



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE FILAMENTO A  
PARTIR DE BOTELLAS PLÁSTICAS PARA EL USO EN IMPRESIÓN  
3D**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Mecatrónica

**AUTORES:** Erick Gabriel Gaibor Rivera  
Antonio Valentín Loja Viteri  
**TUTOR:** Ing. David Mateo Cortez Saravia MSc.

Guayaquil - Ecuador  
2024

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Erick Gabriel Gaibor Rivera** con documento de identificación N° **0940233398** y **Antonio Valentín Loja Viteri** con documento de identificación N° **0927740381**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

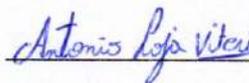
Guayaquil, 3 de abril del año 2024

Atentamente,



---

Erick Gabriel Gaibor Rivera  
0940233398



---

Antonio Valentín Loja Viteri  
0927740381

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Erick Gabriel Gaibor Rivera** con documento de identificación N° **0940233398** y **Antonio Valentín Loja Viteri** con documento de identificación N° **0927740381**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **DESARROLLO DE SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE FILAMENTO A PARTIR DE BOTTELLAS PLÁSTICAS PARA EL USO EN IMPRESIÓN 3D**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo a final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

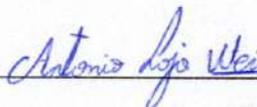
Guayaquil, 3 de abril del año 2024

Atentamente,



---

Erick Gabriel Gaibor Rivera  
0940233398



---

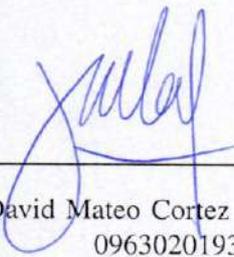
Antonio Valentín Loja Viteri  
0927740381

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **David Mateo Cortez Saravia**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE FILAMENTO A PARTIR DE BOTELLAS PLÁSTICAS PARA EL USO EN IMPRESIÓN 3D**, realizado por **Erick Gabriel Gaibor Rivera** con documento de identificación N° **0940233398** y por **Antonio Valentín Loja Viteri** con documento de identificación N° **0927740381**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 3 de abril del año 2024

Atentamente,



---

Ing. David Mateo Cortez Saravia, MSc.  
0963020193

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a mi amada madre, María, con su apoyo y sacrificio ha sido la fuente inagotable de mi superación tanto personal como profesional. A través de sus enseñanzas y ejemplo, he encontrado la fuerza para perseguir mis sueños y alcanzar mis metas. A mis tías, primos y hermanos por creer en mí incondicionalmente y por ser mi constante inspiración. Este trabajo de titulación es el resultado de su amor y apoyo, y lo dedico con profundo agradecimiento y cariño.

**Erick Gabriel Gaibor Rivera**

A mis queridos padres, quienes siempre han confiado en mí y han brindado un apoyo inquebrantable en cada etapa de mi trayectoria universitaria; a mis estimados profesores, cuya dedicación por impartir conocimiento ha sido una fuente constante de inspiración; y a mis entrañables compañeros de clase, con quienes he compartido momentos de aprendizaje inolvidables y vínculos de amistad inquebrantable.

**Antonio Valentín Loja Viteri**

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia por su apoyo incondicional y amor constante. Agradezco a mis amigos por su ánimo y comprensión. A mi tutor por su guía experta y paciencia. Agradezco también a todas las personas e instituciones que contribuyeron de alguna manera a la realización de esta tesis.

**Erick Gabriel Gaibor Rivera**

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana por otorgarme la oportunidad de cursar la carrera de Ingeniería Mecatrónica y por el invaluable crecimiento personal y profesional que he experimentado durante estos años. Este trabajo no solo simboliza el fruto de mis esfuerzos académicos, sino también el reflejo del apoyo y la orientación brindada por tantas personas que han sido piezas fundamentales en mi travesía. A todos ustedes, les dedico con sinceridad este logro, acompañado de mi gratitud eterna.

**Antonio Valentín Loja Viteri**

## RESUMEN

En la impresión 3D, la generación de filamentos de alta calidad sigue siendo una necesidad de bajo costo y de bajo impacto ambiental. El estudio realizado se enfocó en diseñar, desarrollar y validar un sistema de extrusión de filamento para impresión en 3D a partir de botellas de plástico tipo PET. En la etapa de diseño se definió la estructura, elementos que componen el sistema y se modeló cada una de las partes en un programa CAD. El sistema de extrusión utiliza componentes no electrónicos y electrónicos, un sistema de corte, de calentamiento y enfriamiento, de bobinado y almacenamiento. Después de ajustar parámetros como la temperatura en el bloque caliente y de los rodamientos que cortan el plástico de las botellas en tiras longitudinales, se obtuvo un filamento de 1,75mm de acuerdo al estándar para la impresión 3D. En las pruebas de tracción realizadas, el PET reciclado obtuvo 25 % menos elasticidad y 13 % de mayor deformación en comparación con las probetas de PETG, lo cual está dentro de los parámetros admitidos, por lo que se demuestra la factibilidad del sistema.

**Palabras claves:** Botellas PET, extrusión, filamento, impresión 3D, termoplásticos.

## ABSTRACT

In 3D printing, the generation of high quality filaments remains a low cost and low environmental impact need. The study focused on designing, developing and validating a filament extrusion system for 3D printing from PET plastic bottles. In the design stage, the structure and elements that make up the system were defined and each of the parts were modeled in a CAD program. The extrusion system uses non-electronic and electronic components, a cutting, heating and cooling, winding and storage system. After adjusting parameters such as the temperature in the hot block and of the bearings that cut the plastic from the bottles into longitudinal strips, a 1.75mm filament was obtained according to the standard for 3D printing. In the tensile tests performed, the recycled PET obtained 25 % less elasticity and 13 % higher deformation compared to PETG specimens, which is within the admitted parameters, thus demonstrating the feasibility of the system.

**Keywords:** PET bottles, extrusion, extrusion, filament, 3D printing, thermoplastics, thermoplastic.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	12
<b>II.</b>	<b>PROBLEMA</b>	13
<b>III.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	14
<b>IV.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	15
IV-A.	Objetivo general . . . . .	15
IV-B.	Objetivos específicos . . . . .	15
IV-C.	Tabla de objetivos . . . . .	15
<b>V.</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	16
V-A.	Antecedentes teóricos . . . . .	16
V-B.	El reciclaje para la obtención de materia prima . . . . .	17
V-C.	Sistema de extrusión . . . . .	17
V-D.	Componentes del sistema de extrusión . . . . .	17
V-E.	El sistema de bobinado en la fabricación de filamento para impresión 3D . . . . .	18
V-F.	Tipos de sistemas de bobinado en la impresión 3D . . . . .	19
V-G.	Tipos de sistemas de extrusión . . . . .	19
V-H.	Filamentos en la impresión 3D . . . . .	21
V-I.	Diagrama de conexión . . . . .	22
V-J.	ISO 527- 2: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción . . . . .	22
V-K.	Impacto ambiental y económico . . . . .	23
V-L.	Programa de diseño CAD . . . . .	23
<b>VI.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	24
VI-A.	Elementos que componen el sistema . . . . .	24
VI-B.	Simulación del sistema de extrusión en programa de diseño CAD . . . . .	26
VI-C.	Ensamblado del sistema . . . . .	27
VI-D.	Configuración DRIVER TB6600 . . . . .	29
VI-E.	Elaboración de probetas . . . . .	29
<b>VII.</b>	<b>RESULTADOS</b>	31
VII-A.	Resultados del sistema de extrusión desarrollado . . . . .	31
VII-B.	Ensayos realizados a las probetas . . . . .	31
<b>VIII.</b>	<b>CRONOGRAMA</b>	36
<b>IX.</b>	<b>PRESUPUESTO</b>	37
<b>X.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	38
<b>XI.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	39
	<b>Referencias</b>	40
	<b>Anexo A: Diseños de estructura</b>	43
	<b>Anexo B: Pruebas de probetas PETG y PET Reciclado</b>	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Ejemplo de máquina extrusora [21]. . . . .	18
2.	Proceso de construcción 3D por deposición fundida [10]. . . . .	20
3.	Proceso de fabricación aditiva de extrusión por tornillo de fricción [24]. . . . .	20
4.	Extrusor tipo bowden [32]. . . . .	21
5.	Diagrama de conexión del controlador REX-100C [38]. . . . .	22
6.	Ensayo de tracción [41]. . . . .	22
7.	Elementos requeridos para la estructura . . . . .	24
8.	Elementos electrónicos requeridos del sistema Parte 1 . . . . .	25
9.	Elementos electrónicos requeridos del sistema Parte 2 . . . . .	25
10.	Caja de almacenamiento para bobinas de filamento . . . . .	26
11.	Diseño del sistema de corte . . . . .	26
12.	Ensamblado del sistema . . . . .	27
13.	Ensamblaje del prototipo . . . . .	28
14.	Plancha con los agujeros y medidas marcadas para hacer el dobléz . . . . .	29
15.	Probetas . . . . .	30
16.	Sistema de extrusión desarrollado . . . . .	31
17.	Prueba PETG - Winkle . . . . .	32
18.	Prueba 5 de Fuerza vs Desplazamiento PETG - Winkle . . . . .	32
19.	Prueba 5 de Tensión vs Deformación PETG - Winkle . . . . .	33
20.	Prueba 5. PET RECICLADO . . . . .	33
21.	Prueba 5 de Fuerza vs Desplazamiento PET Reciclado . . . . .	34
22.	Prueba 5 de Tensión vs Deformación PET Reciclado . . . . .	34
23.	Probetas después de pruebas de tracción . . . . .	35
24.	Base . . . . .	43
25.	Plancha 2 mm . . . . .	43
26.	Tapa frontal . . . . .	44
27.	Tapa posterior . . . . .	44
28.	Tapa lateral . . . . .	45
29.	Tubo cuadrado . . . . .	45
30.	Tapa lateral izquierda . . . . .	46
31.	Base superior . . . . .	46
32.	Barra redonda . . . . .	47
33.	Base Arduino Uno . . . . .	47
34.	Mesa de trabajo . . . . .	48
35.	Carcasa de ventilador 24v . . . . .	48
36.	Prueba 1. PETG - Winkle . . . . .	49
37.	Gráfico 1. Prueba 1. PETG - Winkle . . . . .	49
38.	Gráfico 2. Prueba 1. PETG - Winkle . . . . .	50
39.	Prueba 2. PETG - Winkle . . . . .	50
40.	Gráfico 1. Prueba 2. PETG - Winkle . . . . .	50
41.	Gráfico 2. Prueba 2. PETG - Winkle . . . . .	51
42.	Prueba 3. PETG - Winkle . . . . .	51
43.	Gráfico 1. Prueba 3. PETG - Winkle . . . . .	51
44.	Gráfico 2. Prueba 3. PETG - Winkle . . . . .	52
45.	Prueba 4. PETG - Winkle . . . . .	52
46.	Gráfico 1. Prueba 4. PETG - Winkle . . . . .	52
47.	Gráfico 2. Prueba 4. PETG - Winkle . . . . .	53
48.	Prueba 1. PET Reciclado . . . . .	53
49.	Gráfico 1. Prueba 1. PET Reciclado . . . . .	53

50.	Gráfico 2. Prueba 1. PET Reciclado . . . . .	54
51.	Prueba 2. PET Reciclado . . . . .	54
52.	Gráfico 1. Prueba 2. PET Reciclado . . . . .	54
53.	Gráfico 2. Prueba 2. PET Reciclado . . . . .	55
54.	Prueba 3. PET Reciclado . . . . .	55
55.	Gráfico 1. Prueba 3. PET Reciclado . . . . .	55
56.	Gráfico 2. Prueba 3. PET Reciclado . . . . .	56
57.	Prueba 4. PET Reciclado . . . . .	56
58.	Gráfico 1. Prueba 4. PET Reciclado . . . . .	56
59.	Gráfico 2. Prueba 4. PET Reciclado . . . . .	57

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Tabla de objetivos . . . . .	15
II.	Microstepping driver . . . . .	29
III.	Controlling TB6600 with Arduino . . . . .	30
IV.	TABLA DE DATOS OBTENIDOS TENSIÓN VS DEFORMACIÓN . . . . .	35
V.	Cronograma . . . . .	36
VI.	Presupuesto . . . . .	37

## I. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D se ha convertido en una tecnología revolucionaria que ha transformado la forma en que se diseñan y fabrican objetos en una amplia gama de industrias. Sin embargo, uno de los desafíos clave de la impresión 3D es la necesidad de filamentos de alta calidad y asequibles para alimentar las impresoras. La mayoría de los filamentos utilizados en la impresión 3D son de plástico, lo que ha llevado a una creciente preocupación por la cantidad de desechos plásticos generados por botellas y otros envases.

