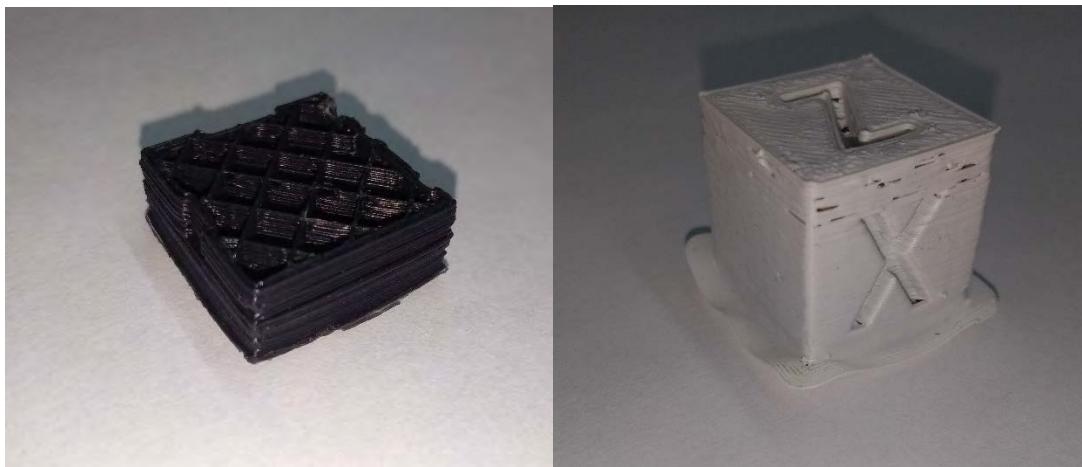
**Fig. 60. Toma de rugosidad de superficie en capa superior PET.**  
**a) transversal al relleno. b) paralelo al relleno.**

**TABLA XXIII.**  
**Medidas de rugosidad Ra y Rz de las piezas impresas a partir de pellets con tratamiento previo.**

Tipo de medición	Material	PETG	HDPE	PP
Medición entre capas o dirección z	Ra ( $\mu m$ )	22	33	58
	Rz ( $\mu m$ )	189	154	284
Transversal al relleno	Ra ( $\mu m$ )	29	77	136
	Rz ( $\mu m$ )	245	336	457
Paralelo al relleno	Ra ( $\mu m$ )	13	87	18
	Rz ( $\mu m$ )	61	336	89

Frente a los datos destaca el PETG como elemento con un menor índice de rugosidad media Ra en los tres tipos de mediciones, sin embargo, el PETG utilizado para esta prueba es un material comercial, mientras que el HDPE y PP provienen de pellets, que, aunque teniendo procesos de limpieza especiales previos, pasaron por el proceso de extrusión y enrollado del dispositivo diseñado en este proyecto. Comparando los valores de HDPE y PP, el HDPE logra presentar mejores valores de rugosidad en las mediciones en sentido del eje z entre capas y de manera transversal al relleno, sin embargo, se presenta una discordancia con la medición paralela al relleno, en la cual el PP presenta excelentes condiciones de rugosidad. Frente al comportamiento de estos materiales comparado con el referente presentado en la Fig. 56 de medidas de Ra y Rz de un proceso de FDM con PLA, ninguno de los materiales logra ser igual a la referencia en Ra ni Rz, sin embargo, debe estar presente en la comparación que los materiales son distintos y la rugosidad no es una variable que se controle dentro del proceso de impresión.

Para el trabajo de impresión por FDM con los materiales extruidos a partir de plástico reciclado se trabaja con filamento de PP y HDPE, presentando a simple vista la premisa de que el filamento en HDPE tiene mayor probabilidad de que sea manipulable con facilidad y proporcione mejores acabados en la impresión debido a que tiene mayor uniformidad a lo largo del mismo. Los resultados de impresión con material directamente reciclado y triturado por el dispositivo se muestran en la Fig. 61.



**Fig. 61. Resultados de impresión con filamento a partir de material reciclado sin un tratamiento especial previo.**

a) PP (izquierda). b) HDPE (derecha).

Las piezas impresas son cubos diseñados con dimensiones de 20 mm para cada lado, con las piezas obtenidas las mediciones de ancho y largo son de 20,10 x 19,70 mm para PP y 20,00 mm x 19,50 mm para el HDPE. Ahora se procede a tomar los valores de rugosidad Ra y Rz como se realizó anteriormente y se registran en la TABLA XXIV.

#### **TABLA XXIV.**

**Medidas de rugosidad Ra y Rz de las piezas impresas a partir de plástico reciclado sin tratamiento.**

Tipo de medición	Material	HDPE	PP
Medición entre capas o dirección z	Ra ( $\mu m$ )	27	49
	Rz ( $\mu m$ )	149	320
Transversal al relleno	Ra ( $\mu m$ )	22	23
	Rz ( $\mu m$ )	115	135
Paralelo al relleno	Ra ( $\mu m$ )	51	26
	Rz ( $\mu m$ )	185	128

Comparando los valores de las tablas XXIII y XXIV, para el caso del HDPE, se presentan mejores acabados superficiales en el material reciclado sin ningún tratamiento previo, en cuanto al PP los valores de rugosidad suelen ser muy

parecidos en los casos de medición entre capas y medición paralelo al relleno, infiriendo que los resultados en la rugosidad para este caso son similares.

## 7.2 ESPECIFICACIONES FINALES

Gracias al plan de validación ejecutado, el proceso de diseño desarrollado y algunos fallos presentados durante la fase de pruebas de desempeño (necesidad de cambio de repuestos) se definen las siguientes especificaciones finales técnicas de rendimiento del producto en la TABLA XXV.

**TABLA XXV.**  
**Lista de especificaciones técnicas finales.**

Métrica	Valor
Materiales reciclados permisibles para extruir	PP, HDPE
Rango de temperatura de trabajo	200 – 250 °C
Porcentaje de desperdicios en el proceso	6 %
Tiempo de procesamiento de 100 g de plástico	PP 1 h 15 min HDPE 1h 15 min
Cantidad de filamento aproximado por 100 g de material reciclado	PP 3,20 m HDPE 4,00 m
Potencia eléctrica consumida	0,92 kW/h
Distancia segura del dispositivo	30 cm
Dimensiones del producto	100 x 60 x 50 cm
Tipo de conexiones eléctricas	Red trifásica 220V / red monofásica 110V
Número de operaciones para el manejo	14 operaciones
Frecuencia de mantenimiento	4 a 5 meses
Desviación en diámetro de filamento	PP 0,10 mm HDPE 0,05 mm

## 8. CONCLUSIONES

Teniendo presente que el dispositivo diseñado debe generar un insumo para las impresoras convencionales de FDM a partir del reciclaje fue requerido una revisión previa de conceptos entre los procesos de transformación de plástico y un estudio de los materiales polímeros reciclables más comunes. Desde una vista macroscópica a nivel de sistema se considera una caja negra a la cual una de sus entradas es material plástico reciclado y de esta sale el filamento insumo de las impresoras de FDM, el proceso convencional para extruir o inyectar plásticos (los cuales son los procesos industriales más comunes para el moldeo de materiales poliméricos) consiste en ingresar el plástico en forma de pellets para luego ser fundido, conocido esto surge el cómo convertir el reciclaje en pellets (o por defecto trozos pequeños) para ingresar en una máquina de extrusión. Es según este análisis que se escoge iniciar el proceso con el triturado del material (molienda de plástico) y posteriormente extrusión, ya que se requieren grandes longitudes de una forma específica (perfil de diámetro circular de 1,75 mm).

El sistema de triturado es el encargado de desgarrar el material plástico en pequeños trozos que filtra aquellos pedazos de diámetro menores a 8 mm para utilizarse en el proceso siguiente de extrusión. Su implementación fue posible, desde el diseño mecánico de la estructura y cuchillas hasta el diseño de seguridad para este. Gracias al proceso de validación realizado en el apartado 7 se verifica el funcionamiento del sistema cumpliendo con su objetivo principal el cual consiste en el de triturado de material plástico en pequeños trozos además de validar el cumplimiento de necesidades como la facilidad de uso, productor mínimo de residuos, un dispositivo que sea veloz, de bajo consumo energético (manteniendo con valores menores al nominal), recalando la seguridad, con fácil mantenimiento, robusto (soporte perturbaciones mecánicas) y que sea confiable en un trabajo continuo. Aunque el sistema es probado con los materiales para los cuales fue diseñado y se obtienen buenos resultados este no es capaz de triturar de manera eficiente la parte más densa de las botellas de RPET situada en la parte inferior de las mismas. Es necesario que el material que se ingresa en la trituradora sea previamente limpiado y secado para evitar la abrasión temprana de las cuchillas generadas por el corte de polímeros y un proceso de limpieza del material triturado con un imán para asegurar que el plástico que ingrese en el sistema de extrusión se encuentre limpio de contenido de metales y evite problemas posteriores.

El sistema de extrusión de material plástico contempla las etapas de *fundir* y *moldear*, en él un conjunto de resistencias calientan la coraza del extrusor mientras un tornillo sin fin empuja el material obligándolo a que se moldee por medio de un disco con orificio de 1,75 mm, el cual es el diámetro que debe

obtener el filamento insumo de impresión. El diseño de este sistema satisface las necesidades de que el dispositivo sea semiautomático, de fácil manipulación, de dimensiones pequeñas, transportable, de fácil instalación, liviano y silencioso en comparación a los sistemas de extrusión industriales. En trabajo continuo este sistema no presenta ningún tipo de falla a excepción del rompimiento del empaque O-ring 16 x 2,5 que posee este en la boquilla, la falla se presenta por los desajustes en el disco y las grandes presiones que este material debe soportar en esta zona de extrusión, sin embargo, los incidentes ocurridos por este fallo no son comunes con una frecuencia de cambio de 4 a 5 meses. En cuanto al sistema de control de temperatura ninguno de los componentes utilizados presenta fallo en el proceso de producción y se regula la temperatura con una desviación máxima de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  que no altera el resultado en el filamento.

Dentro de las pruebas realizadas de trabajo con los materiales plástico triturados reciclables más comunes entre las basuras: RPET, PP, HDPE y PS se obtienen resultados favorables con el HDPE siendo el polímero de mejor manejo y acabados entre los materiales reciclados, con un comportamiento similar se encuentra el PP, el cual no posee un diámetro tan uniforme como el HDPE pero si cercano al valor de 1,75 mm siendo este un inconveniente para la impresión por FDM en cuanto a continuidad y necesitando un sistema de supervisión adicional. En cuanto al tema de trabajo de PS, el sistema de extrusión se comporta de manera eficiente, el único inconveniente con este material es su fragilidad al momento de entrar en contacto con temperatura ambiente lo cual lo hace prácticamente imposible de enrollar con el sistema de enrollado diseñado y de difícil trabajo en los sistemas de impresión, pues entre las pruebas realizadas este se parte en la zona de tracción del cabezal de las máquinas. Por último, está el RPET, siendo un caso especial para el sistema de extrusión ya que el filamento es el menos uniforme de todos debido a la inconsistencia en el material fundido por el alto nivel de absorción de humedad que este posee, concluyendo gracias a la investigación que la manera óptima de trabajar con este polímero es integrando una etapa adicional de secado de material a temperatura de 80  $^{\circ}\text{C}$  que libere el nivel de humedad del mismo. Los materiales LDPE (Polietileno de baja densidad) y PVC (Poli cloruro de Vinilo) no fueron sometidos a estas pruebas ya que el sistema de triturado no consideró el LDPE debido a que este se encuentra mayormente en bolsas plásticas y este material puede enredarse entre las cuchillas y frenar el trabajo continuo de las mismas, mientras que el PVC es un material mucho más resistente al corte que el PET y se requiere de un sistema más grande para el reciclaje de este material, en cuanto a la extrusión el LDPE no presentaría gran conflicto mientras que el PVC es un material bastante tóxico debido a que los gases liberados en este proceso son nocivos para las personas [54]. Gracias a estos datos se sugiere el uso de HDPE y PP (especialmente el reciclado de tapas de contenedores de alimentos y productos de limpieza) para la transformación a filamento insumo de impresoras FDM inclusive despertando una

posibilidad de comercialización para el filamento de HDPE que no es muy común entre las empresas líderes en manufactura aditiva.