En ese sentido, el actual estudio presenta como objetivo principal el desarrollo de un sistema de extrusión de filamento a partir del reciclaje de botellas plásticas tipo PET para el uso en impresión 3D; debido a que este material puede ser aprovechado y es factible su reutilización, considerando inclusive una solución ambiental dándole un segundo uso en forma de filamentos para la construcción de diferentes productos y así reducir considerablemente la cantidad de desechos plásticos que se generan a diario.

Actualmente, la extrusión es uno de los métodos de procesamiento de polímeros más utilizados en entornos industriales de pequeña, mediana y gran escala. Los productos que se pueden fabricar utilizando este método incluyen: tuberías, mangueras, roscas y muchas otras configuraciones para satisfacer las necesidades actuales del mercado para la impresión.

La creciente demanda de los usuarios por comprar impresoras 3D genera la necesidad de producir filamento barato para su uso en el proceso de impresión. La fabricación de extrusoras de bajo costo como la construída en este proyecto, puede producir aproximadamente 10 metros por cada botella plástica de 3 litros, lo cual puede ayudar a satisfacer la demanda.

El beneficio completo a partir del desarrollo de este estudio puede ser más evidente si se tienen varias impresoras de este tipo. En ese sentido, se espera que la producción de materias primas para este proceso aumente rápidamente, facilitando la producción local de filamentos estandarizados y de buena calidad, pues normalmente esta fibra no se produce localmente debido a la falta de microempresas que abastezcan productos al mercado; los distribuidores de este producto solo venden productos importados.

La máquina propuesta incluye un sistema de corte que consiste en un bloque de aluminio con brocas y rodamientos que se utilizan para hacer calados escalonados de manera que las tiras se corte en tiras longitudinales, compactas y de poca densidad. El bloque descrito cuenta con dos ejes, para botellas plásticas pequeñas y grandes. Después de que se cortan las tiras, se dirigen hacia el bloque caliente que tiene forma cónica el cual suministra calor continuo. En este punto el módulo de temperatura se setea a 200°C para lograr el cambio en la materia prima. El material extruido sale por una boquilla caliente en forma de filamento con el diámetro de 1,75mm, el cual es un diámetro estándar para la impresión en 3D. El filamento extruido pasa por el sistema de enfriamiento, el cual consiste en un ventilador el cual se puede manipular a través de un regulador con perilla. Luego el filamento pasa por el sistema de bobinado el cual se activa desde una botonera de marcha/paro, en este punto los engranajes que conforman este sistema, hacen girar el carrete y el filamento se envuelve. Una vez envuelto, este se almacena en un recipiente.

Los ensayos de tracción con probetas para validar la calidad del filamento obtenido y factibilidad del sistema de extrusión, arrojaron que el filamento obtenido a partir del plástico reciclado obtuvo un desplazamiento promedio menor al del plástico comercial, lo que comprueba la calidad del filamento obtenido a partir de este proyecto.

## II. PROBLEMA

En el año 2021, la producción mundial de plástico alcanzó alrededor de 390 millones de toneladas métricas. Esta cifra representa un aumento significativo en comparación con las décadas anteriores. De esa cifra, aproximadamente el 50 % de la producción de plástico se destina a productos de un solo uso, como envases y embalajes. A la vez, en el mismo año, la cantidad de plástico reciclado, posconsumo apenas alcanza el 10 % de la producción total, convirtiéndose el otro 90 % en residuos [1].

La producción, consumo, reciclaje y desechos de plástico, puede variar dependiendo de factores económicos, industriales y etnográficos. México, por ejemplo, es el mayor consumidor de agua embotellada del mundo, con un valor en torno a los 200 litros/habitante/año [2]

Mientras tanto, Ecuador fue el tercer país de América Latina que más desechos plásticos importó desde Estados Unidos en el 2020, solo por detrás de México. Siendo Ecuador uno de los países que más desechan y esto puede verse a simple vista en las ciudades principales, así también como en sectores rurales. Este país está lejos de cumplir las metas de reducción de residuos de las naciones del mundo, puesto que solo el 4 % de los residuos plásticos se reciclan [3].

Dadas las cifras anteriores, se han planteado diversas formas de reciclaje y reutilización del plástico una vez que ha sido consumido; sin embargo, algunos de estos métodos requieren de procesos extensos y elementos costosos para lograr su reutilización. Por lo que, es ciertamente un reto construir un sistema de extrusión con características de bajo costo y escalabilidad [4].

Por otro lado, en Ecuador existe una alta demanda de materia prima para los procesos de modelado por deposición fundida, como es la impresión 3D. Sin embargo, hay pocos sistemas de extrusión que reutilicen las botellas plásticas para fabricar filamento PET, y en caso de haber estas máquinas su precio es muy elevado, lo que ocasiona una [5].

### III. JUSTIFICACIÓN

Los procesos de extrusión forman parte de las formas mecánicas que se utilizan como punto de partida hacia una reutilización del plástico, que en combinación con los procesos de Modelado por deposición fundida (FDM), proceso utilizado en la impresión 3D, pueden dar lugar a la impresión de toda clase de prototipos que se pueden llegar a utilizar con fines industriales o comerciales [1].

El Polietileno Tereftalato (PET) que es un tipo de plástico comúnmente utilizado en envases y botellas de gaseosa, agua, aceite, entre otros, es un material que puede ser convertido en materia prima para la impresión 3D. De ahí que el PET es un compuesto muy usado para la fabricación de filamentos Poliéster de Glicol (PET-G), comercializado a nivel mundial para los procesos de manufactura en impresión 3D [6].

La impresión 3D ha revolucionado la forma en que se diseñan y fabrican objetos en diversos campos, desde la industria hasta la educación y la medicina. Sin embargo, uno de los desafíos persistentes en la impresión 3D es la sostenibilidad ambiental y la gestión de residuos plásticos.

El proyecto en cuestión tiene como objetivo abordar esta problemática, transformando desechos plásticos en un recurso valioso y sostenible, como es el caso de filamentos para impresiones en 3D, a la vez que sea un sistema de bajo costo y que sea escalable. Para ello se propone elaborar una máquina extrusora de filamento PET a partir de los desechos plásticos, similar al sistema desarrollado por Tylman y Dzierzek [7], demostrando con esto la factibilidad del sistema que se propone en este proyecto.

A partir de lo mencionado en los párrafos anteriores, la justificación de este proyecto se fundamenta en los siguientes puntos:

- Reducción de residuos plásticos, dándole un nuevo uso a los desechos de botellas plásticas.
- Promoción de la economía popular al maximizar la reutilización de materiales.
- Acceso a materiales asequibles, dado que el filamento utilizado en la impresión 3D es costoso y producir filamento a partir de botellas plásticas abarata los costos de fabricación.
- Promueve la innovación a partir de la búsqueda de nuevos métodos de procesamiento de plásticos y técnicas de impresión 3D más eficientes y sostenibles, generando avances significativos en ambos campos.
- Promueve la educación ambiental, ya que ofrece oportunidades educativas para concienciar la importancia del reciclaje y la reutilización de plásticos.

En la publicación de Villegas indica que la extrusión del filamento, ya que se acoge al diámetro de la boquilla de la impresora 3D, porque la configuración óptima con filamento para la impresión 3D es la de 90 por ciento de PET reciclado más el 10 por ciento de fibra de vidrio en polvo [8].

Así lo afirman también Díaz et al. en su artículo científico, permite un prototipo de una máquina que convierte el plástico PET reciclado en filamento útil para impresión 3D; donde este sistema permite eficientemente el filamento, además de proporcionar conocimiento aplicado para crear una alternativa de solución a una de las problemáticas que hoy en día afecta al mundo [9].

Finalmente, Vargas en su diseño indica que se obtuvieron resultados satisfactorios en las pruebas operativas que involucran navegación a través del menú del dispositivo, estabilidad de la temperatura de funcionamiento alcanzada y velocidad solo en la etapa de recolección [10].

## IV. OBJETIVOS

### IV-A. *Objetivo general*

Desarrollar un sistema de extrusión de filamento a partir de botellas plásticas para el uso en impresión 3D.

### IV-B. *Objetivos específicos*

- Diseñar cada etapa y componentes que conforman el sistema de extrusión de filamento.
- Desarrollar el sistema de extrusión que posibilite reducir costos.
- Validar la factibilidad del sistema extrusor mediante un análisis de la calidad del filamento obtenido.

### IV-C. *Tabla de objetivos*

Tabla I  
TABLA DE OBJETIVOS

Objetivo	Planteamiento	Meta	Indicador
OE1	Diseñar cada etapa y componentes que conforman el sistema de extrusión de filamento	Simulación del sistema de extrusión en programa de diseño CAD	Diseño CAD, simulación y planos
OE2	Desarrollar el sistema de extrusión que posibilite reducir costos	Costos de producción menores en un 5% que el producto convencional	Costos de producción
OE3	Validar la factibilidad del sistema mediante un análisis de comparación de tiempos, de costos y de las características del filamento extruido	Reducción de no menos del 40% de los valores característicos en un ensayo de tracción	Características físicas del filamento, como elasticidad y resistencia

Nota. Elaboración propia

## V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### V-A. Antecedentes teóricos

En Europa, desarrollaron una revisión sobre el uso que se puede dar al filamento de impresión 3D como una segunda vida para los desechos plásticos, que de otra forma, una vez retirados de uso, se convierten en desechos permanentes y nocivos. Los autores del artículo mencionan que el mercado de la impresión 3D está en crecimiento [11]. En este artículo se concluye que el reciclaje es el método más ventajoso para valorizar los plásticos post consumo y permiten una economía circular. Por otro lado, si no se reciclan y dan un nuevo uso, su degradación tarda entre 10 y 450 años. Dependiendo su composición, el reciclaje enfrenta desafíos como el escaso valor que producen, dado sus altos costes, como el transporte hasta las plantas centralizadas. Sin embargo, las ventajas luego que el material es procesado, están en la posibilidad de producir productos de plástico casi de cualquier forma arquitectónica en casa y no en una fábrica, en cuestión de minutos. El futuro se direcciona a que cada consumidor pueda producir sus propios bienes a partir de sus propios materiales reciclados, provocando un ahorro medioambiental y monetario.

En Filipinas, llevaron a cabo un estudio para identificar cuál es el mejor material para la creación de filamento para impresión 3D [12]. Su estudio se centra en la selección de materiales de resinas poliméricas vírgenes y plásticos reciclados posconsumo, para ello aplicaron el método de decisión multicriterio de Eliminación y Elección que expresa la realidad (ELECTRE). Las propiedades que analizaron para la selección fueron el punto de fusión, resistencia a la tracción, temperatura de transición vítrea, coeficiente de expansión térmica, índice de fluidez y el costo. El estudio demostró que el polietileno virgen de baja densidad (LDPE) y el tereftalato de polietileno (PET) reciclado son materiales óptimos como filamento alternativo, aunque también son buenas opciones el polietileno virgen de alta densidad (HDPE), el PET virgen, el polipropileno virgen (PP) y HDPE reciclado.

En Indonesia, construyeron una máquina extrusora de residuos plásticos para producir filamentos para la impresión en 3D [13]. Sus etapas pasaron por el diseño, análisis de necesidades, reconstrucción de máquinas y montaje eléctrico, pruebas de funcionamiento de máquinas, análisis de filamentos y pruebas de filamentos en máquinas de impresión 3D. Utilizaron diferentes materiales triturados: vasos de plástico (polipropileno, PP), una mezcla de botellas de plástico (tereftalato de polietileno, PET), vasos de plástico (polipropileno, PP). En el análisis de las pruebas encontraron que la mejor temperatura para producir filamentos en función de formas y tamaños es a 190°C; que es la temperatura máxima para calentar el barril.