Los dispositivos de triturado, extrusión y enrollado cumplen el objetivo común de transformar elementos plásticos en filamento insumo para el proceso de impresión 3D FDM, cada uno de estos módulos trabajan de manera conjunta interactuando entre ellos, sin embargo se dividen por estructuras diferentes para evitar que las vibraciones del sistema de triturado desajusten los componentes mecánicos de los otros dos sistemas y que el calor producido por el sistema de extrusión no altere la integridad de los otros dos sistemas, sin embargo el sistema de extrusión y enrollado funcionan de manera conjunta inclusive partiendo de una misma conexión eléctrica. Las interfaces de estos sistemas están realizadas para que el usuario simplemente deba oprimir botones sin ningún tipo de programación especializada al contacto de ellos y que este sea intuitivo.

## 9. RECOMENDACIONES

Uno de los interrogantes que deja este proceso de investigación, diseño e implementación está en el tema de resistencia y propiedades mecánicas que puedan poseer los materiales impresos con este tipo de polímeros reciclados, debido a que la impresión 3D suele ser utilizado para la fabricación de prototipos e inclusive de diseños finales por lo que resulta interesante conocer que tan buenas propiedades mecánicas poseen los polímeros reciclados en comparación con los utilizados normalmente como lo son el PLA y el ABS.

El tema de supervisión del filamento que sale del sistema es otro aspecto interesante para futuros trabajos, ya sea un sistema de supervisión a distancia que informe sobre la irregularidad en la impresión o en la extrusión de material o un sistema de control especial que sea capaz de mantener el valor del diámetro del filamento en 1,75 mm con tolerancia de 0,05 mm [55] para las impresoras convencionales de FDM debido a que el sistema de enrollado simplemente realiza la acción sin un control en lazo cerrado, partiendo de la premisa de que las variables de velocidad de salida de material, composición química del polímero y temperatura de salida del material influyen en el resultado del diámetro del filamento enrollado.

El material RPET o Tereftalato de Polietileno Reciclado fue uno de los protagonistas de esta investigación debido a que requiere de un control de humedad que afecta su viscosidad, sin embargo, este material es uno de los que mayor población tiene en el planeta y uno de más lentos en su proceso de degradación, por lo que resulta grato encontrar la serie de aditivos o desarrollar nuevos aditivos a bajo costo que cumplan con el acondicionamiento de este material para mejores resultados en la extrusión e impresión de RPET o diseñar un módulo adicional que sea un sistema de secado que reduzca el nivel de humedad del material o inclusive desarrollar otra etapa del dispositivo que se encargue del secado del PET para su proceso posterior de extrusión.

## REFERENCIAS

- [1] K. Giovanini, (2018, Oct. 10). “Campañas de reciclaje: 3 ejemplos que amarás – ExpokNews”. [En linea]. Disponible en <https://www.expoknews.com/campanas-de-reciclaje/>
- [2] S. Alcalá, (2012, Nov. 16). “Reciente Encuesta Del Día Del Reciclaje Halla Que Los Estadounidenses No Colaboran Suficiente Con El Ambiente | EstilosBLOG Miami”. [En linea]. Disponible en <http://www.estilosblog.com/2012/11/16/reciente-encuesta-del-dia-del-reciclaje-halla-que-los-estadounidenses-no-colaboran-suficiente-con-el-ambiente/>
- [3] D. Suárez Zarta, (2016, Mar 09). “Solo 26% de las botellas plásticas se recicla”. [En linea]. Disponible en <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla-2357536>
- [4] M. V. Coppini, (2017). “Uso de plástico: historia, consecuencias y qué se puede hacer para reducir”. [En linea]. Disponible en: <https://geoinnova.org/blog-territorio/medioambiente-uso-de-plastico/>
- [5] J. N. Diaz López, (2017). “Retos De La Cadena De Suministro Con La Inclusión De La Tecnología De Impresión 3d-Fabricación Aditiva AM”. Especialización en Logística Integral. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. [En linea]. Disponible en: [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17139/DiazLopez\\_JeimyNataly2017.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17139/DiazLopez_JeimyNataly2017.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- [6] C. Fuentes Aliaga, (2016, Nov 15). “Con tus botellas plásticas PET ayudas a CENFA - Reciclación”. [En linea]. Disponible en <http://www.reciclaccion.cl/noticias/tus-botellas-plasticas-pet-ayudan/>
- [7] D. Cadillo, (2013, Jun 22). “Tiempo de vida del plástico y sus derivados | El plástico y su repercusión medioambiental”. [En linea]. Disponible en: <https://mundoverdecologico.wordpress.com/2013/06/22/tiempo-de-vida-del-plastico-y-sus-derivados/>
- [8] J. F. Rojas T., (2016, Ene 10). “Colombia entierra millones de pesos por no reciclar”. [En linea]. Disponible en <http://www.elcolombiano.com/especiales/que-hacer-con-la-basura/colombia->

- [9] M. Ayala, M. Hernandez, y N. Loor, (2012). “Escuela de Ciencias Ambientales Proyecto de ecoeficiencia reciclaje de botellas PET”. [En linea]. Disponible en [http://www.ambientum.com/revista/2001\\_24/2001\\_24\\_SUELOS/MPCTPLST1.htm](http://www.ambientum.com/revista/2001_24/2001_24_SUELOS/MPCTPLST1.htm)
- [10] F. Mesiano, F., Severini, A., & Pasquero, (s.f.). “Felfil Evo | Filament extruder kit for 3D printers”. [En linea]. Disponible en <https://felfil.com/felfilevo-filament-extruder/?v=42983b05e2f2>
- [11] T. Maly, (2017). “Filabot Turns your Plastic junk into material for 3-D PRINTERS”, [En linea]. Disponible en: <https://www.wired.com/2013/01/filabot-plastic-recycler/>
- [12] L. Klauss, L. C., van der Meer, C., Bleijerveld, B., Martens, J. R. J., Biersteker, T., Tackenberg, T., (s.f.). “Perpetual Plastic Project – Interactive Recycling Installation – Better Future Factory”. [En linea]. Disponible en: <http://www.betterfuturefactory.com/project/perpetual-plastic-project-installation/>
- [13] D. Hakkens, (2013). “Precious Plastic - about”, [En linea]. Disponible en: <https://preciousplastic.com/en/info/about.html>
- [14] F. A. Espinosa Guzmán, “Caracterización de botellas PET para su uso como elementos constructivos de muros de carga”, MSc, Dpt Hábitat y Dllo. Urb., Inst. Tecn. y de estudios Sup. de Occid., Taquepala, Jalisco, México, 2016. p. 15. [En linea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11117/3847>
- [15] A. Ziran, (2013, Oct. 30). “Heineken WOBO: Las botellas cuadradas salvarán el mundo | HiMarketing.es”. [En linea]. Disponible en: <https://himarketing.es/heineken-wobo-las-botellas-cuadradas-que-salvarian-el-mundo/>
- [16] National Geographic, (2019, Feb. 14). “Innovación y reciclaje”. [En linea].. Disponible en: [https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-actualidad/innovacion-y-reciclaje-2\\_13839/1](https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-actualidad/innovacion-y-reciclaje-2_13839/1)

- [17] Qué es la madera plástica y cómo ayuda al medio ambiente - TopXterior, (2017, Ago. 16). [En linea]. Disponible en: <https://es.topxterior.com/blog/que-es-la-madera-plastica/>
- [18] Una App para saber dónde reciclar los producto de la compra, (2018, Abr. 16). [En linea]. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/app-para-reciclar-productos-compra/>
- [19] L. H. Gomez Garcia, "el reciclaje de PET, PEAD, PEBD, PS Y PP en estibas plásticas como modelo de negocio", Sc Admon., U. del Rosario, Bogotá, Cund., Colombia, 2017. pp. 21 - 22. [En linea]. Disponible en: <http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/13097/1101693416.pdf>
- [20] J. G. Hachi Quintana, J. D. Rodriguez Mejía, "Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de polietileno tereftalato (PET), en la ciudad de Guayaquil", Fac Ing., U. Politéc. Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2010. [En linea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2450/20/UPS-GT000106.pdf>
- [21] A. F. Muerza, (2012, Mar. 12). "Las claves para entender los símbolos de reciclaje | EROSKI CONSUMER". [En linea]. Disponible en [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/urbano/2008/08/04/179032.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2008/08/04/179032.php)
- [22] A. H. C. Francisco, (2014). "Tema 2. Polímeros termoplásticos y termoestables". [En linea]. Disponible en <http://educommons.anahuac.mx:8080/eduCommons/ciencia-de-los-materiales-y-metalurgia/ciencia-de-los-polimeros/tema-2.-polimeros-termoplasticos-y-termoestables>
- [23] GRANTA, (2018). "PET (Unfilled, semicrystalline)", Softw. CES EDUPACK 2018.
- [24] L. Mansilla Pérez, M. Ruiz Ruiz, "Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster", Univ. Lima. Perú. Rep. téc. 27, 2009.
- [25] Mexpolímeros, (s.f.). "Extensores de cadena - Mexcrys". [En linea]. Disponible en

<https://www.mexpolimeros.com/extensores%20de%20cadena.html>

- [26] GRANTA, (2018). “PE-HD (general purpose, molding & extrusion)”, Softw. CES EDUPACK 2018.
- [27] GRANTA, (2018). “PP (homopolymer, low flow”, Softw. CES EDUPACK 2018.
- [28] Poliestireno PS- polímero base – Estructplan (s.f.). [En línea]. Disponible en <https://estructplan.com.ar/producciones/p-coleccionable/poliestireno-ps-polímero-base/>
- [29] Trituración de plástico - Gestión de residuos - Soluciones Globales para el Reciclaje (2015). [En línea]. Disponible en <https://www.recytrans.com/blog/trituracion-de-plastico/>
- [30] J. E. Medina García, C. E. Saldaña Durán, V. M. Hernández Ramón, y S. Becerra Anzaldo, (2011). “Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de Tereftalato (PET)”. [En linea]. Disponible en [http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de Tereftalato \(PET\).pdf](http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Diseño%20de%20una%20trituradora%20para%20plástico%20Polietileno%20de%20Tereftalato%20(PET).pdf)
- [31] Tritotutto, (s.f.). “Trituradoras de 4 arboles: Modelo 2566 | TRITOTUTTO - Molino - Molinos”. [En línea]. Disponible en: <http://www.tritotutto.com/es/trituradoras-de-4-arboles/trituradoras-de-4-arboles-modelo-2566>. Consultado en: Mar. 19,2019.
- [32] “Cuchillas para plásticos : Pilana”. (s.f.). [En línea]. Disponible en: <http://www.pilana.com/es/cuchillas-para-plasticos>. Consultado en: May 17, 2019.
- [33] Maquinaria y Equipos, “criba para molino de plastico”. (s.f.). [En línea]. Disponible en: [http://maquinariayequipos.com/index.php?option=com\\_virtuemart&view=productdetails&virtuemart\\_product\\_id=1258&virtuemart\\_category\\_id=12](http://maquinariayequipos.com/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=1258&virtuemart_category_id=12). Consultado en: May. 17,2019.

- [34] F. Díaz del Castillo Rodríguez. "Conformado de materiales plásticos", U. Nacional Autónoma de México., Cuautitlán Izcalli, México. Rep téc. 2012. [En línea]. Disponible en: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/conformado\\_de\\_plasticos.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/conformado_de_plasticos.pdf)
- [35] TEMA 5. INYECCIÓN, (s.f.). [En línea]. Disponible en: <http://iq.ua.es/TPO/Tema5.pdf>. [Consultado: 29-dic-2018].
- [36] ¿Qué es la inyección de plásticos? | Servicios, (s.f.). [En línea]. Disponible en: <http://ppi.com.mx/Servicios/que-es-la-inyeccion-de-plasticos.html>
- [37] GRANTA, "Glass Temperature", Softw. CES EDUPACK 2018.
- [38] M. Sepe, (2018, Nov. 28). "The Importance of Melt & Mold Temperature: Plastics Technology". [En linea]. Disponible en <https://www.ptonline.com/columns/the-importance-of-melt-mold-temperature>.
- [39] GRANTA, "Melting point" , Softw. CES EDUPACK 2018.
- [40] GRANTA, (2018). "PET (unfilled, amorphous)". Softw. CES EDUPACK 2018.
- [41] GRANTA, (2018). "PS ( general purpose , 'crystal')". Softw. CES EDUPACK 2018.
- [42] J. E. López Conde, (2016). "Nota de futuro 2/2016 Impresoras 3D". [En linea]. Disponible en [https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local\\_repository/documents/17854.pdf](https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf)
- [43] A. Ben-Ner y E. Siemsen, (2017). "Decentralization and Localization of Production: The Organizational and Economic Consequences of Additive Manufacturing (3D Printing)". [En linea]. Disponible en <https://doi.org/10.1177/0008125617695284>
- [44] G. T. Mecánica, (s.f.). "Rugosidad superficial". [En línea]. Disponible en <http://www3.fimdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>.

- [45] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, vol. , 5a ed. México: Mc Graw Hill, 2012. Cap. 4 - 10, pp. 53 - 183. 2013.
- [46] Hammer Crusher, (s.f.). [En línea]. Disponible en: <https://www.arbasports.be/products/hammer-crusher.html>. [Consultado: 19-mar-2019].
- [47] Tritotutto, (s.f.). "Trituradoras Mono-Arbol: Modelo MR 17-40 (NEW model!) | TRITOTUTTO - Molino - Molinos". [En línea]. Disponible en <http://www.tritotutto.com/es/trituradoras-mono-arbol/trituradoras-mono-arbol-modelo-mr-17-40-new-model>
- [48] M. Cervera Ruiz y E. Blanco Díaz, "Mecánica de estructuras Libro 1 Resistencia de materiales", vol. 1, 2 ed. Barcelona, España: CPET, 2002, cap. 1, secc. 2, p. 2. [En línea]. Disponible en: [http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mecánica\\_de\\_estructuras\\_I\\_Resistencia\\_de\\_Materiales.pdf](http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mecánica_de_estructuras_I_Resistencia_de_Materiales.pdf)
- [49] D. Hakkens, (s.f.). "Calculations Required for Shredder – Dave Hakkens". [En línea]. Disponible en: <https://davehakkens.nl/community/forums/topic/calculations-required-for-shredder/>. [Consultado: 20-mayo-2019].
- [50] V. P. Linares Uculmana, "Estudio de los tipos de accionamiento para el transporte de cajas de gaseosas en la línea 140 - Corporación J.R. Lindley", pasantía, ing. mecatrónica, U. Nal. de Ingeniería, Lima, Perú, 2010.
- [51] F. Mesiano, F., Severini, A., & Pasquero, (2017). "Felfil -evo- Basic Kit Manual". [En línea]. Disponible en: [https://felfil.com/Felfil-Evo\\_Manual\\_Kit\\_base.x98559.pdf?v=42983b05e2f2](https://felfil.com/Felfil-Evo_Manual_Kit_base.x98559.pdf?v=42983b05e2f2).
- [52] Qué son y cómo funcionan las termocuplas. ARIAN Control & Instrumentation. Sant. Chile, Chile. Rep. téc. no. 2. (s.f.). [En línea]. Disponible en: <http://www.arian.cl>
- [53] 1.6. Potencia en sistemas trifásicos, (s.f.). [En línea]. Disponible en: [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3020/html/16\\_potencia\\_en\\_sistemas\\_trifasicos.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3020/html/16_potencia_en_sistemas_trifasicos.html).

- [54] M. Bossi, D. Matich, y J. M. Pignani, (2000). “Difusión de los productos de combustión del PVC (Policloruro de vinilo) en la atmósfera”. [En línea]. Disponible en [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5\\_anio/orientadora2/monografias/mjd\\_info.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora2/monografias/mjd_info.pdf)
- [55] Filamento para impresora 3d: ¿Como diferenciar el bueno del malo? - impresoras3d.com, (2017, Ene 02). [En línea]. Disponible en <https://www.impresoras3d.com/filamento-para-impresora-3d-como-diferenciar-el-bueno-del-malo/>

## ANEXOS

## Anexo A. Diagrama QFD.

Nivel de sonido		Correlation Codes													
Potencia eléctrica consumida		+	Very Positive												
Número de operaciones para manejo			Positive												
Tiempo de transformación de plástico		-	Negative												
Tiempo de instalación			dwn	dwn	dwn	dwn	dwn	dwn	up	up	dwn	dwn	up	dwn	
Tiempo de mantenimiento															
Distancia entre usuario y zonas de riesgo															
Rango de temperatura de trabajo															
Número de piezas de la máquina															
Dimensiones del producto															
Peso del producto															
Días de trabajo antes de una falla															
Peso de residuos en el proceso															
Customer Requirements		Customer Weights		Engineering Metrics											
Fácil uso y manipulación		9		Nivel de sonido		Potencia eléctrica consumida		Número de operaciones para manejo		Tiempo de transformación de plástico		Tiempo de instalación		Tiempo de mantenimiento	
Bajo costo		3		3		9		1		3		3		3	
Replicable		3		1		1		3		3		3		3	
Productor mínimo de residuos		9		3		3		1		1		3		3	
Veloz		3		3		9		3		3		3		3	
Consumidor bajo de energía eléctrica		9		9		3		9		1		1		1	
Seguro		9		1		1		3		9		3		3	
Semiautomático		1		3		9		3		9		3		3	
Dimensiones pequeñas		1		3		9		3		1		1		3	
Fácil instalación		9		3		9		9		3		3		1	
Fácil mantenimiento		9		3		9		9		3		1		1	
Robusto		3		3		1		1		3		9		3	
Resistente a trabajos cíclicos		3		1		1		3		3		9		3	
Technical Targets		Customer Perception												I Worse	
Technical Benchmarking		Better	5	< 85 dB		< 10 kW/h		< 25 op.		< 2 h		< 15 cm		200 - 300 °C	
		4	C	AB		DE		A		BC		ABC		< 200 piezas	
		3	A	B		C		C		B		CD		A	
		2	BC	A		DE		CD		CD		D		B	
		1	DE	DE		E		E		E		DE		C	
														E AD B C	
														DE AB C	
														E D ABC	
														C DE B A	
														DE C AB	
														DE A B C	
														C AB D E	
														DE ABC	

**Anexo B. Matrices de comparación métricas generales, componentes subsistemas.**

**a) Métricas generales vs Componentes de extrusor**

System Engineering Metrics	Weights	Subsistema Extrusor							
		Potencia eléctrica requerida	Temperatura del extrusor	Nivel de vibración	Peso del sistema	Cantidad de conexiones	Tiempo de estabilización de temperatura	Tiempo de activación de reles	Velocidad de extrusión
Nivel de sonido	1%			3				3	9
Potencia eléctrica consumida	10%	9			1	3			1
Número de operaciones para manejo	9%					1			3
Tiempo de transformación de plástico	9%	3	9				9	3	9
Tiempo de instalación	8%				1	9			
Tiempo de mantenimiento	10%				3	9			
Distancia entre usuario y zonas de riesgo	10%		9	1		1			
Rango de temperatura de trabajo	12%	3	9				3		3
Número de piezas de la máquina	7%	1		1	9	9			
Dimensiones del producto	6%			3	3				
Peso del producto	4%	1		3	9				
Días de trabajo antes de una falla	6%		9	3					1
Peso de residuos en el proceso	7%		1						3
<b>Raw Score</b>		1,64	3,43	0,7	1,68	2,79	1,17	0,31	1,91
<b>Normalized Score</b>		12%	25%	5%	12%	20%	9%	2%	14%

## b) Métricas generales vs Componentes trituradora

		Subsistema Triturado								
System Engineering Metrics		Weights	Velocidad de triturado	Potencia eléctrica requerida	Cantidad de plástico recibido	Peso del sistema	Dimensión de producto triturado	Tiempo procesamiento señales	Dimensiones de la trituradora	Par mecánico requerido
Nivel de sonido	1%	9								3
Potencia eléctrica consumida	10%		9					3		3
Número de operaciones para manejo	9%							3		
Tiempo de transformación de plástico	9%	9		9		3		3	9	
Tiempo de instalación	8%				9	3		3		
Tiempo de mantenimiento	10%		1		9			3		
Distancia entre usuario y zonas de riesgo	10%			3		3		9	1	
Rango de temperatura de trabajo	12%									1
Número de piezas de la máquina	7%	1		1	3				9	
Dimensiones del producto	6%				3	3		3		
Peso del producto	4%				9			3	1	
Días de trabajo antes de una falla	6%	3	1	3		1	1			3
Peso de residuos en el proceso	7%	1		9		3				3
<b>Raw Score</b>		1,25	1,06	1,97	2,42	1,27	0,63	2,7	1,8	
<b>Normalized Score</b>		9%	8%	15%	18%	10%	5%	21%	14%	