En Colombia, realizaron el diseño e implementación de un sistema que consiste en la transformación de botellas y recipientes de plástico recicladas en filamento, para la impresión en 3D, con la finalidad de que jóvenes de barrios marginales puedan aplicar su creatividad para la creación de artículos que puedan comercializar como parte de un emprendimiento [14]. Los autores llevaron a cabo dos etapas. La primera etapa es la de trituración de los recipientes con el fin de que el plástico se convierta en trozos pequeños, para ello usaron un sistema de cuchillas capaz de despedazar los contenedores. La otra etapa es la extrusión del plástico que se realiza mediante un extrusor con un tornillo sin fin como guía, el material plástico en este punto se funde y se empuja por una boquilla que lo moldea al diámetro estándar de 1,75mm, mientras un regulador de temperatura calienta o enfría el material dependiendo del punto del proceso. Los autores mencionan que de los plásticos reciclados, el HDPE y el PP, destacan por su mejor acabado y manejo durante el proceso. El presupuesto de su sistema de extrusión alcanza los USD 799,68.

En Ecuador, plantearon una solución más económica y accesible para la impresión 3D, diseñaron e implementaron una máquina extrusora de filamento PET a partir de botellas. Sus ecuaciones para el cálculo de las dimensiones de la máquina extrusora las obtuvieron del libro Transformación del plástico del autor Savgorodny. El modelado estructural lo desarrollaron con la herramienta SolidWorks. Luego del armado de los circuitos de poder y control, realizaron pruebas de calibración, establecieron los parámetros de velocidad y temperatura con la posibilidad de cambiarlos desde el panel de control. Su prototipo ofrece la posibilidad de producir mínimo 10 metros de filamento de 1,75 mm de diámetro por hora. El costo de construcción de su máquina extrusora bordea los USD 379 [15].

En otro estudio desarrollado de igual forma en Ecuador, las autoras diseñaron, construyeron y monitorearon una máquina extrusora de filamento que contaba con una cámara reguladora de humedad usando, para ello usaron la plataforma LabVIEW. El proceso de extrusión a partir del scrap que generaron en los laboratorio de manufactura aditiva de la Universidad Politécnica Salesiana. Las pruebas de densidad y de comportamiento frente al giro del

motor principal, las realizaron con PE virgen y PLA reciclado. El control de la temperatura de cada área de la máquina extrusora, la realizaron con un controlador Raspberry. El costo de su sistema alcanzó los \$769,30 [16].

Esta información permitió identificar la importancia del desarrollo del sistema de extrusión como de la obtención del filamento. Debido a que el material final logra generarlo a un costo relativamente bajo. Con el filamento obtenido se verifica que cumpla con las características necesarias para la impresión en 3D, y puede ser considerado una guía para implementar este tipo de máquinas en el país.

Además proporciona información como una conciencia ambiental que es importante considerar en el desarrollo de este tipo de proyectos, debido a que el reciclaje permite evitar contaminación y proporciona trabajos donde la recolección de botellas genere recursos monetarios a varias personas con el que se disminuya así la brecha económica y la emisión de gases de invernadero, lo cual va alineado con los objetivos de la UNESCO [17].

#### *V-B. El reciclaje para la obtención de materia prima*

El reciclaje es el proceso de convertir materiales de desecho en materiales reutilizables o nuevos productos. Implica recolectar y procesar materiales usados como papel, plástico, vidrio, metal y productos electrónicos, y transformarlos en materias primas que se pueden usar para fabricar nuevos artículos [18].

El proceso de reciclaje se basa en clasificar los materiales recolectados según su tipo y calidad, pueden separarse según su composición química, para ser destinados a procesos específicos, una vez clasificados, los materiales se procesan para prepararlos para su reutilización, esto puede incluir limpiarlos, triturarlos, derretirlos o dividirlos en pedazos más pequeños para su fabricación, los materiales procesados se utilizan como materia prima en la elaboración de nuevos productos, por ejemplo, las botellas PET en filamentos para la impresión 3D, para posteriormente fabricar nuevos artículos [19].

El reciclaje ofrece varios beneficios, entre ellos la conservación de recursos, reduciendo la necesidad de extraer y procesar nuevas materias primas. Al desviar los desechos de los vertederos, el reciclaje ayuda a reducir el volumen de basura y previene la contaminación ambiental, como también las emisiones de gases de efecto invernadero. Lo ideal es que reciclar estos productos se convierta en un hábito y genere conciencia en todos [8].

#### *V-C. Sistema de extrusión*

Un sistema de extrusión es un conjunto de maquinaria y componentes diseñados para realizar el proceso de extrusión. La extrusión es un método de fabricación utilizado para producir objetos con una sección transversal constante, aplicando presión a un material, generalmente plástico, termoplástico o metal, forzándolo a través de un troquel o matriz con una forma específica. Este proceso es ampliamente utilizado en la fabricación industrial para crear una variedad de productos, desde perfiles de plástico hasta películas, tuberías, cables, láminas, entre otros [20].

Los sistemas de extrusión de plástico se utilizan en una amplia gama de industrias, incluyendo la automotriz, construcción, envasado, industria alimentaria, manufactura de productos electrónicos, entre otros. La flexibilidad y versatilidad de estos sistemas permiten la producción eficiente de una variedad de productos plásticos con formas y propiedades específicas, adaptándose a las necesidades de cada aplicación industrial.

#### *V-D. Componentes del sistema de extrusión*

Un sistema de extrusión típico necesita de una tolva de alimentación que es el punto de entrada donde se introduce el material que se va a extruir, como gránulos, polvo o pellets, el tornillo o también husillo, es un componente central que gira dentro de un cilindro calentado. El tornillo es responsable de transportar, comprimir, fundir y homogeneizar el material para prepararlo para la extrusión. El cilindro o barril es el conducto por el cual el material se desplaza y se funde. El sistema de bobinado es un componente esencial de una extrusora de filamentos que se utiliza para enrollar el filamento extruido en una bobina o carrete. El filamento debe tener una guía o ruta diseñada para guiar el filamento extruido desde la boquilla de extrusión hasta el sistema de bobinado. La velocidad y la dirección del sistema se ajustan para lograr la tensión de bobinado, se utiliza un mecanismo tensor para mantener una tensión constante en el filamento durante el proceso de bobinado garantizando que el filamento esté bien enrollado en la bobina sin que se enrede ni se afloje.

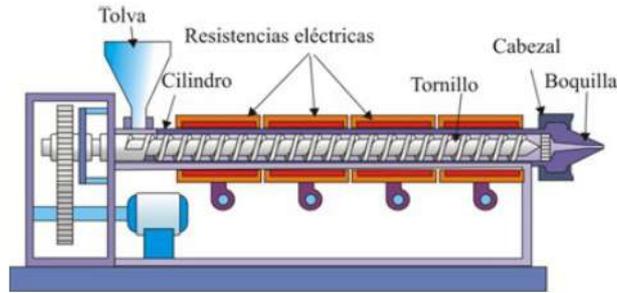


Figura 1. Ejemplo de máquina extrusora [21].

El sistema suele estar equipado con zonas de calentamiento para alcanzar la temperatura adecuada para la extrusión. El sistema de control de temperatura es utilizado para calentar o enfriar las diferentes secciones del cilindro y controlar la temperatura del material a lo largo del proceso. El troquel o matriz es la parte final del sistema de extrusión y determina la forma final del producto. El material fundido se moldea y sale a través de este componente. Algunos sistemas de extrusión cuentan con un mecanismo de tracción del material extruido para controlar su velocidad y grosor. Algunos sistemas de extrusión pueden contar con un sistema de corte para cortar el producto a la longitud deseada [22].

#### V-E. El sistema de bobinado en la fabricación de filamento para impresión 3D

El sistema de bobinado desempeña un papel fundamental en la etapa final del proceso de producción de filamento para impresión 3D. Su función principal es enrollar de manera precisa y uniforme el filamento producido a partir de botellas plásticas, garantizando que esté listo para su uso en impresoras 3D. Este paso es crítico, ya que la calidad y uniformidad del filamento son elementos esenciales para lograr impresiones 3D exitosas y consistentes [23]. Se debe tener algunas consideraciones con respecto al sistema de bobinado:

- Su enrollado debe ser uniforme y consistente. Dado que el sistema de bobinado está diseñado para asegurar que el filamento reciclado se enrolle de manera uniforme y consistente en carretes o bobinas. La uniformidad en el diámetro y la distribución equitativa del filamento a lo largo de la bobina son aspectos esenciales para garantizar una alimentación estable y sin problemas en la impresora 3D [24]. En ese sentido el diseño del núcleo de la bobina puede influir en la uniformidad del enrollado. Un diámetro apropiado y consistente del núcleo de la bobina contribuye a un enrollado más uniforme y evita irregularidades en el filamento.
- Se debe tener control de la tensión y velocidad de enrollado. Es crucial mantener un control preciso sobre la tensión aplicada al filamento durante el proceso de bobinado. Demasiada tensión podría deformar el filamento, mientras que muy poca tensión podría resultar en un enrollado irregular. Además, el control de la velocidad de enrollado garantiza una distribución uniforme y una cantidad adecuada de filamento en cada bobina [6].
- El sistema de bobinado debe estar diseñado para prevenir enredos y daños en el filamento durante el proceso de enrollado. Se deben implementar medidas para evitar nudos, torsiones o roturas que podrían comprometer la calidad y la utilidad del filamento [14].

La implementación de sistemas de detección de irregularidades, como sensores de diámetro o sistemas de inspección visual, es crucial para identificar y corregir cualquier problema durante el proceso de bobinado, garantizando la calidad del filamento [6].

Las bobinas resultantes del sistema de bobinado también actúan como el medio principal de almacenamiento del filamento. Por lo tanto, es esencial que el sistema asegure que el filamento se enrolle de forma adecuada y segura para su almacenamiento a largo plazo, protegiéndolo de la humedad, el polvo u otros factores ambientales que podrían afectar su calidad [25].

Los materiales utilizados en la construcción del sistema de bobinado deben ser resistentes y duraderos para soportar el proceso continuo de enrollado. Además, deben ser seleccionados cuidadosamente para evitar la contaminación del filamento con partículas o residuos que puedan comprometer su calidad [24].

El sistema de bobinado debe ser adaptable para manejar diferentes tamaños de bobinas según las necesidades de producción. Esto permite la flexibilidad en la producción de filamento y la posibilidad de utilizar diferentes tipos de impresoras 3D [14].

También es esencial que el sistema de bobinado sea de fácil mantenimiento y limpieza para garantizar su funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo. La limpieza regular y el mantenimiento preventivo ayudan a prevenir problemas y aseguran una producción continua de filamento de calidad [25].

#### *V-F. Tipos de sistemas de bobinado en la impresión 3D*

Los sistemas de bobinado para filamento de impresión 3D varían en su grado de automatización y nivel de control. La elección del tipo de sistema dependerá de factores como el presupuesto, el volumen de producción, la precisión requerida y las características específicas del material reciclado que se utilizará para la fabricación del filamento [26]. A continuación se detallan los diferentes tipos de sistemas de bobinado para la impresión 3D que existen:

- **Sistemas manuales:** Los sistemas manuales de bobinado implican una operación totalmente controlada por el operador. En este caso, el operador controla la velocidad de enrollado, la tensión y supervisa manualmente el proceso de bobinado. Aunque estos sistemas pueden ser más económicos y simples, tienden a ser menos consistentes en la calidad del enrollado debido a la variabilidad humana [27].
- **Sistemas semiautomáticos:** Estos sistemas involucran una combinación de operación manual y automática. El operador puede configurar parámetros como la velocidad de enrollado y la tensión, pero el proceso de bobinado se lleva a cabo automáticamente. Los sistemas semiautomáticos ofrecen un mayor nivel de precisión y control en comparación con los sistemas manuales, ya que reducen la influencia de la variabilidad humana [28].
- **Sistemas totalmente automatizados:** Los sistemas totalmente automatizados son controlados por software y hardware especializado. Estos sistemas pueden ajustar automáticamente la velocidad de enrollado, la tensión y monitorear constantemente el proceso. Ofrecen la ventaja de una alta precisión, repetibilidad y consistencia en el enrollado del filamento. Además, pueden integrar sistemas de detección de irregularidades para corregir automáticamente problemas durante el proceso de bobinado [29].
- **Sistemas especializados para materiales reciclados:** En el contexto del proyecto de extrusión de filamento a partir de botellas plásticas, se pueden encontrar sistemas de bobinado diseñados específicamente para manejar materiales reciclados. Estos sistemas pueden incluir características especiales para adaptarse a las particularidades de los materiales reciclados, como la variabilidad en la calidad del plástico reciclado y la necesidad de una limpieza más rigurosa [30].
- **Sistemas personalizados o adaptados:** En algunos casos, se pueden desarrollar sistemas de bobinado personalizados o adaptados para cumplir con requisitos específicos de producción. Estos sistemas pueden combinar características de los sistemas mencionados anteriormente para satisfacer necesidades particulares del proceso de fabricación [30].