### c) Métricas de extrusión vs Componentes extrusora.

## PHASE II QFD Subsystem

Subsystem Name: *Subsistema Extrusor*

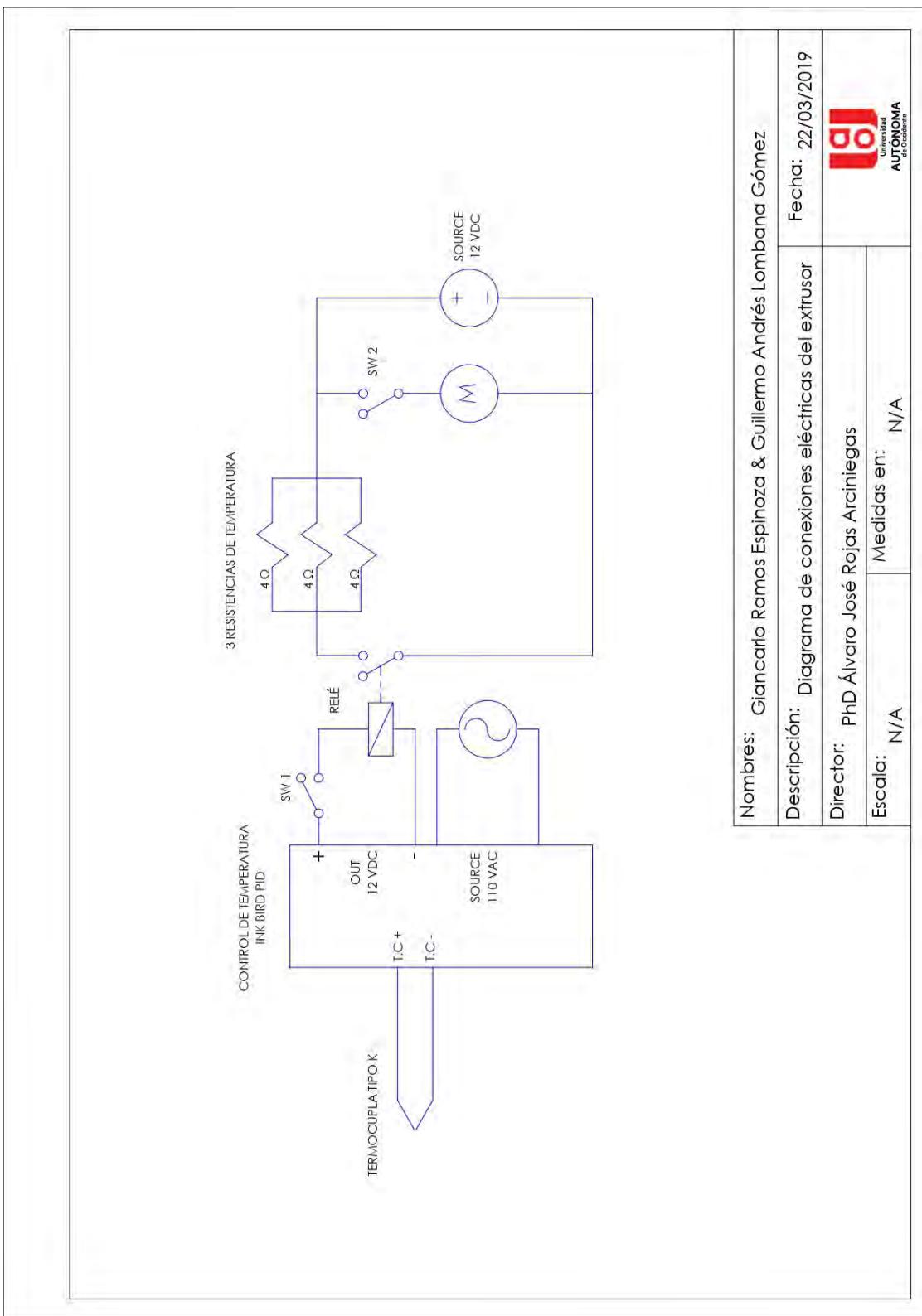
**d) Métricas triturado vs Componente trituradora.**

**PHASE II QFD Subsystem**

Subsystem Name: **Subsistema Triturado**

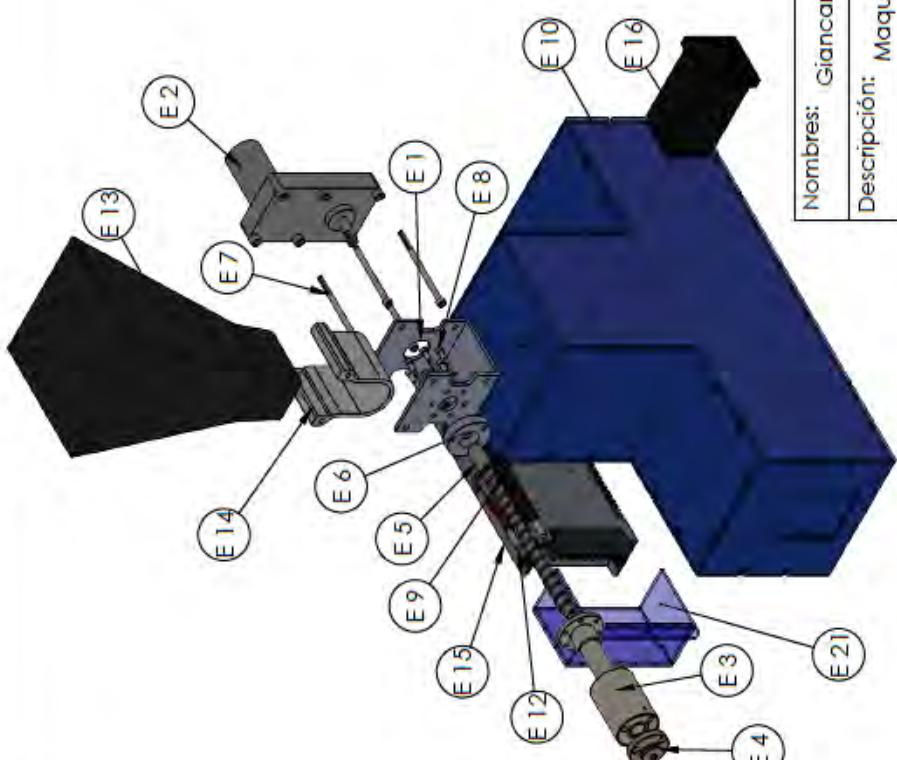
		Part Characteristics							
		Phase I Relative Weights							
Subsistema Triturado		Carcasa extrusora	Cuchillas de corte	Eje	Motor	Tamiz	Tolva recepción material	Tapa extrusora	Fuente de poder
Velocidad de triturado	9%	3	3	9					3
Potencia electrica requerida	8%			3					9
Cantidad de plástico recibido	15%	1					9	1	
Peso del sistema	18%	9			9		1	1	3
Dimensión de producto triturado	10%		3			9			
Tiempo procesamiento señales	5%								3
Dimensiones de la trituradora	21%	9			3		1	3	3
Par mecánico requerido	14%		1	3	9				3
	<b>Raw score</b>	4% 1,4	4% 1,1	2% 0,8	14% 4,3	6% 1,8	2% 0,6	1% 0,2	12% 3,7
	<b>Relative Weight</b>								

### Anexo C. Diagrama eléctrico de sistema de control de temperatura.



## Anexo D. Planos sistema de extrusión.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
E 1	Base	1
E 2	Motor-reductor DC	1
E 3	Cilindro calefactor	1
E 4	Boquilla 1.75 mm	1
E 5	Husillo sin fin	1
E 6	Teflón cerámico	1
E 7	Tornillo 25 mm M4	4
E 8	Tornillo 8 mm M4	6
E 9	Tuerca Hex M4	6
E 10	Frame de extrusora	1
E 11	cartuchos	3
E 12	Tolva dosificadora	1
E 13	Base de la tolva	1
E 14	Fuente S-350-60	1
E 15	Controlador PID	1
E 16	Tapa borneras fuente	1
E 21		



Nombres: Giancarlo Ramos Espinoza & Guillermo Andrés Lombana Gómez

Descripción: Maquina Extrusora

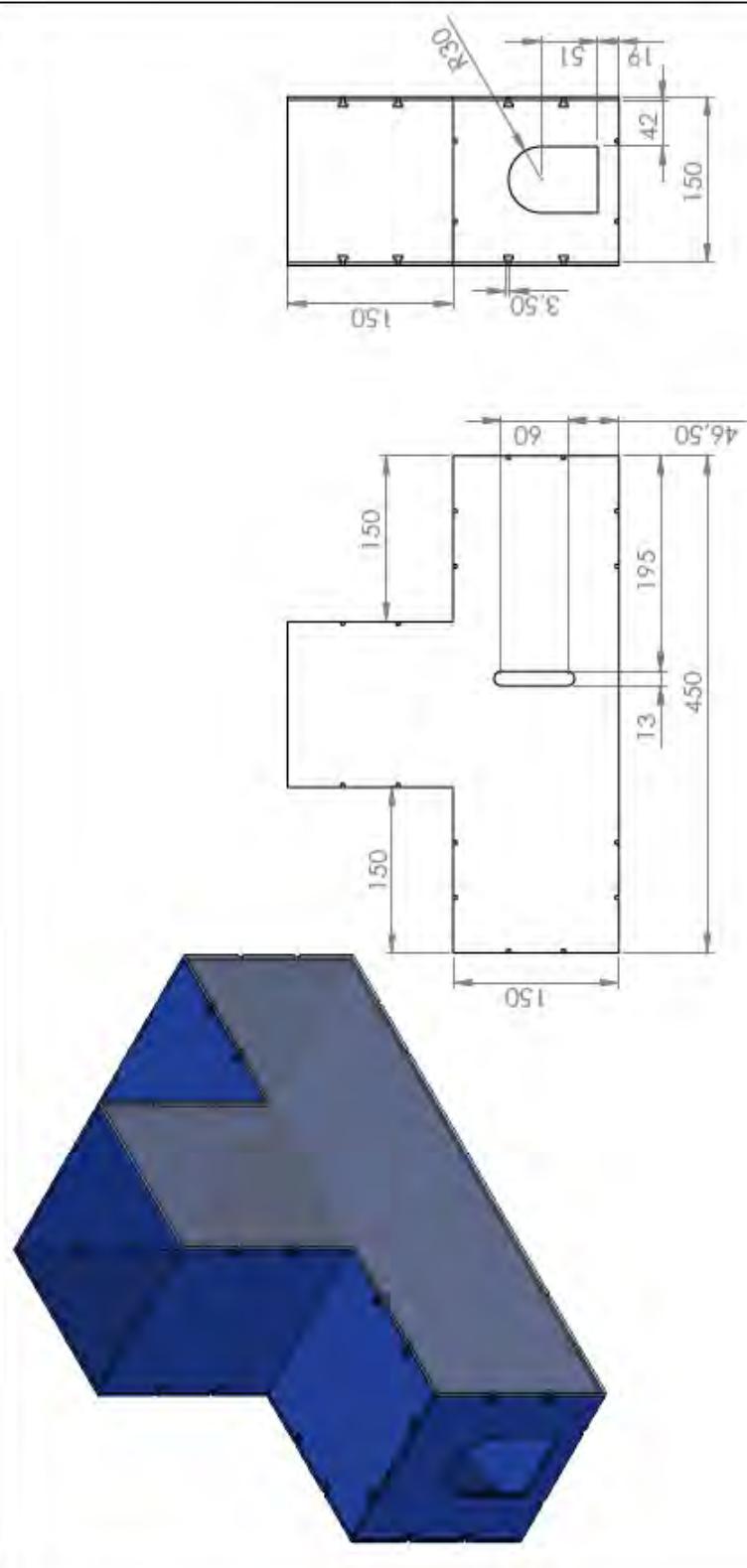
Director: PhD Álvaro José Rojas Arciniegas