#### *V-G. Tipos de sistemas de extrusión*

Los sistemas de extrusión puede abarcar diferentes enfoques y tecnologías que se han desarrollado para la extrusión de materiales, incluyendo aquellos específicamente relacionados con el reciclaje de botellas plásticas para impresión 3D. A continuación, se presentan las diferentes opciones que se tienen cuando se requiere crear un sistema de extrusión a partir de plásticos [20].

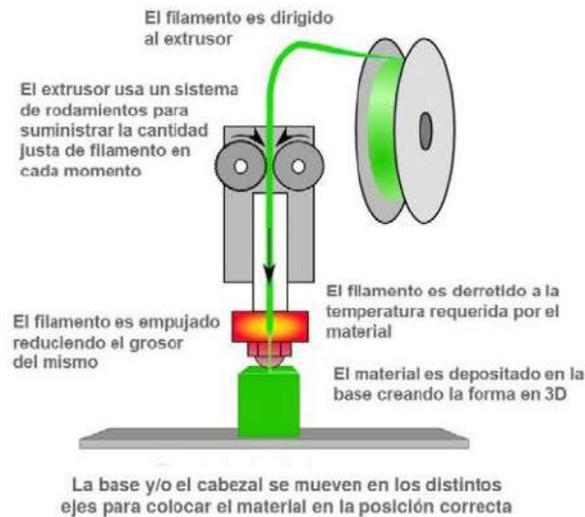


Figura 2. Proceso de construcción 3D por deposición fundida [10].

- Extrusión por tornillo de fricción:** Este proceso de manufactura utiliza los mismos principios que la fabricación aditiva (FDM), diseñado especialmente para extruir aleaciones de aluminio y magnesio de bajo peso y alta resistencia en su estado sólido, fundiendo todo el material depositado en la estructura metálica que soporta las altas temperaturas de fundición del aluminio que llega hasta 660 grados centígrados, siendo depositado con un flujo constante, determinado por el tamaño del tornillo y la distancia entre la estructura metálica y el tornillo. Teniendo forma cónica para soportar los esfuerzos de compresión que se generan por la presión que ejerce el material debido a la fluencia del material hasta ser extruido [24].

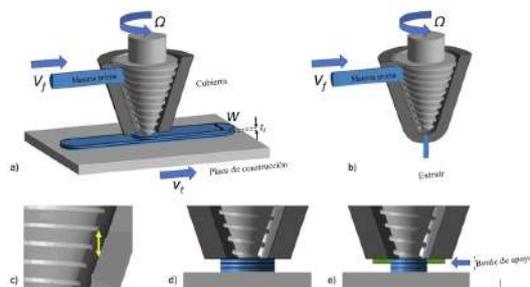


Figura 3. Proceso de fabricación aditiva de extrusión por tornillo de fricción [24].

- Extrusión por husillo:** Existen dos tipos de extrusión por husillo, simple y doble. Como se puede observar en la Figura 1 el mecanismo de extrusión está conformado por una sección de distribución por el cual ingresa el material en la tolva, el cual además de distribuir, almacena el material hasta que se consume, avanzando por el tornillo que es accionado por un motor, es comprimido y deformado por el calor hasta su punto de extrusión, siendo la boquilla la cual da la forma final del material [31].
- Extrusión directa:** En la extrusión directa o también conocida como bowden, usada principalmente en el proceso de extrusión en las impresoras 3D, se visualiza el desempeño que cumple la refrigeración, calefacción y flujo constante por el efecto empuje de un motor en un mismo. Es un sistema que va directamente sin participación de algún mecanismo de tornillo o husillo, siendo introducido el filamento por la parte superior del bloque la cual se encarga de disipar el calor y mantenerlo estable para posteriormente pasar al bloque calefactor que fundirá el material a una temperatura controlada por el termistor que se encuentra en el bloque y pasar por una boquilla que dará el diámetro requerido para el proceso que se vaya a realizar, como es el

caso de la fabricación de una decoración que se requiere una alta calidad, usando una boquilla de 1.5 mm de diámetro por la cual saldrá el material fundido formando finas capas que se solidificarán por la ventilación de capa, haciendo una secuencia de pasadas hasta formar un nuevo producto de alta calidad [32], [33].

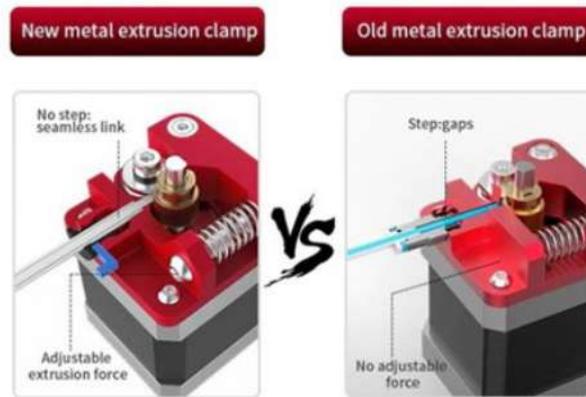


Figura 4. Extrusor tipo bowden [32].

#### V-H. Filamentos en la impresión 3D

El filamento es un elemento utilizado como relleno para impresoras 3D porque es un material que se puede utilizar para crear una variedad de aplicaciones geométricas mediante la deposición de material fundido. Estos materiales tienen diferentes propiedades mecánicas según el tipo de material [8].

A continuación se mencionan algunos de ellos:

- **Filamento PET-G:** (Poliétileno Tereftalato Glicol) es un tipo de filamento de impresión 3D que ofrece una combinación de propiedades de los filamentos PLA y ABS. Es una opción popular para la impresión 3D debido a su versatilidad y facilidad de uso. El PET-G es conocido por su resistencia y durabilidad, lo que lo hace adecuado para prototipos y piezas funcionales, tiene buena resistencia al impacto y puede soportar el estrés mecánico [5].
- **Filamento PLA:** (Ácido Poliláctico) es uno de los materiales más utilizados en la impresión 3D. Es un filamento termoplástico biodegradable derivado de recursos renovables como el almidón de maíz, las raíces de tapioca o la caña de azúcar. El PLA es conocido por su facilidad de uso, lo que lo convierte en la mejor opción para principiantes y aficionados, tiene una temperatura de impresión relativamente baja y una excelente adherencia de capa, lo que da como resultado impresiones confiables y consistentes [34].
- **Filamento ABS:** (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) es conocido por su durabilidad, resistencia y versatilidad. El ABS se deriva de fuentes a base de petróleo y se usa ampliamente en diversas industrias. El ABS es un filamento fuerte y rígido, lo que lo hace adecuado para piezas y componentes funcionales que requieren resistencia mecánica, siendo mejor material que el PLA [35].
- **Filamento TPU:** (Poliuretano Termoplástico) es un material flexible y elástico muy utilizado en la impresión 3D. Pertenece a la familia de los elastómeros termoplásticos (TPE), que combinan las propiedades del caucho y el plástico. El filamento de TPU demuestra propiedades similares a las del caucho. Puede estirarse, doblarse y comprimirse sin deformación permanente, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren elasticidad y resiliencia [36].
- **Filamento Nylon:** También conocido como filamento de poliamida (PA), Es un filamento versátil conocido por su fuerza, durabilidad y alta resistencia al calor. Los filamentos de nylon se derivan de polímeros sintéticos y ofrecen propiedades únicas que los hacen adecuados para una amplia gama de aplicaciones. Los filamentos nylon son conocidos por su excepcional resistencia y dureza, tienen una alta resistencia a la tracción, lo que significa que pueden soportar fuerzas de tracción sin romperse [37].

### V-I. Diagrama de conexión

Se debe hacer la conexión como se visualiza en la Figura 4. Para el caso se utiliza un termostato controlador de temperatura REX-C100. Se conecta el suministro de energía a la entrada 1-2. Para suministrar energía al relé de alarma se debe conectar la línea energizada a la conexión 7. La entrada 4-5 activan el relé de estado sólido. El cartucho térmico se conecta en serie a través de un relé. El encargado de medir y controlar la temperatura es el termistor, el cual va conectado a la entrada 9-10. Al usar el sensor de temperatura PT100 se debe conectar en las entradas 8-9-10 asegurándose que el cable rojo esté conectado a la entrada 8 del controlador REX-C100. Los cables restantes pueden conectarse de forma indistinta a las entradas 9-10 [38].

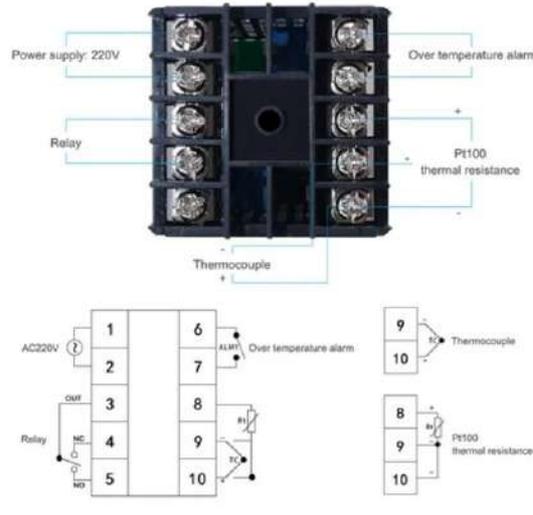


Figura 5. Diagrama de conexión del controlador REX-100C [38].

### V-J. ISO 527- 2: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción

Es un ensayo que permite determinar las principales propiedades mecánicas de los materiales de moldeo. Siendo una norma internacional que presenta las propiedades de tracción de los plásticos reforzados y no reforzados a las muestras y midiendo las diversas propiedades del material [39].

El mismo realiza velocidades de tracción que van desde el 1 a los 500 mm/min a fin de conocer si la probeta falla, cede o se rompe; para ello las medidas más comunes que se suelen emplear parten de las propiedades que se pueden visualizar en la figura 6 [40]:

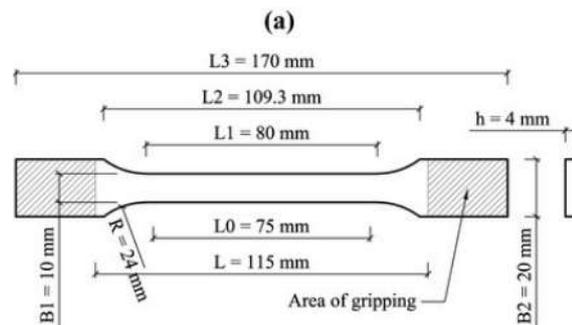


Figura 6. Ensayo de tracción [41].

La mayoría de las pruebas ISO 527-2 se realizan en una máquina de pruebas de uso general. Los más comunes son los sistemas de fuerza de 5 kN o 10 kN (1125 o 2250 lbf), pero a medida que aumenta la resistencia de los

plásticos y compuestos reforzados, se utilizan dispositivos de mayor capacidad, como los sistemas de 30 o 50 kN [40].

- Resistencia a la tracción, demostrando la cantidad de fuerza a aplicarse al material antes de que ceda o rompa.
- Módulo de tracción, es cuanto se puede deformar al material en respuesta de la tracción, por ende la medida de la rigidez del material.
- Alargamiento, se presenta como el aumento de la longitud de calibre tras la rotura dividido por la misma en el calibre original, indicando la ductibilidad.
- Relación de Poisson, es la medida que presenta la relación entre lo que se estira como material y lo que adelgaza durante el proceso de estiramiento [40].

Todas las superficies de la muestra estarán libres de defectos visibles, rayones y otros defectos. Si hay rebabas hay que eliminarlas teniendo cuidado de no dañar la superficie del molde. Las muestras del producto terminado deben tomarse de superficies que sean planas o que tengan una curvatura mínima [39]. Las muestras de plástico reforzado no deben tratarse mecánicamente para reducir su espesor a menos que sea absolutamente necesario. Los resultados obtenidos en muestras con superficie tratada no se pueden comparar con los resultados obtenidos en muestras sin tratar [42].

#### *V-K. Impacto ambiental y económico*

El enfoque de reciclaje de botellas plásticas para la fabricación de filamentos para impresión 3D tiene un potencial impacto ambiental positivo significativo caracterizado por la reducción de desechos plásticos, el ahorro de recursos al disminuir la dependencia de materias primas vírgenes, reduciendo así la extracción de recursos naturales, provoca una menor huella de carbono y concientiza sobre la sostenibilidad.

El impacto económico se nota en la reducción de costos de materiales. Al utilizar botellas plásticas como fuente de material puede reducir significativamente los costos en comparación con la adquisición de plástico virgen. Existe un ahorro en eliminación de desechos, abre la puerta a mercados potenciales con productos eco-amigables y proyecta una imagen de responsabilidad corporativa.

#### *V-L. Programa de diseño CAD*

Es una plataforma de software basada en la nube para diseñar y fabricar productos CAD, CAM, CAE y PCB modelados en 3D. En este contexto, la plataforma se puede utilizar de muy diversas formas, dependiendo de las necesidades de cada empresa o proyecto. Es por eso que la plataforma ha creado una serie de extensiones para Fusion360 que brindan a los usuarios acceso a tecnologías avanzadas de diseño y fabricación, como estrategias avanzadas de mecanizado de alta calidad, diseño generativo y procesos de fabricación aditiva.

Por lo tanto, permite un diseño y modelado rápidos que crean múltiples interacciones. Además, que las pruebas de simulación de diseño en las primeras etapas del proceso ayuden a determinar la viabilidad y detectar posibles errores antes de que ocurran. Así también en crear el diseño, desarrollando rápidamente soluciones alternativas de alto rendimiento dentro de las limitaciones de materiales y fabricación.

También recrea rápidamente trayectorias, reduce los tiempos de ciclo y el desgaste de máquinas - herramientas, y produce piezas de alta calidad. Deriva fácilmente dibujos 2D directamente a partir de modelos 3D para garantizar la precisión de fabricación.

## VI. MARCO METODOLÓGICO

El presente es un estudio descriptivo, ya que primero se describe el problema a detalle para entender sus efectos directos y colaterales; luego se propone una solución mediante la implementación de un sistema de extrusión respecto al cual se describen de igual forma, a detalle, cada una de las etapas de diseño, construcción y validación del sistema. El enfoque es cuantitativo porque en las etapas del diseño se deben tomar en consideración aspectos de cálculos como la velocidad del bobinado y Revoluciones Por Minuto (RPM), además de los análisis de materiales a realizar con las probetas impresas por el sistema propuesto.

### VI-A. Elementos que componen el sistema

Los materiales que se requieren para el desarrollo del sistema de extrusión son:

- **Estructura:** Para el ensamblaje de la estructura se requiere de una manigueta de acero inoxidable de 1/2" x 43,5 cm de largo, con dobleces de 10 cm. Un electrodo E312-16 y electrodo AWS E6011; conjunto con tapas lateral derecha e izquierda con rejilla de ventilación de una plancha de 2 mm de hierro negro, en dimensión: 58,5 cm x 43,5 cm con dobles de 3 cm en todas las caras. Con tuercas y anillo de presión para perno (3/8" x 1") en hierro negro.



Figura 7. Elementos requeridos para la estructura

La estructura, tiene una base de abajo y arriba en la mesa, para poder desplazarla en el área de trabajo. Se utilizan para ajustar las ruedas.

- **Componentes electrónicos:** En cuanto a los componentes electrónicos, se detalla los elementos y sus características para la obtención del filamento para impresión en 3D, se tiene un hotend como bloque con la resistencia y medidor de temperatura. Además de un bloque de aluminio y broca 6, 7, 8 que sirven para hacer calados escalonados de la tira plástica. También se tiene un motor paso a paso Nema17, un PWM control de motor, además de un RELAY SSR-25 DD.



Figura 8. Elementos electrónicos requeridos del sistema Parte 1

Se utilizan además otros componentes electrónicos que permiten la extrusión del filamento. Entre estos componentes se encuentran el sistema de corte, la fuente del poder, el módulo de temperatura REXC-100 y la botonera de marcha/paro.



Figura 9. Elementos electrónicos requeridos del sistema Parte 2

- Componente para almacenaje:** Este componente es esencial para que se conserve el filamento y no se pierdan sus características para la impresión en 3D:



ejes que mantendrán las botellas en posición vertical. Otras dos perforaciones de 13mm donde se instalan los rodamientos que hacen posible el corte del plástico en tiras. Una quinta perforación de 13mm donde se coloca un perno que regula el diámetro de la tira. A los lados de la base se encuentran dos perforaciones adicionales de 8 mm que sirven para sujetar la base a la mesa de trabajo. Sobre la base se encuentra un cuadrado con dos perforaciones de 4 mm en el que se instala un resorte para dar mayor fijación a la botella mientras esta se corta.

En la sección Anexos se pueden consultar los demás planos que se utilizaron para la construcción del sistema, como por ejemplo de la base de la mesa de trabajo donde se acentúan los diferentes elementos que componen el sistema y las tapas frontales y posteriores de la mesa de trabajo.

#### VI-C. Ensamblado del sistema

A continuación en la Figura 12 se muestra la estructura armada sobre la cual se añaden los componentes físicos del sistema.



Figura 12. Ensamblado del sistema

**La base del bobinado:** La base del bobinado está compuesta por dos engranajes y un carrete, el motor Nema 17 hace girar los engranajes y estos a su vez, el carrete en el que el filamento extruído se enrolla una vez haya sido enfriado.

**La base del bloque:** Se realizó a fin de que el bloque esté centrado con la base metálica, una vez estuvo colocado correctamente, el bloque se ajustó con una tuerca en el centro y dos más a los costados para que quede bien fijado, luego de eso se realizó el hueco centro de referencia del mismo diámetro que la última broca que se usó para ajustar el bloque de manera que pase la tira de botella.

**La tapa lateral derecha:** En este se realizó unos agujeros con la broca 1/8" para luego hacer rosca en los agujeros con el machuelo de 4 mm para que la tapa pueda ser empernada con tornillos de 4 mm, para que sea fácil poner y sacar en caso de que quiera revisar las conexiones eléctricas. Además, cuenta con una rejilla de ventilación para evitar el sobrecalentamiento.



Figura 13. Ensamblaje del prototipo

Con la información a anterior se inicia con el ensamblaje del prototipo del sistema con los siguientes pasos que se muestran a continuación:

1. **Estructura metálica:** Es el procedente de la mesa de trabajo, en la parte de abajo se encontrará el almacenamiento de los rollos obtenidos. En la parte media va la parte electrónica y en la parte superior el sistema de corte-bobinado(mecánico) que abarca la infraestructura en la cual se acopla el motor con el carrete y a su vez con el extrusor, para que el bloque caliente por donde sale las tiras de las boquillas permita la obtención del filamento.
2. **Sistema de corte:** Se inicia con el montaje mecánico que consta de una base donde se realizó dos agujeros para colocar dos ejes de diferentes tamaños, de manera que sirva para botellas plásticas grandes y medianas. A continuación, junto a los ejes se realizan otros dos agujeros para colocar rodamientos que hacen la función de cuchillas y cortan las tiras de plástico cuyo diámetro es de 1 cm. Tomando en cuenta el cambio de diámetro se coloca en la parte de atrás un perno que se puede ajustar para que la tira salga de un diámetro mayor o menor. Además, hay un resorte (cuerda retráctil) que permitan una tensión para que la botella se mantenga firme y la tira salga uniforme, es necesario que tenga un pico de 1,75 mm, ya que da la dimensión adecuada requerida para el filamento.
3. **Sistema de calentamiento y enfriamiento:** Se utiliza un módulo Python para control de temperatura, el cual se setea a 200° C. El cartucho de calentamiento de 24V de corriente continua se sujeta a la estructura para calentar y derretir el filamento y un sensor de temperatura (termistor) para medir la temperatura y ser controlado dentro de un rango específico con la ayuda del microcontrolador y también los valores de temperatura pueden ser vistos en la pantalla LCD.

Durante este tiempo el material se calienta y derrite dentro del bloque metálico que se sujeta a la estructura. El sensor detecta la temperatura y envía una retroalimentación al controlador que mantiene la temperatura dentro del rango especificado.

Al momento que la tira plástica entra por el bloque caliente, esta se derrite y toma forma cónica dentro de él, luego sale por la boquilla caliente en forma de filamento con la medida de 1,75 mm, de acuerdo al diámetro estándar definido para la impresión en 3D.

Se implementa un sistema de enfriamiento posterior al extrusor para que el filamento salido del extrusor



Figura 14. Plancha con los agujeros y medidas marcadas para hacer el doblez

se enfríe, evitando deformaciones próximas en el proceso de arrastre hacia el bobinado. El sistema de enfriamiento cuenta un ventilador el cual cuenta con un switch de encendido y apagado, así mismo cuenta con diferentes velocidades. Para la práctica se seteó a una velocidad del 100 % para lograr que el filamento se enfríe instantaneamente y pueda ser llevado al sistema de bobinado.

4. **Sistema de bobinado:** El sistema de bobinado es controlado mediante una botonera de marcha/paro, desde la cual se activa un motor para que gire el eje dentro de la estructura y el filamento extruído previamente, se enrolle en el carrete. La velocidad del motor es controlado con la ayuda de un controlador de motor de 24V 2A de corriente continua, al que está conectado el módulo de temperatura, el ventilador, el bloque calentador y el motor de rebobinado. La fuente de poder que se utiliza para alimentar todo el sistema es de 110V 20A.
5. **Ensayo de tracción según la norma ASTM E-23:** Como ensayo mecánico utilizado para medir la resistencia y deformación de un material bajo carga axial, esto es importante para la validación de las propiedades mecánicas de las probetas de ensayo impresas por el prototipo desarrollado.

#### VI-D. Configuración DRIVER TB6600

La configuración de micropasos del TB6600 se puede cambiar activando o desactivando los interruptores DIP S1, S2 Y S3 en el orden que se muestra en la siguiente tabla, son para 1/32 micropasos de este controlador [43].

Tabla II  
MICROSTEPPING DRIVER

S1	S2	S3	Microstep resolution	Pulse/rev
ON	ON	ON	NC	NC
ON	ON	OFF	Full step	200
ON	OFF	ON	1/2 step	400
OFF	ON	ON	1/2 step	400
ON	OFF	OFF	1/4 step	800
OFF	ON	OFF	1/8 step	1600
OFF	OFF	ON	1/16 step	3200
OFF	OFF	OFF	1/32 step	6400

Los interruptores S4, S5 y S6 regulan la corriente que llega al motor cuando está en marcha. Es mejor empezar con un nivel de corriente de 1A y si el motor pierde pasos o se detiene, puedes aumetar el nivel de corriente [43].

#### VI-E. Elaboración de probetas

Como se muestra en la Figura 15, las probetas transparentes son las que se fabricaron a partir de las Botellas PET, y las blancas son del filamento PTEG comercial marca Winkle.

El G (glicol) compuesto que se le agrega al PET comercial para darle mejores características plásticas, por ende el filamento fabricado no va tener los mismos resultados en el ensayo de tracción, sin embargo, se espera obtener hasta un rango del 40 % parecido al PETG comercial. Considerando que para la fabricación de botellas rígidas

Tabla III  
CONTROLLING TB6600 WITH ARDUINO

Current(A)	Peak current	S1	S2	S3
0.5	0.7	ON	ON	ON
1.0	1.2	ON	OFF	ON
1.5	1.7	ON	ON	OFF
2.0	2.2	ON	OFF	OFF
2.5	2.7	OFF	ON	ON
2.8	2.9	OFF	OFF	ON
3.0	3.2	OFF	ON	OFF
3.5	4.0	OFF	OFF	OFF

de bebidas poco sensibles al oxígeno, como refrescos carbonatados, cerveza y agua mineral; es así que es el más utilizado en todo el mundo.