Escala: 1 : 10

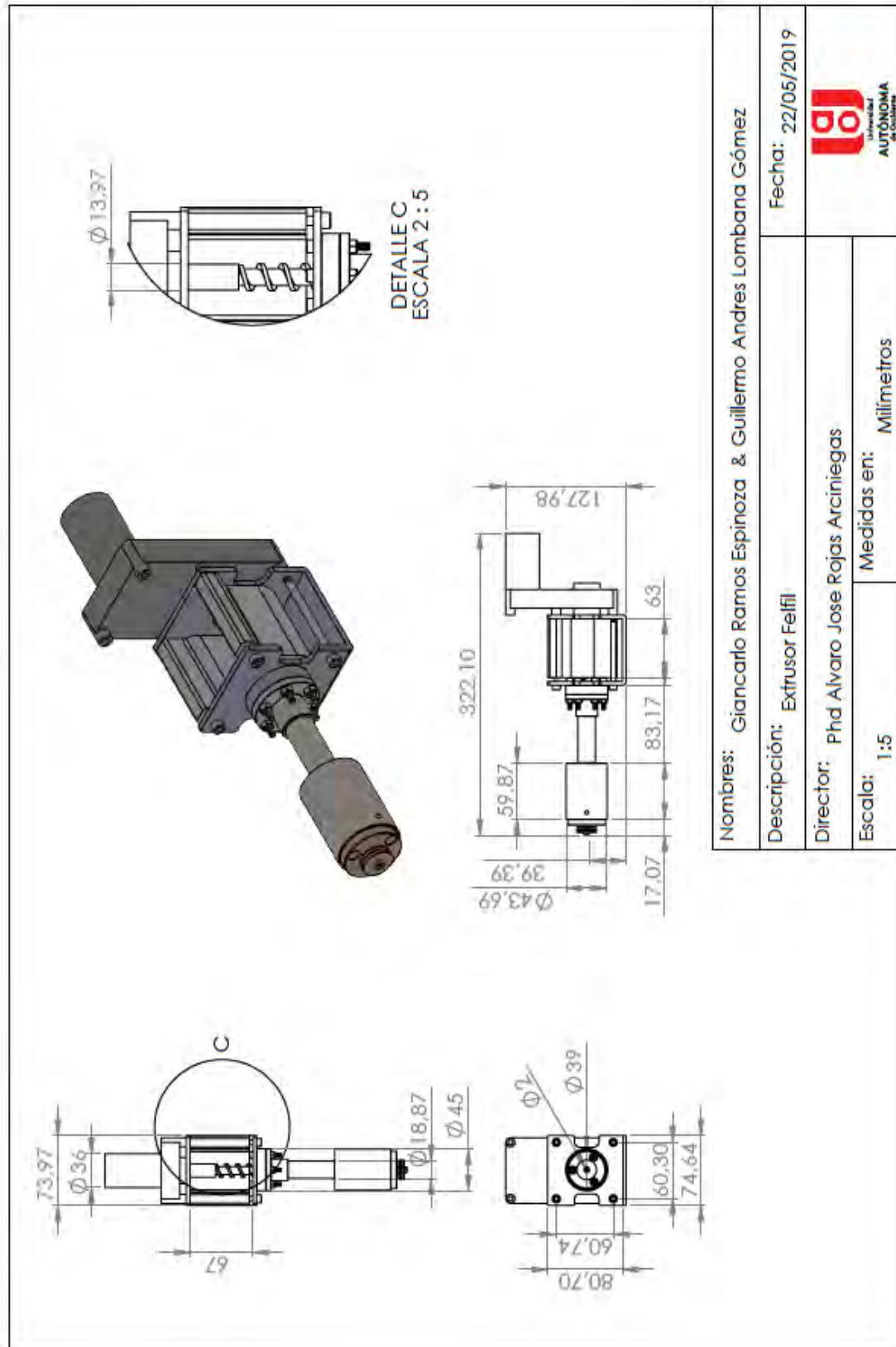
Medidas en: Milímetros

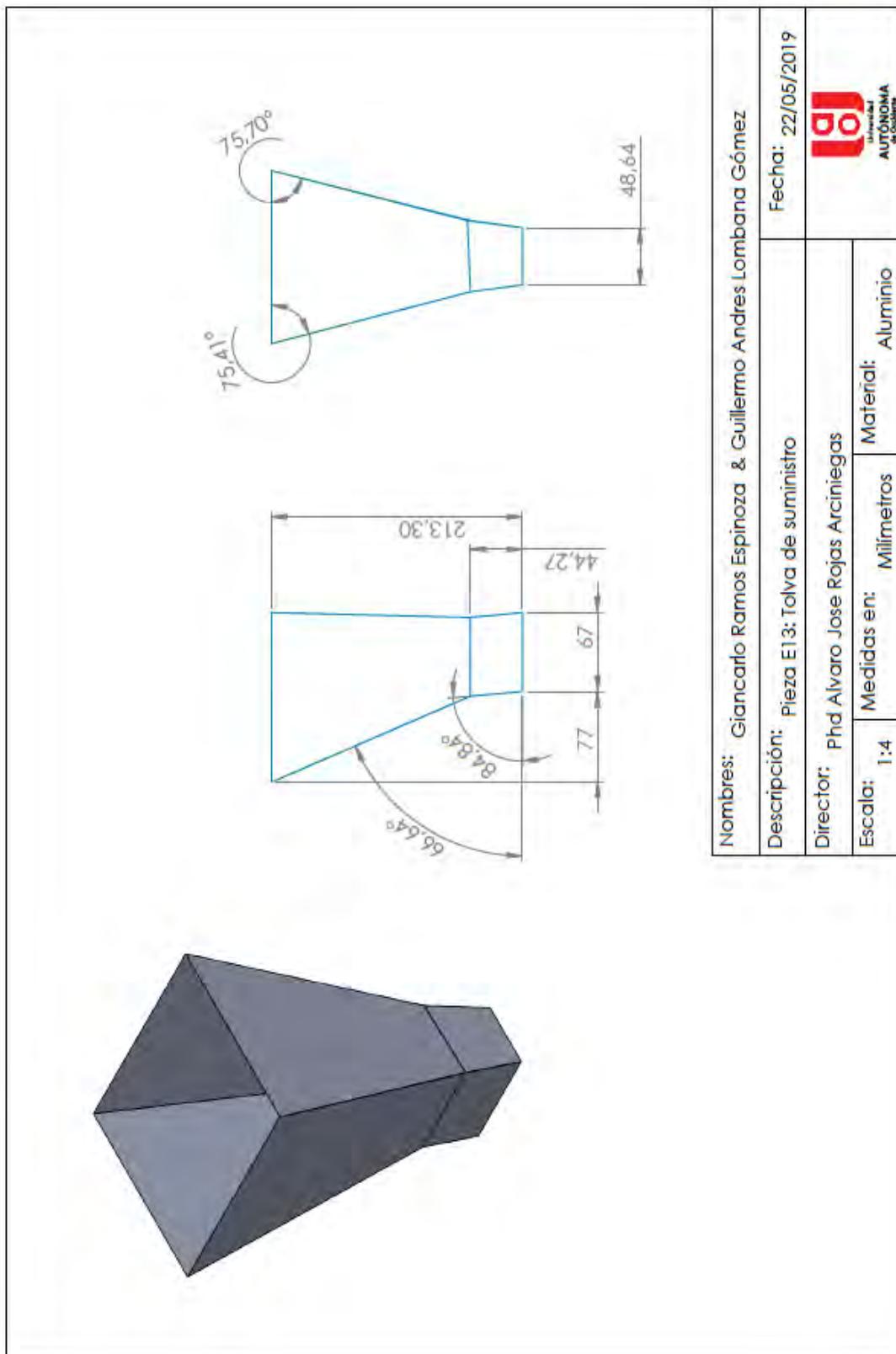
Fecha: 22/03/2019

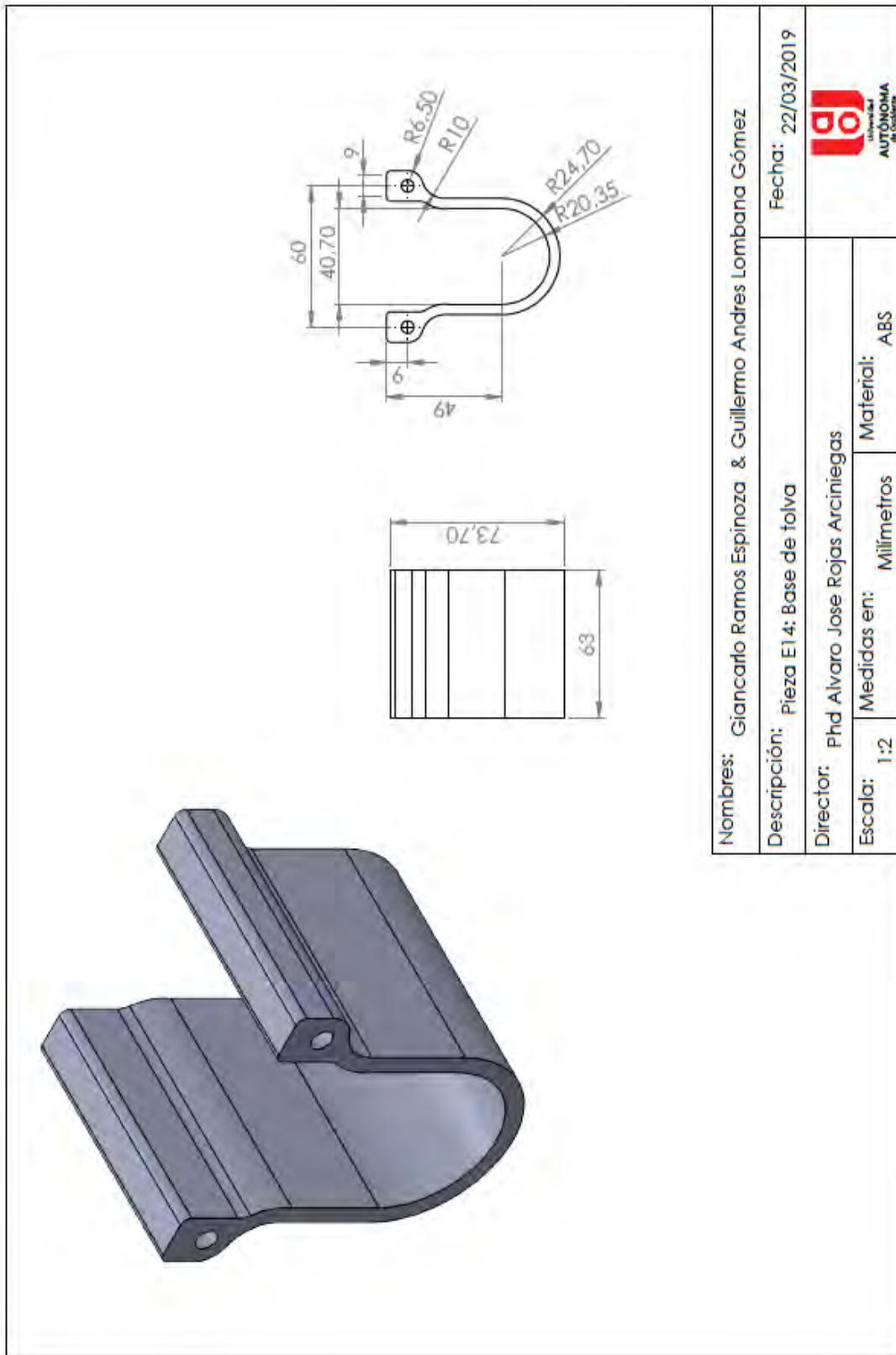
Universidad  
AUTÓNOMA  
de  
Oaxaca



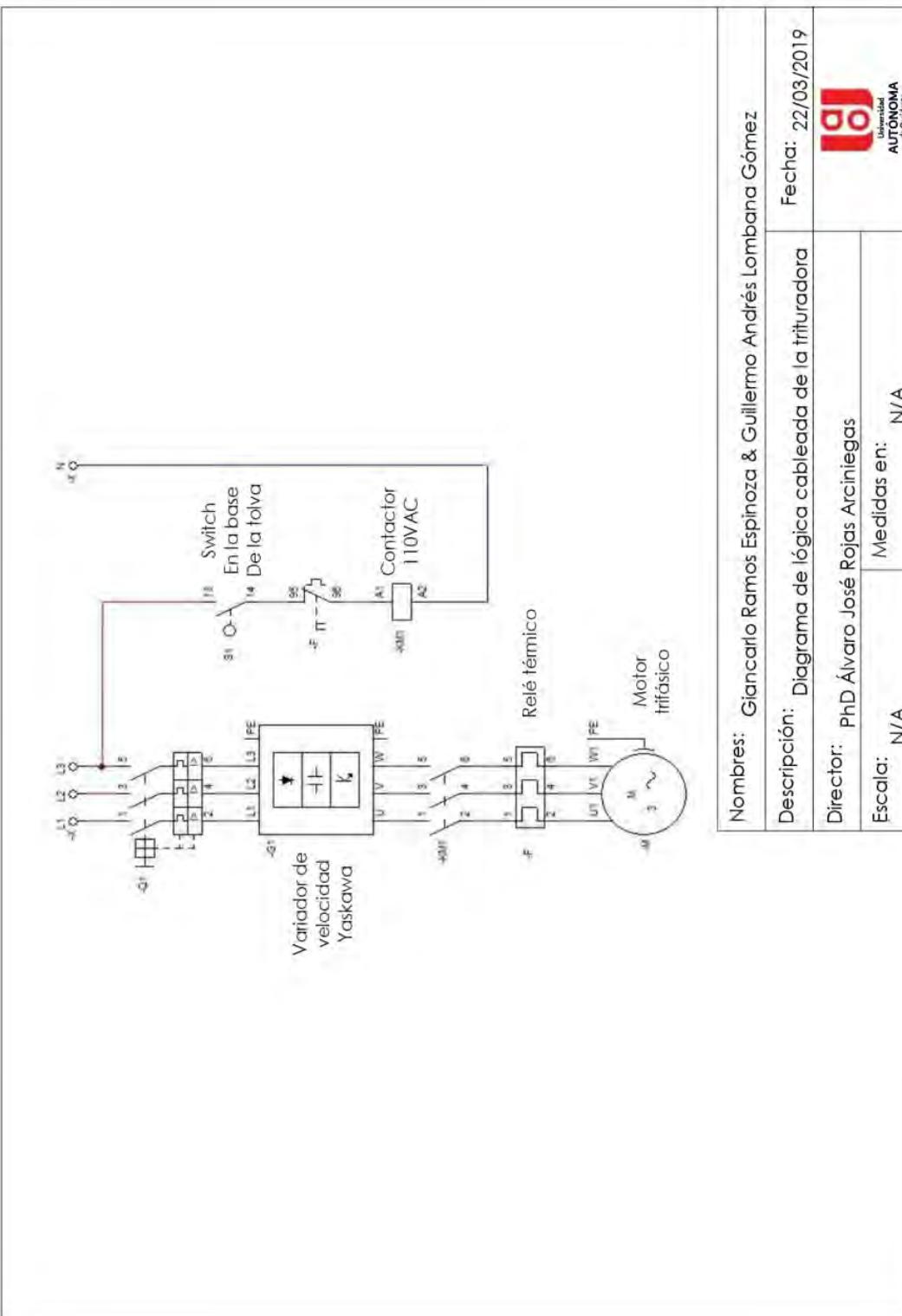
Nombres: Giancarlo Ramos Espinoza & Guillermo Andres Lombana Gómez	Fecha: 22/05/2019
Descripción: Ensamble E10 Frame de la extrusora	
Director: Phd Alvaro Jose Rojas Arciniegas	
Escala: 1:5	Medidas en: Milímetros
	Material: MDF / Acrílico







## **Anexo E. Esquema electrónico de control por lógica cableada sistema de triturado.**



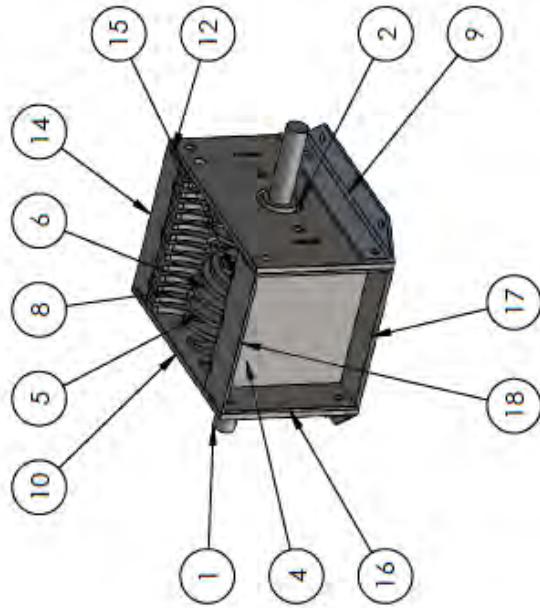
## Anexo F. Planos de trituradora.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN / \$	CANTIDAD
T 1	Trituradora	Máquina de acción de triturado	1
T 2	Rodamientos	\$16.000	2
T 3	Acople	Une el eje de la trituradora con la caja reducadora, \$12.000	1
T 4	Tolva	Protección al usuario, \$62.000	1
T 5	Tornillo M9 x 184 mm	\$3.000	6
T 6	Tuerca 9 mm	\$8.400	28
T 7	Base trituradora	Soporta la trituradora y la caja de reducción, \$25.000	1
T 9	Tornillo cabeza hex M9	\$2.000	4
T 10	Base del motor	Soporta el motor, \$26.000	1

Nombres: Giancarlo Ramos Espinoza & Guillermo Andrés Lombana Gómez  
 Descripción: Maquina Trituradora  
 Director: PhD Álvaro José Rojas Arciniegas  
 Escala: 1:5

Fecha: 22/05/2019  

 Universidad  
 AUTÓNOMA  
 DE GUADALAJARA



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Eje hexagonal	1
4	Cuchilla 1 5mm	5
5	Cuchilla 2 5mm	5
6	Cuchilla 3 5mm	4
8	Contracuchilla 6m	14
9	Ángulo 30x30x3	2
10	Placa 210x135x6	2
12	Placa lateral 3mm	2
14	Placa metálica 1	1
15	Placa metálica 2	2
16	Placa metálica 3	2
17	Placa metálica 4	1
18	Placa metálica 5	1