Este proceso implica agregar ciclohexanodimanol (CHDM) en lugar de etilenglicol, lo que da como resultado un bloque atómico más largo en el que las cadenas adyacentes no están conectadas entre sí, como es el caso del etilenglicol. Esto evita la cristalización bajo presión en el material, lo que hace que los objetos sean más transparentes y reduce su punto de fusión, una característica ideal para crear productos duraderos que pueden termoformarse o extruirse fácilmente. Debido a su facilidad de extrusión y estabilidad térmica, el PETG y otros derivados del PET se utilizan cada vez más en el mundo de la impresión 3D ya sea en FDM o FFF [44].

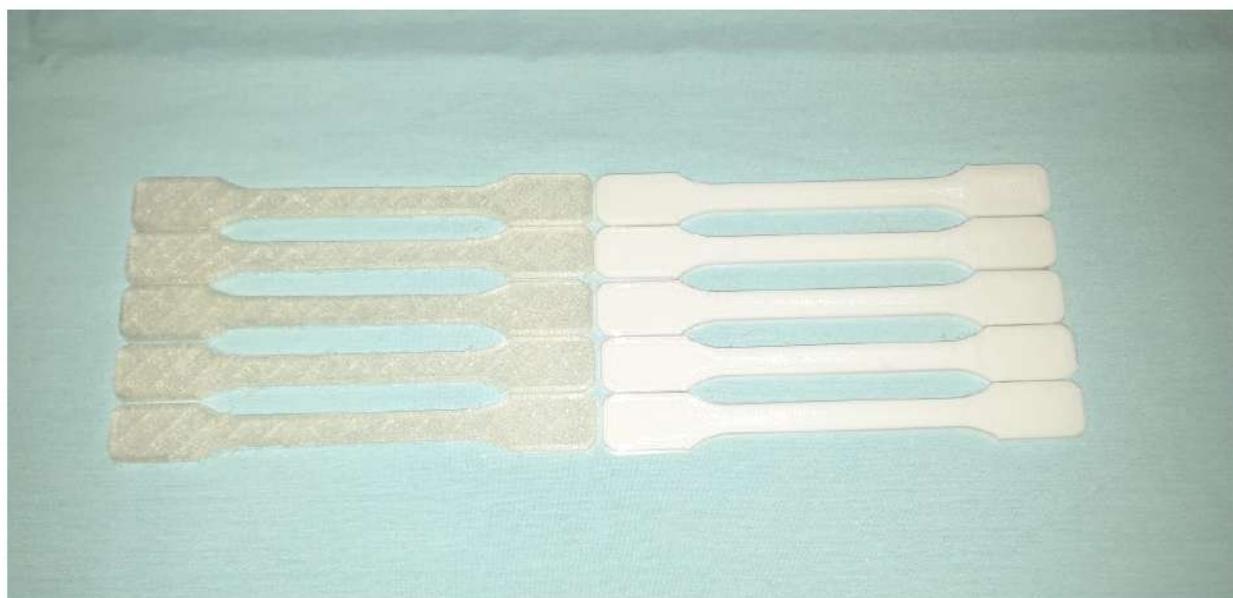


Figura 15. Probetas

En la Figura 15 se muestra una comparación de las probetas de PET reciclado y PETG respectivamente, de izquierda a derecha.

## VII. RESULTADOS

### VII-A. Resultados del sistema de extrusión desarrollado

En la Figura 16 se aprecia el sistema de extrusión desarrollado. Sobre la mesa de trabajo se ubica el sistema de corte, de caletamiento y enfriamiento y de bobinado.

Las tiras cortadas se miden con el calibrador y se obtuvo como resultado tiras de 1cm de diámetro. Es importante señalar que de una botella de 1 galón se obtienen aproximadamente 10 metros de tira con un diámetro de 1cm.



Figura 16. Sistema de extrusión desarrollado

### VII-B. Ensayos realizados a las probetas

Se realizaron 5 pruebas con el PETG comercial marca Winkle y 5 otras con el filamento obtenido, para analizar la resistencia del filamento obtenido frente a uno comercial y conocer si se alcanzó la meta referente al objetivo específico 3 que indica la reducción de no menos del 40 % de los valores característicos en un ensayo de tracción. Esta característica se analizó a través de los valores obtenidos acerca del coeficiente de deformación y punto de ruptura.

Los ensayos se realizaron considerando la norma ISO 527- 2: Plásticos, en la que indica la aplicación de una velocidad de tracción cuyo rango va de 1mm/min a 50mm/min de velocidad para materiales plásticos. Siguiendo lo que indica la norma y a fin de obtener datos más precisos se estimó una velocidad de 5mm/min, dado que durante las pruebas realizadas se notó que a mayor velocidad se rompían más rápido las probetas y por ende los datos obtenidos no eran precisos.

Para ambos casos las pruebas fueron realizadas hasta el punto de desplazamiento máximo según la fuerza aplicada. Para el material PETG, en los ensayos realizados se puede observar que la magnitud de la fuerza es de 1464,46 N; Según el análisis realizado con las probetas del material reciclado se alcanza a una magnitud de 1104,69 N.

Se inició con el PETG comercial (Winkle). Los ensayos fueron realizados como se observa en la siguiente figura 17:



Figura 17. Prueba PETG - Winkle

A continuación se muestran las gráficas de los datos obtenidos de una de las muestras:

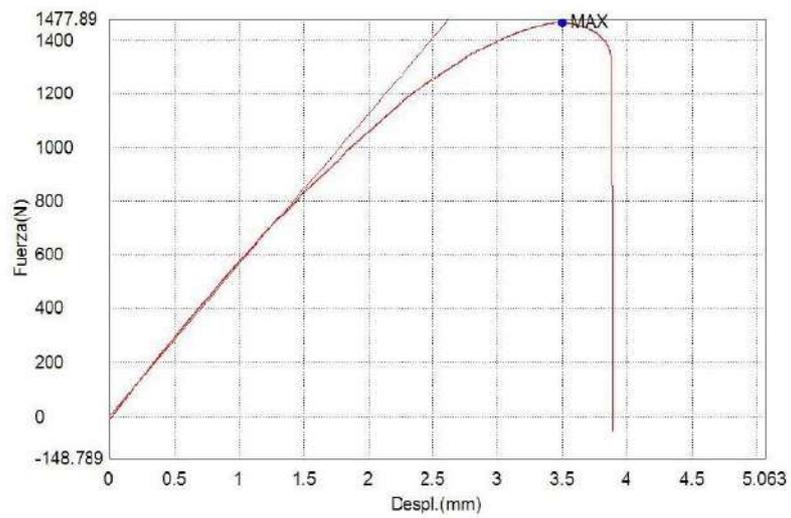


Figura 18. Prueba 5 de Fuerza vs Desplazamiento PETG - Winkle

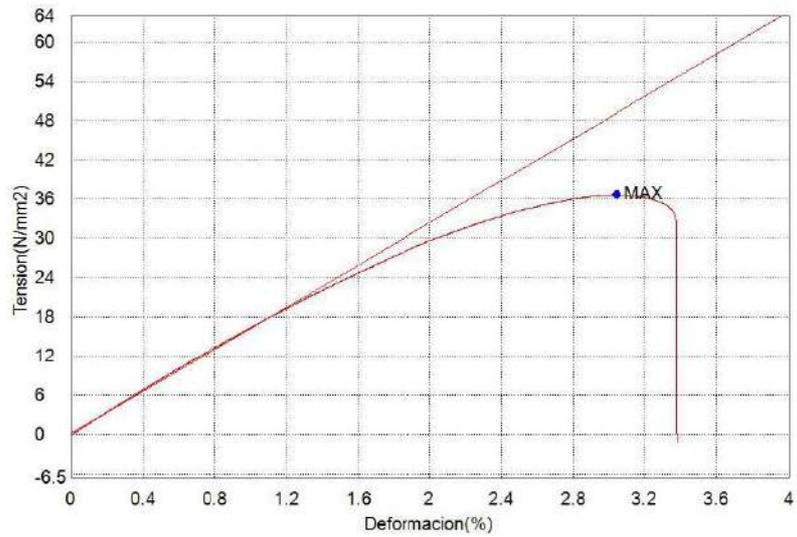


Figura 19. Prueba 5 de Tensión vs Deformación PETG - Winkle

En la Figura 18 se aprecia como a medida que se imprime fuerza (N) a la probeta, esta se desplaza (mm). Cuando la fuerza impuesta alcanza los 1464,46 N, la probeta alcanza un desplazamiento de 3,5 mm. Mientras tanto en la Figura 19 se visualiza que cuando se aplica una tensión de 1612,35 N/mm<sup>2</sup>, la probeta se deforma en un 3,04 %.



Figura 20. Prueba 5. PET RECICLADO

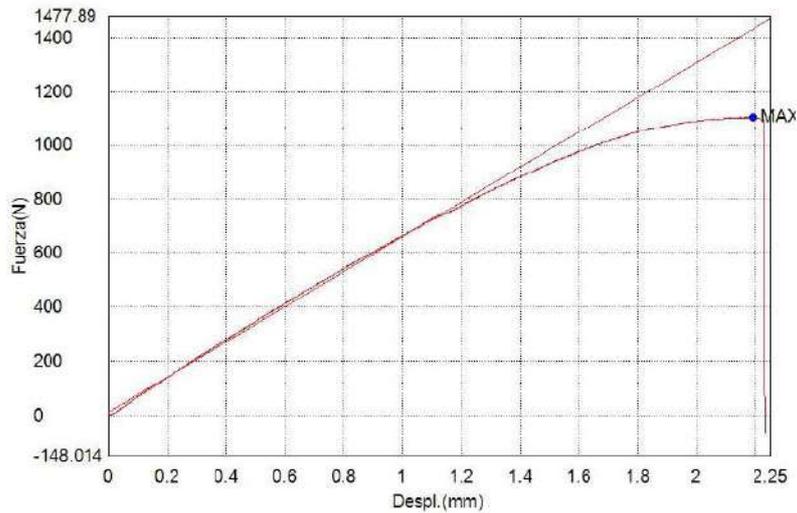


Figura 21. Prueba 5 de Fuerza vs Desplazamiento PET Reciclado

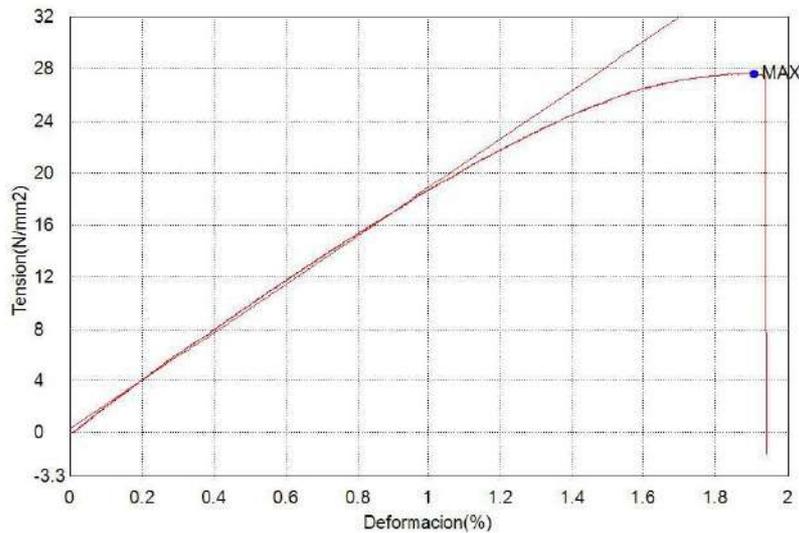


Figura 22. Prueba 5 de Tensión vs Deformación PET Reciclado

Se prosiguió con las muestras de PET reciclado como se visualiza en la Figura 20.

En la Figura 23 cuando la fuerza impuesta a la probeta de PET reciclado, alcanza los 1104,69 N, la probeta se desplaza 2,19 mm. Aplicando una regla de tres, se obtuvieron resultados que sugieren que con la misma fuerza impuesta de 1462,46 N a la probeta de PETG, el desplazamiento de la probeta con PET reciclado es de 2,64 mm, mientras que en la de PETG fue de 3,5 mm. Esto indica que el desplazamiento es menor en la probeta con PET reciclado, en otras palabras, presenta un 25 % menos de elasticidad que la probeta de PETG.