Nombres: Giancarlo Ramos Espinoza & Guillermo Andres Lombana Gómez

Descripción: Ensamblaje T1: Trituradora

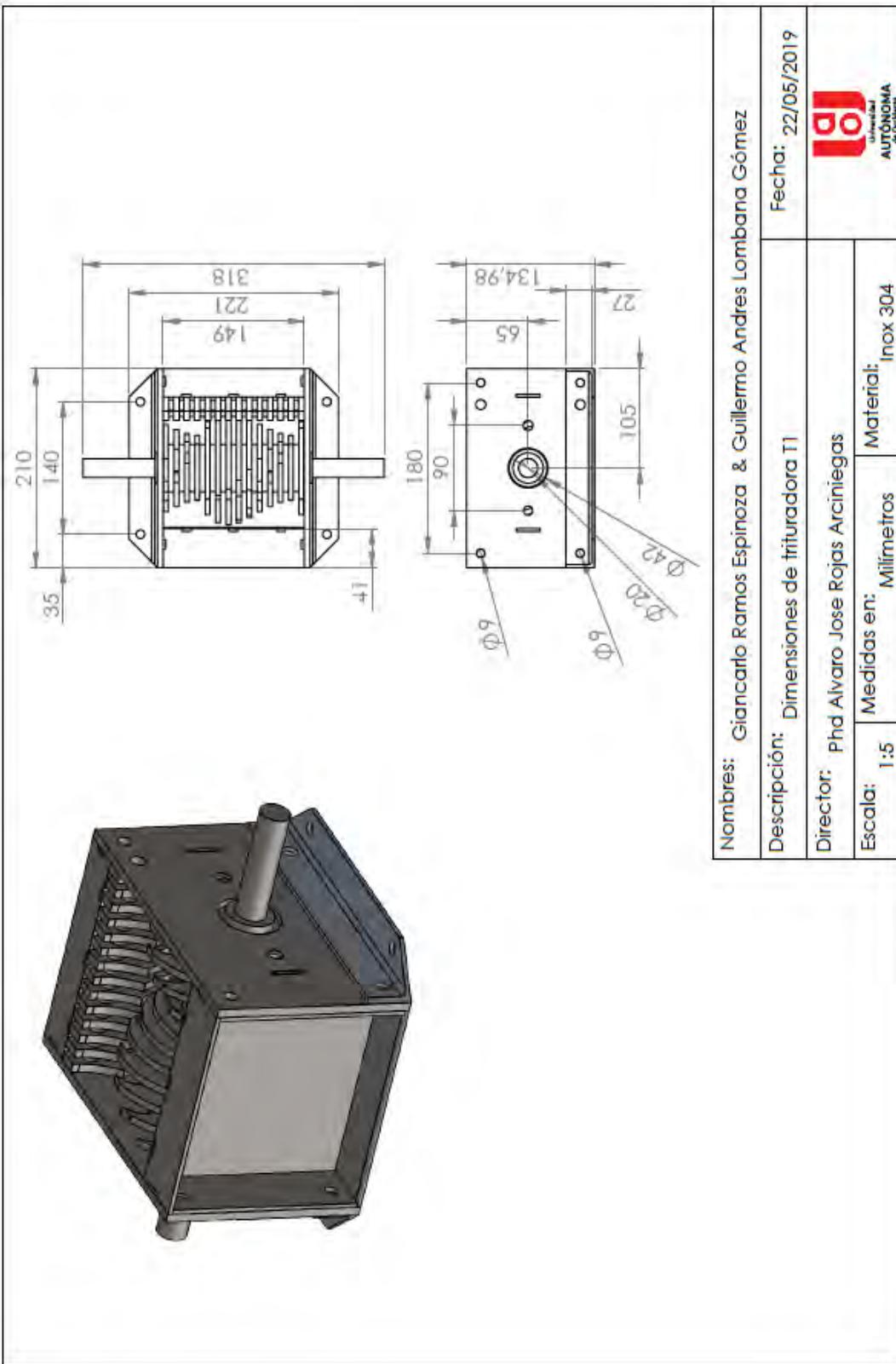
Fecha: 22/05/2019

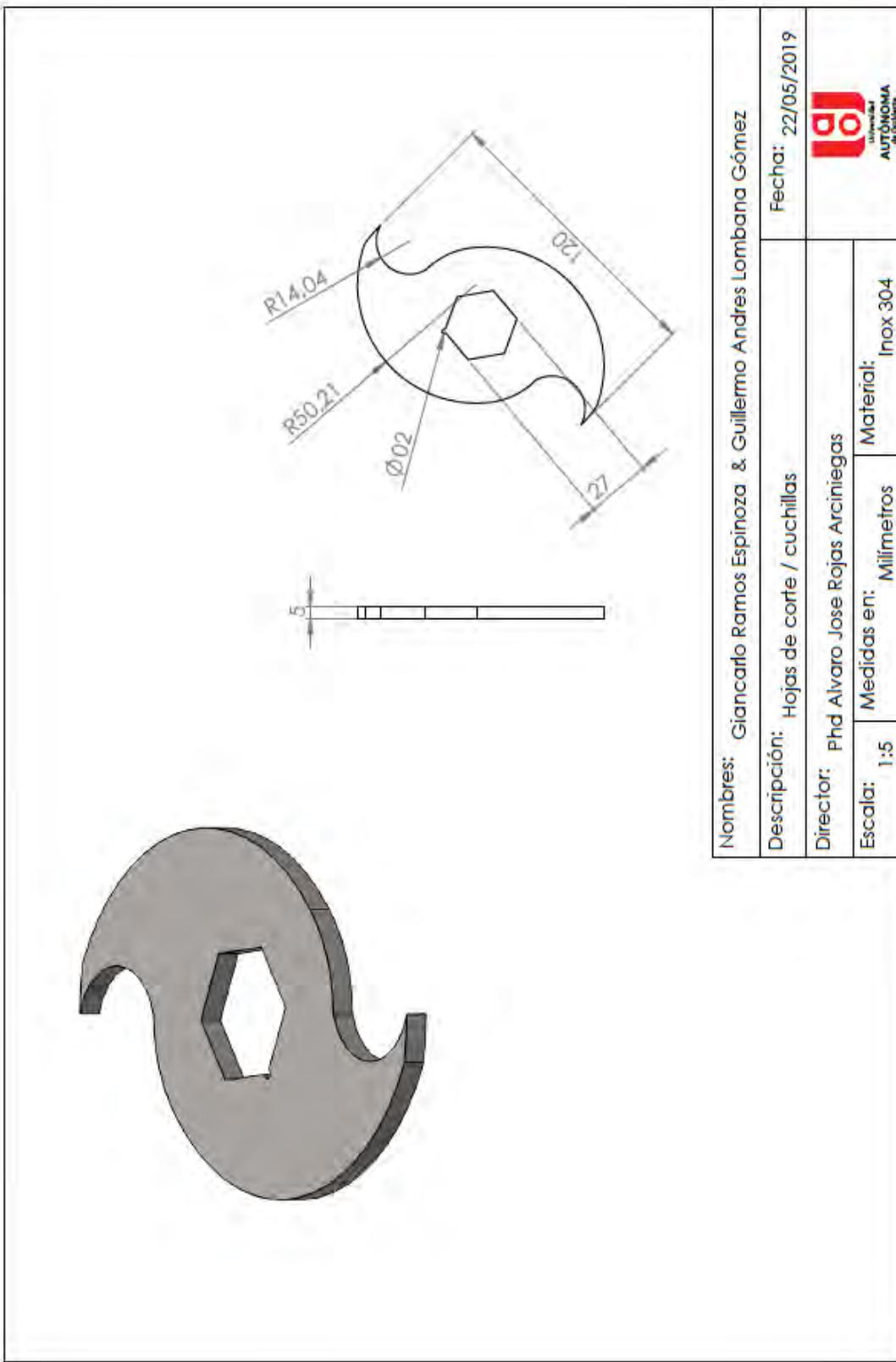
Director: Phd Alvaro Jose Rojas Arciniegas