Mientras tanto en la Figura 24 se visualiza que cuando se aplica una tensión de 1863,07 N/mm<sup>2</sup>, la probeta se deforma en un 1,91 %. De igual forma, aplicando una regla de tres, con la misma tensión impuesta de 1612,35 N/mm<sup>2</sup> a la probeta de PETG, la probeta con PET reciclado se deforma en un 3,51 %, mientras que en la de PETG fue de 3,04 %. Esto indica que la deformación es mayor en la probeta con PET reciclado, en otras palabras, presenta un 13 % de mayor deformación que la probeta de PETG.

En las demás pruebas, el desplazamiento de las probetas con PET reciclado fue menor al de las probetas con PETG, repitiéndose el patrón de que las probetas a partir de PET reciclado son menos elásticas. De igual forma en las demás pruebas, la deformación de las probetas con PET reciclado es mayor, lo que indica que el filamento

obtenido a partir de este proyecto, tiene menores características de resistencia a la tracción que las probetas con PETG. Estos hallazgos son respaldados por la investigación extensa que existe sobre estos materiales, sin embargo, éstas características están dentro de 40% propuesto en el objetivo específico 3 y son un resultado alentador para la utilización de este material reciclado en proyectos de prototipado rápido.

PRUEBAS	PETG			RECICLADO		
	Fuerza	Tension	Deformación	Fuerza	Tension	Deformación
1	1719,52 N	42,9881 N/mm2	0,34 %	1116,18 N	27,9045 N/mm2	1,94 %
2	1500,42 N	37,5104 N/mm2	3,07 %	1144,31 N	28,6079 N/mm2	1,90 %
3	1479,63 N	36,9906 N/mm2	2,97 %	1104,74 N	27,6184 N/mm2	1,74 %
4	1434,09 N	35,8522 N/mm2	3,05 %	1208,21 N	30,2053 N/mm2	1,95 %
5	1464,46 N	1612,35 N/mm2	3,04 %	1104,69 N	1863,07 N/mm2	3,51 %

Tabla IV  
TABLA DE DATOS OBTENIDOS TENSION VS DEFORMACIÓN

En la sección Anexos, Anexos 14-21 se pueden visualizar los resultados de las demás pruebas de tracción realizadas con las probetas.



Figura 23. Probetas después de pruebas de tracción

En la Figura 23 se visualiza la ruptura de las probetas después de los ensayos de tracción realizados.



## IX. PRESUPUESTO

A continuación se presenta el presupuesto del proyecto. Los insumos se adquirieron en las electrónicas de la calle Boyacá, el hierro en Dipac sucursal Sur, la fuente de alimentación en las electrónicas de la calle Venezuela, el filamento y hotend en el loca de impresión 3D cerca del parque de la Garzota.

Tabla VI  
PRESUPUESTO

Insumos y Equipos		
Materiales	Descripción	Costo
	REXC100 controlador de temperatura ((incluye SSR DD y Termopar))	\$50
	PWM controlador de velocidad para motor	\$3
	Interruptor	\$1
	Cable de alimentación	\$5
	Rodamientos para el sistema de corte \$2 cada unidad	\$4
	SSR DD	\$12
	Terminales para conexiones eléctricas, tipo anillo, hembra y pin (\$ 0.10 centavos la unidad)	\$3
	2 Planchas 2mm de Hierro negro para mesa de trabajo (245x144)	\$60
	Rollo de filamento PTEG	\$23
	Brocas para realizar huecos en la mesa de trabajo y estructuras del sistema	\$18
	Fuente de alimentación 110-220v AC - 24V DC	\$30
	Hotend-Sistema de extrusión	\$28
	Ventilador	\$5
	Cables	\$6
<b>TOTAL</b>		<b>\$248</b>

## X. CONCLUSIONES

La construcción del sistema de extrusión de filamento, se obtuvo a partir del cumplimiento de diferentes fases, desde la etapa de diseño de cada una de las partes que lo conforman, el ensamblaje de componentes electrónicos y no electrónicos, hasta las pruebas del sistema donde se ajustaron los rodamientos en el sistema de corte y la temperatura del bloque caliente a 200°C para lograr que el filamento extruido tenga un diámetro constante de 1,75 mm de acuerdo al estándar para la impresión 3D, cumpliendo así con el primer objetivo específico planteado en este proyecto. El sistema de extrusión elaborado permite transformar botellas pequeñas y grandes de hasta 4 galones en plástico PET, obteniendo hasta 10 metros de filamento por cada botella.

Se desarrolló un sistema de extrusión cuyo costo de producción ascendió a USD 248. En comparación con los costos de sistemas similares desarrollados y que se pueden consultar en la sección del marco teórico de este estudio, el sistema actual es entre 35 % a 69 % más económico. De igual forma el costo es entre 50 % y 100 % menor que el de máquinas de impresión 3D convencionales comercializadas en sitios web, por lo que se presenta como una solución sumamente accesible para su uso en impresiones 3D, como emprendimientos, instituciones educativas, que requieran de generar filamentos de plástico de bajo costo, pero de alta calidad.

La construcción del sistema extrusor es factible, dada la calidad del filamento obtenido. Durante las pruebas de tracción de las probetas, las probetas creadas a partir del PET reciclado presentan 25 % menos elasticidad y 13 % de mayor deformación que las probetas creadas a partir del PETG comercial, por lo que se cumple el objetivo específico 3 que indica la reducción de no menos del 40 % de los valores característicos en un ensayo de tracción. Además, en términos de tamaño, sus dimensiones que lo hacen portable y su desempeño adecuado durante todas las pruebas realizadas, validan la factibilidad del sistema de extrusión propuesto.

## XI. RECOMENDACIONES

1. El diámetro de la entrada del bloque caliente no debe exceder del diámetro de la tira PET de 1cm, disminuyendo de forma escalonada el diámetro del agujero con broca 8, 7, 6 y 5 mm de forma lenta y cuidadosa, para que el material que ingrese por el orificio del bloque esté en contacto y vaya dando la forma de filamento hasta el final que pasa por la boquilla de diámetro 1.75mm.
2. Los rodamientos del sistema de corte se podrían mecanizar en torno, haciendo una operación de refrentado en la cara superior del rodamiento logrando aplanar el bisel que traen los rodamientos, el bisel ocasiona que el corte en la tira no sea suave por lo cual se recomienda dejar plana la cara superior para que los rodamientos asemejen el corte de una tijera afilada.
3. La fuente de alimentación dual permite que la máquina se utilice en diferentes países con diferentes estándares de voltaje ya que su entrada puede ser 110v-220v, entregando 24v para los dispositivos electrónicos utilizados en el sistema.
4. El controlador REX-C100 a diferencia de otros dispositivos trabaja directamente con voltaje 110v o 220v, permitiendo facilitar la conexión eléctrica con una fuente dual 110v-220v, siendo importante si se va replicar en diferentes partes del mundo donde tienen distintos estándares de voltaje.
5. Se puede disponer del Driver TB6600 para controlar el motor paso a paso Nema17, con un costo un poco elevado pero fácil de configurar y resistente ante cualquier pico de voltaje, a diferencia del Driver A4988 con un bajo costo pero sensible y complejo para configurar.
6. Se debe establecer una temperatura optima para que la tira PET se funda, es comendado usar una temperatura entre 260°C hasta 280°C, dependiendo el tipo de botella reutilizada.

## REFERENCIAS

- [1] A. F. Mendez Sandoval, J. D. Marin Martinez et al., «Diseño y Simulación de una Máquina Extrusora para la Reutilización de Material Pet en Forma de Filamento para Impresoras 3D,» 2023.
- [2] C. Bianco, F. Issa y M Moskat, «Plásticos en América Latina: Breve reseña de su producción, consumo e impactos ambientales,» 2021.
- [3] S Morán, «Ecuador, ahogado en basura, está lejos de cumplir las metas de los ODS al 2030,» *Recuperado el*, vol. 16, 2020.
- [4] F. Zamora, K. Lisbeth, K. A. Paillacho Condor y P. N. Sandoval Vizuete, «Implementación de una extrusora de filamento de botellas plásticas recicladas en las instalaciones de la Empresa Automatizaciones Simotoc CIA Ltda.,»
- [5] G. A. Delorenci y L. O. Aquino, «Projeto de uma extrusora de filamento para impressão 3d que utiliza material reciclado,» 2022.
- [6] N. A. CORAL TREJO y D. R. IZQUIERDO ROSERO, «EXTRUSORA DE FILAMENTOS PARA IMPRESIÓN 3D CON RECICLADO DE BOTELLAS PET-G PARA PRÁCTICAS DE PROTOTIPADO EN LABORATORIOS AUNAR,» Tesis doct., AUNAR, 2021.
- [7] I. Tylman y K. Dzierżek, «Filament for a 3D Printer from Pet Bottles-Simple Machine,» *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 9, n.º 10, págs. 1386-1392, 2020.
- [8] E. S. Villegas Suárez, «Proceso tecnológico para la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica y refuerzo de fibra de vidrio para su uso en filamento de impresión 3D,» Tesis de mtrfa., Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2021.
- [9] M. V. R. Dfáz, J. P. V. Rfós, L. M. M. Portilla et al., «Desarrollo de un prototipo de máquina fabricadora de filamento para impresión 3d, mediante la reutilización de botellas de plástico PET.: Tecnoacademia Itinerante Nariño,» *CON-CIENCIA Y TÉCNICA*, vol. 6, n.º 2, págs. 39-43, 2022.
- [10] N. V. Alice, «Diseño de sistema embebido para máquina de reciclaje de PET,» *Elektron*, vol. 7, n.º 1, págs. 34-39, 2023.
- [11] K. Mikula, D. Skrzypczak, G. Izydorczyk et al., «3D printing filament as a second life of waste plastics—a review,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, págs. 12 321-12 333, 2021.
- [12] M. K. J. E. Exconde, J. A. A. Co, J. Z. Manapat y E. R. Magdaluyo Jr, «Materials selection of 3D printing filament and utilization of recycled polyethylene terephthalate (PET) in a redesigned breadboard,» *Procedia CIRP*, vol. 84, págs. 28-32, 2019.
- [13] M. L. Sonjaya, M. Mutmainnah y M. F. Hidayat, «Construction of Plastic Waste Extruding Machine to Produce Filaments of 3D Printing Machine,» 2021.
- [14] G. R. Espinosa, «Diseño e Implementación de un Sistema de Extrusión de Filamento Para Impresión 3d a Partir de Botellas Recicladas,» Tesis doct., Universidad Autónoma de Occidente Cali, Colombia, 2019.
- [15] R. A. Arteaga Chenas, «Extrusora de filamento de politereftalato de etileno (PET) reciclado para impresoras 3D,» B.S. thesis, 2023.
- [16] H. B. Solórzano Orellana y D. M. Toral Andrade, «Diseño, construcción y monitoreo de Extrusora de filamento con Cámara reguladora de humedad usando LabVIEW,» B.S. thesis, 2022.
- [17] L. UNESCO y P. MEDUCA, *Educación para el desarrollo sostenible*, 2021.
- [18] K. A. Escaribay Valdiviezo y J. S. Morocho Portoviejo, «Proyecto de factibilidad para la implementación de una microempresa recicladora de desechos plásticos en la ciudad de Cuenca,» B.S. thesis, Universidad del Azuay, 2022.
- [19] C. A. López Sepúlveda et al., «Tipos de reciclaje y separación en la fuente, como métodos para disminuir el porcentaje de materiales aprovechables que llegan al relleno sanitario doña Juana en la ciudad de Bogotá,» 2020.
- [20] B. Shaqour, M. Abuabiah, S. Abdel-Fattah et al., «Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: a review,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, págs. 1279-1291, 2021.
- [21] M. Beltrán et al., «Tema 4. Extrusión,» *Tecnología de los Polímeros*, 2011.