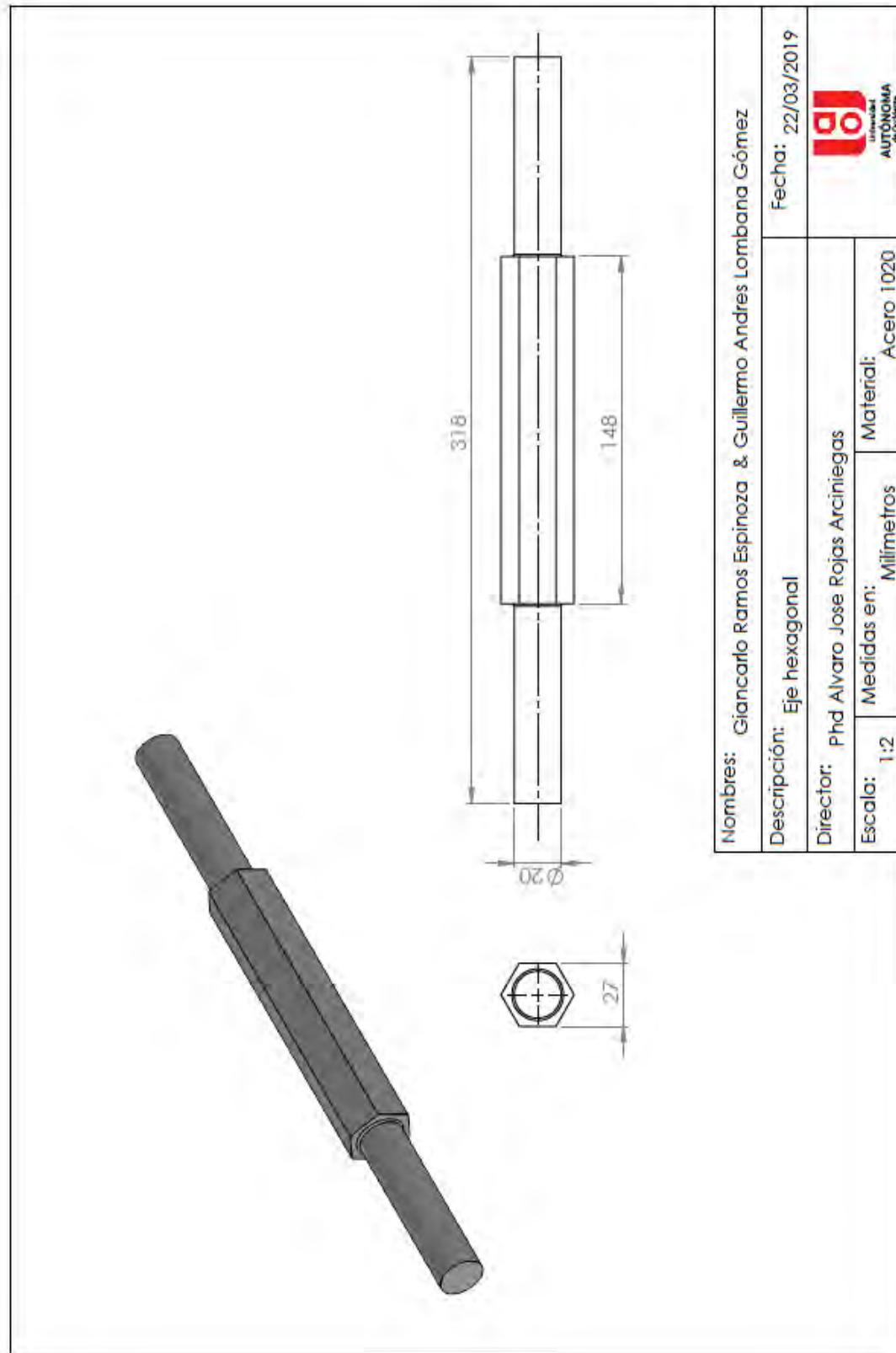


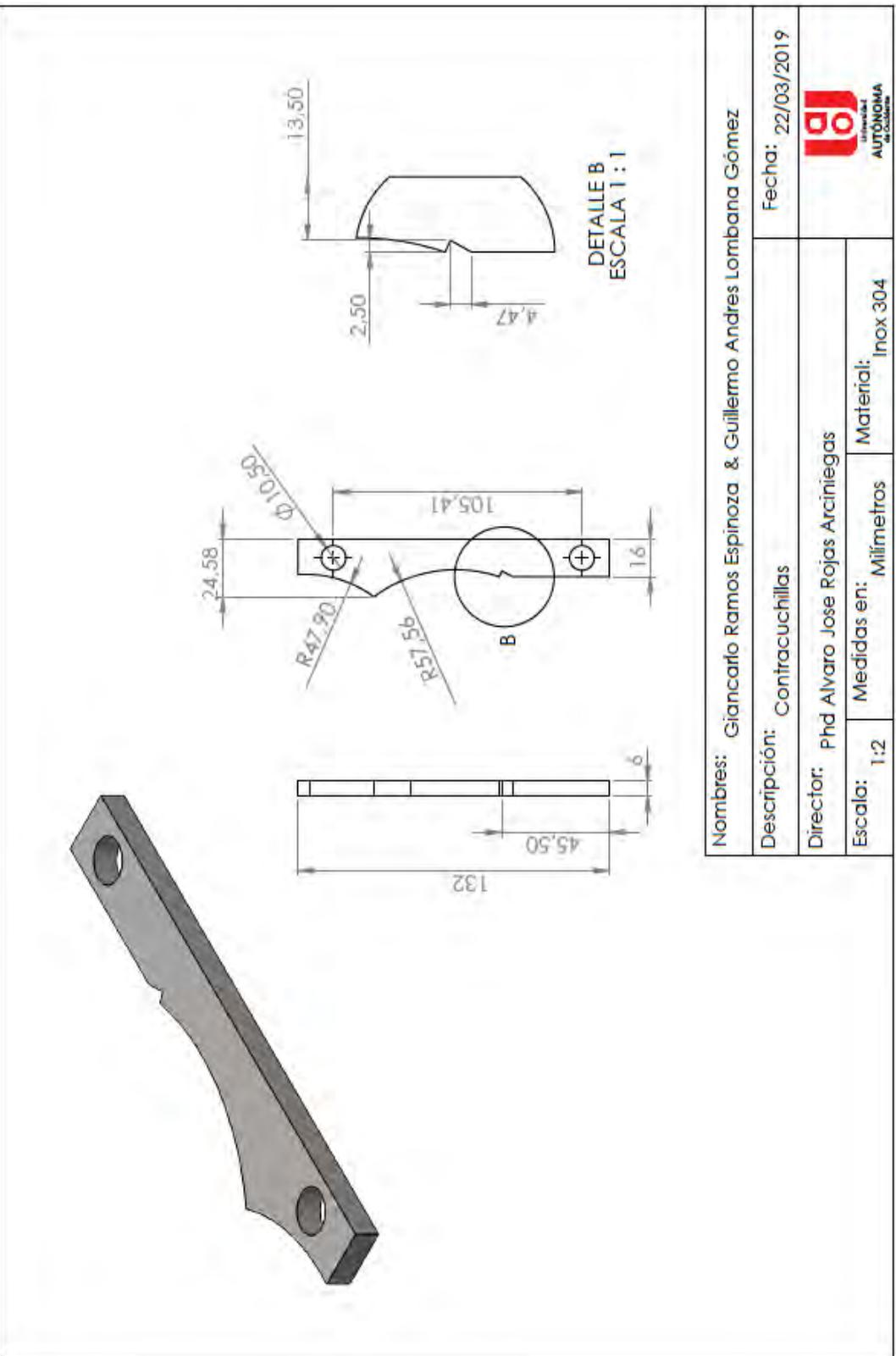
Universidad  
AUTÓNOMA  
de Coahuila

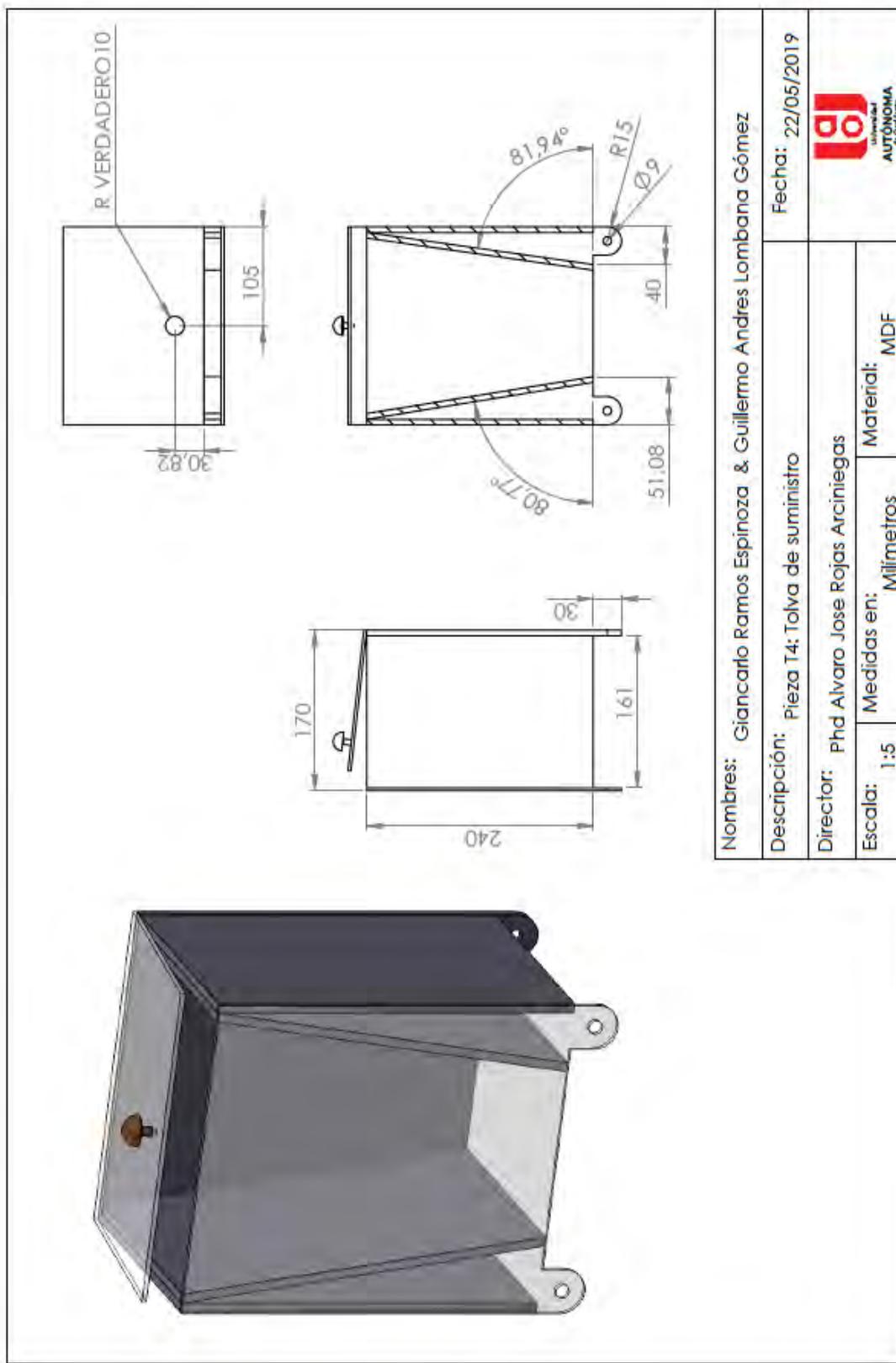
Escala: 1.5      Medidas en: Milímetros      Material: Inox 304

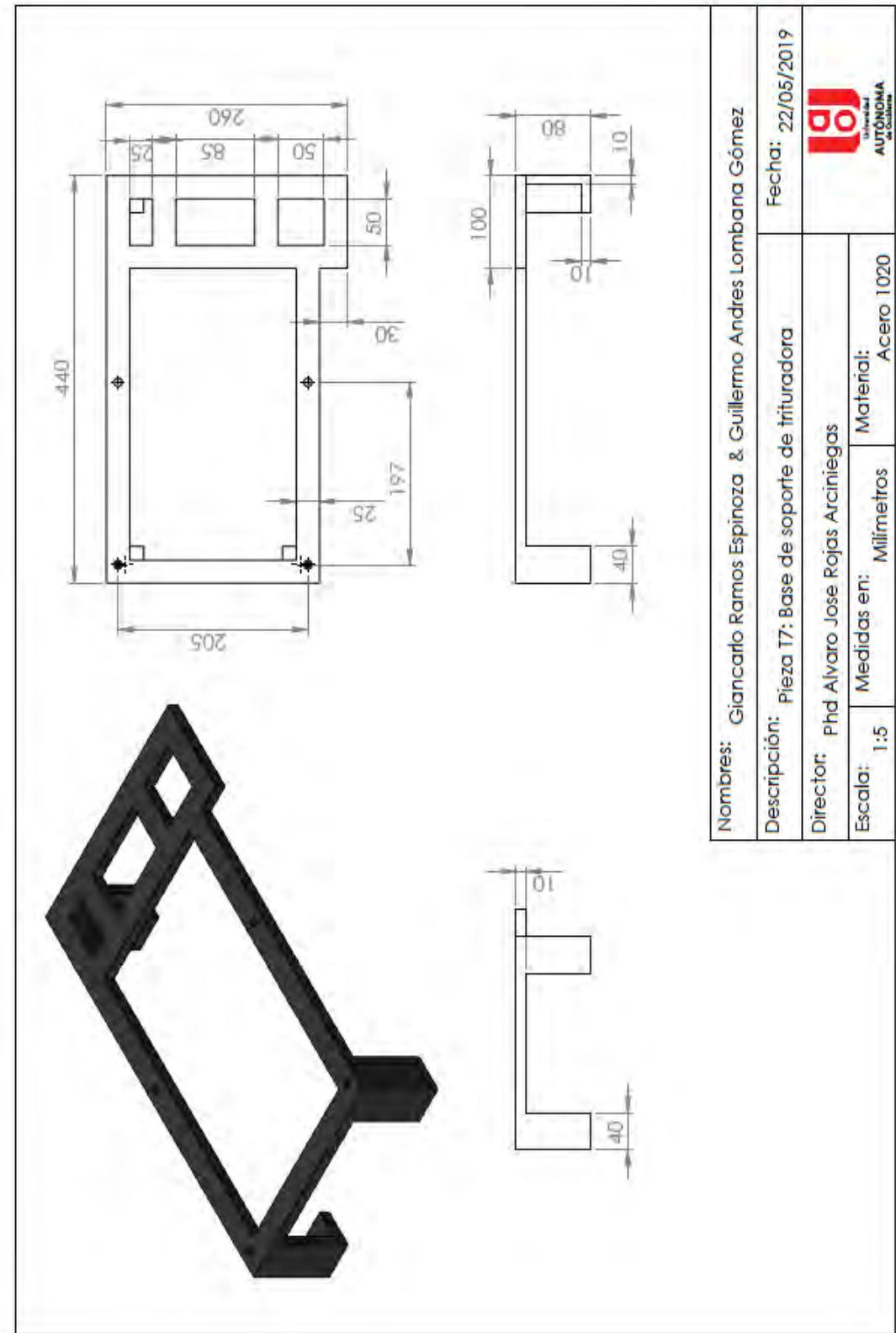


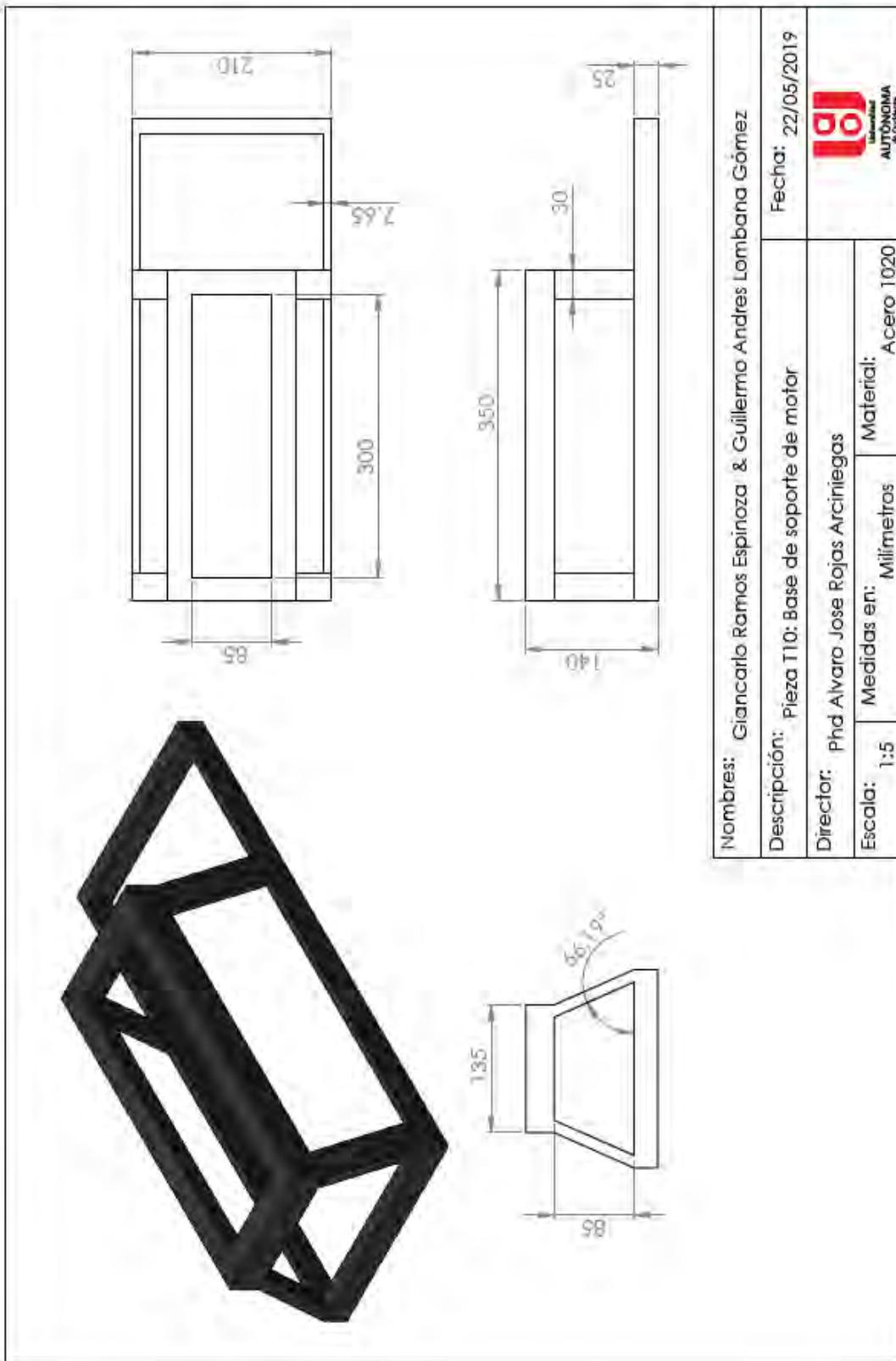














## Anexo G. Diagrama de conexiones electrónica sistema enrollado.