- [22] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah y Z. Arifin, «A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters,» *Open Engineering*, vol. 11, n.º 1, págs. 639-649, 2021.
- [23] A. Petsiuk y J. M. Pearce, «Open source filament diameter sensor for recycling, winding, and additive manufacturing machines,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 143, n.º 10, pág. 105 001, 2021.
- [24] G. Buffa, D. Campanella, F. Micari y L. Fratini, «Design and development of a new machine tool for continuous friction stir extrusion,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 41, págs. 391-400, 2023.
- [25] O. Osideko, F. Eboh y M. Onitiri, «Design and Manufacture of the Cooling and Collection System of a Single Screw Extruder,»
- [26] F. d. P. Luque del Castillo, M. d. C. Ladron-de Guevara-Muñoz, Ó. De-Cózar-Macías, F. J. Castillo-Rueda, J. Pérez-García, J. L. Martínez-Torres et al., «Construction of a recycled plastic filament winder for 3D printing,» 2023.
- [27] H. Takahashi, P. Punpongsanon y J. Kim, «Programmable filament: Printed filaments for multi-material 3D printing,» en *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2020, págs. 1209-1221.
- [28] A. Van Epps, M. Cook y S. Berstler, «Collaborative Implementation of a Semi-Automated 3D Printing Service,» en *Innovation and Experiential Learning in Academic Libraries: Meeting the Needs of Today's Students*, Rowman & Littlefield, 2022, pág. 123.
- [29] F. Craveiro, S. Nazarian, H. Bartolo, P. J. Bartolo y J. P. Duarte, «An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials,» *Additive Manufacturing*, vol. 33, pág. 101 146, 2020.
- [30] A. Sola, «Materials Requirements in Fused Filament Fabrication: A Framework for the Design of Next-Generation 3D Printable Thermoplastics and Composites,» *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 307, n.º 10, pág. 2 200 197, 2022.
- [31] A. Lewandowski y K. Wilczyński, «Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials,» *Polymers*, vol. 14, n.º 2, pág. 274, 2022.
- [32] J. S. Toro Rojas, «Desarrollo de un brazo robótico de tipo scara con estructura de fibra de carbono y sistema de modelado por deposición fundida,» B.S. thesis, 2023.
- [33] S. Jain, T. Fuoco, M. A. Yassin, K. Mustafa y A. Finne-Wistrand, «Printability and critical insight into polymer properties during direct-extrusion based 3D printing of medical grade polylactide and copolyesters,» *Biomacromolecules*, vol. 21, n.º 2, págs. 388-396, 2019.
- [34] A. G. Cortés, M. C. Itzcua y G. A. B. Flores, «Diseño y construcción de una extrusora para la obtención de filamento PLA reciclado,» *Difu100ci@, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías*, vol. 16, n.º 3, págs. 126-131, 2022.
- [35] R. A. G. León, B. A. Isidro y W. Q. Quintero, «Diseño de una máquina de termoconformados para la fabricación de filamento ABS y PLA,» *Informador técnico*, vol. 85, n.º 1, págs. 34-51, 2021.
- [36] M. V. Urcuango Conumba, «Evaluación del proceso de manufactura aditiva por medio de impresión 3D de las partes mecánicas de un prototipo de corazón artificial humano en filamento TPU y PLA para fabricación de moldes: impresión 3D de polímeros,» B.S. thesis, Quito: EPN, 2023., 2023.
- [37] G. D. Patiño Crespo, «Estudio y caracterización de propiedades mecánicas de piezas compuestas de Fibras Carbono y Nylon producidas mediante impresión 3D,» B.S. thesis, 2022.
- [38] A. Quispe, N. Villacis y G. Ruiz W. and Núñez, «Diseño de un sistema de instrumentación y control para el proceso de secado de cacao mediante aplicación de energía fotovoltaica,» *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, vol. 2, n.º 2, págs. 18-23, 2023.
- [39] G. G. Javier, *Sistema de ensayos para la caracterización mecánica de materiales plásticos según la normativa ISO 527*, 2019.
- [40] B Cerne, R Lorber, J Duhovnik y J Tavcar, «Influence of temperature- and strain rate-dependent viscoplastic properties of POM on the thermo-mechanical response of a steel-POM spur gear pair,» *Materials Today Communications*, 2020.

- [41] U. ISO, «527-1: 2012,«Plásticos,» *Determinación de las propiedades en tracción. Parte*, vol. 1,
- [42] L. H. Wicaksono y R. Darmawan, «ANALISA KEKUATAN TENSILE MATERIAL POLYLACTIC ACID HASIL 3D PRINTER DENGAN SPESIMEN ISO 527-2,» *Prosida Widya Saintek*, vol. 2, n.º 1, págs. 1-8, 2023.
- [43] *TB6600 Stepper Motor Driver with Arduino*, 2023.
- [44] R. M. Herrera Paz y J. A. Loreto Sarmiento, «Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de fabricación de fundas de teléfono a base de plástico petg (Tereftalato de Polietileno Glicol) reciclado,» 2023.

ANEXO A  
DISEÑOS DE ESTRUCTURA

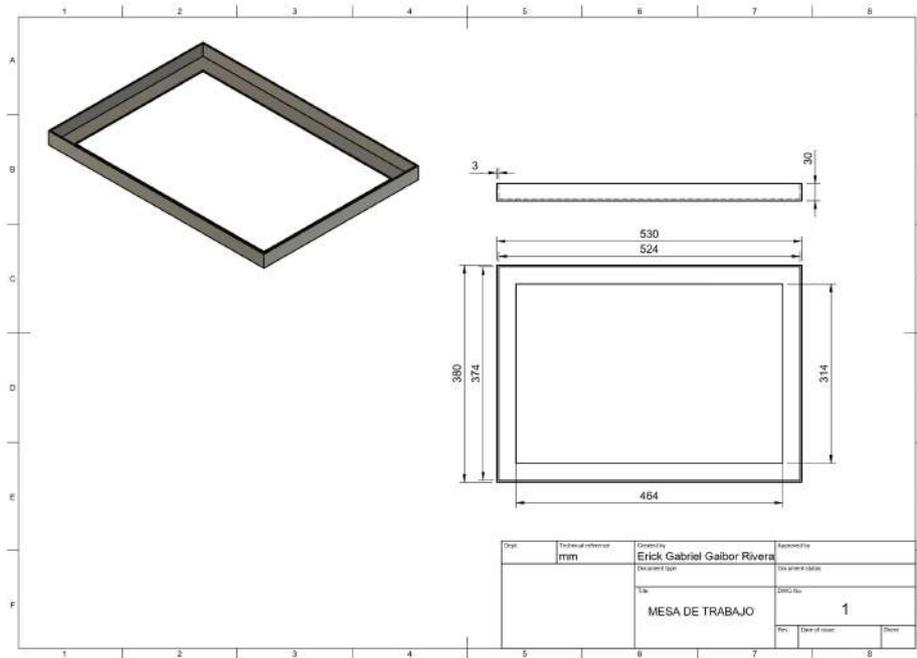


Figura 24. Base

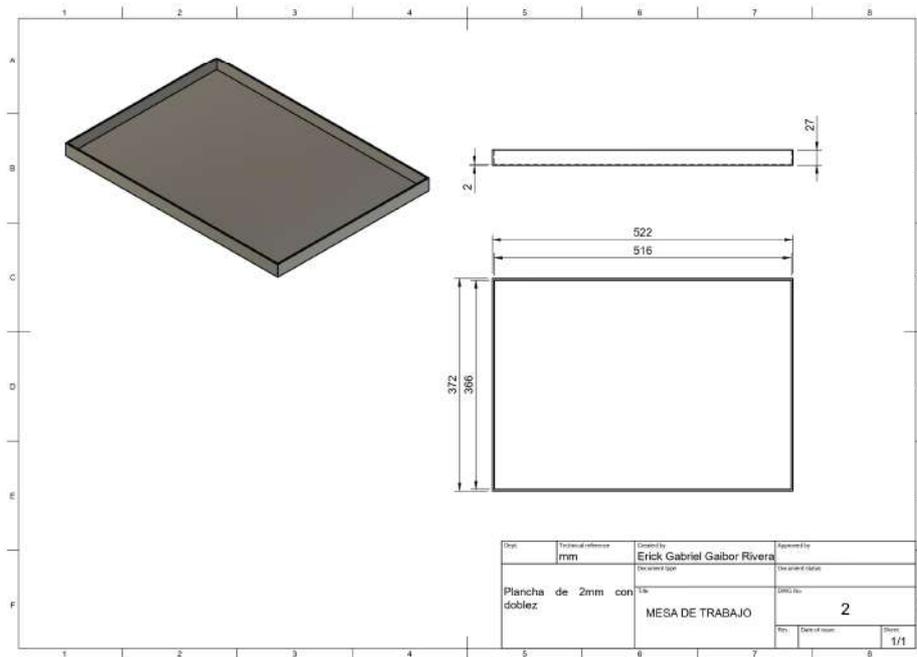


Figura 25. Plancha 2 mm

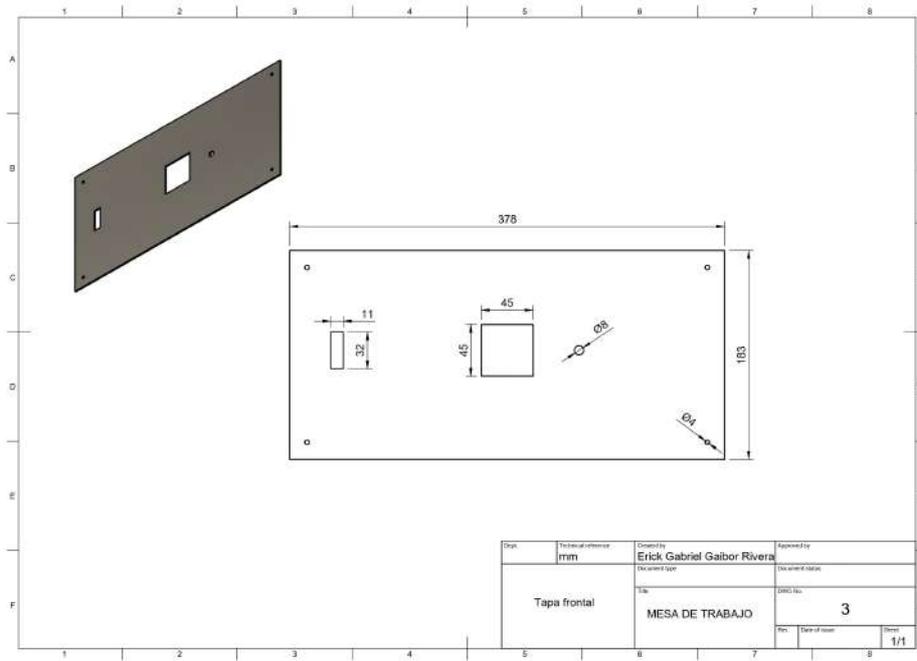


Figura 26. Tapa frontal

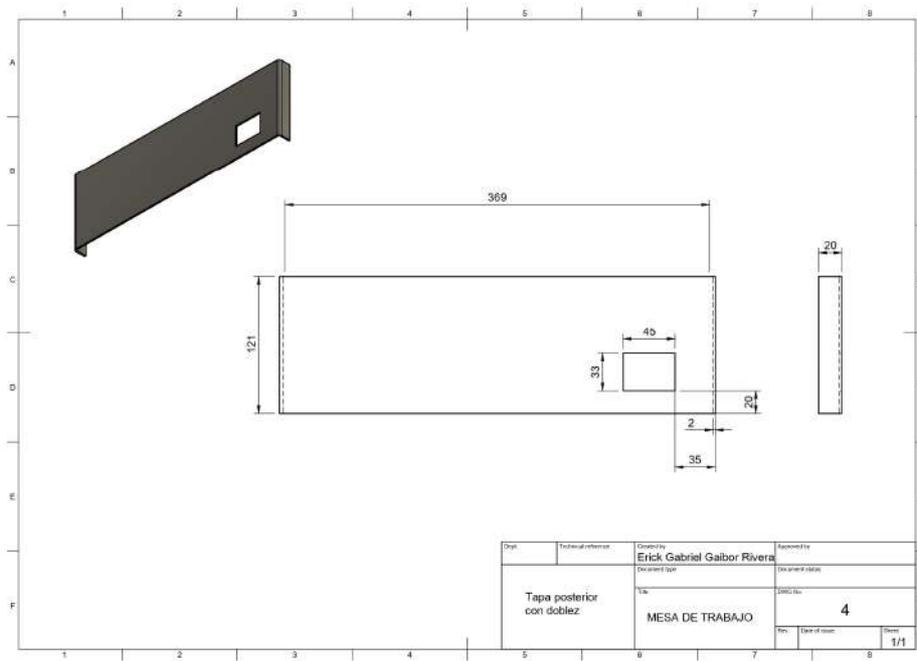


Figura 27. Tapa posterior

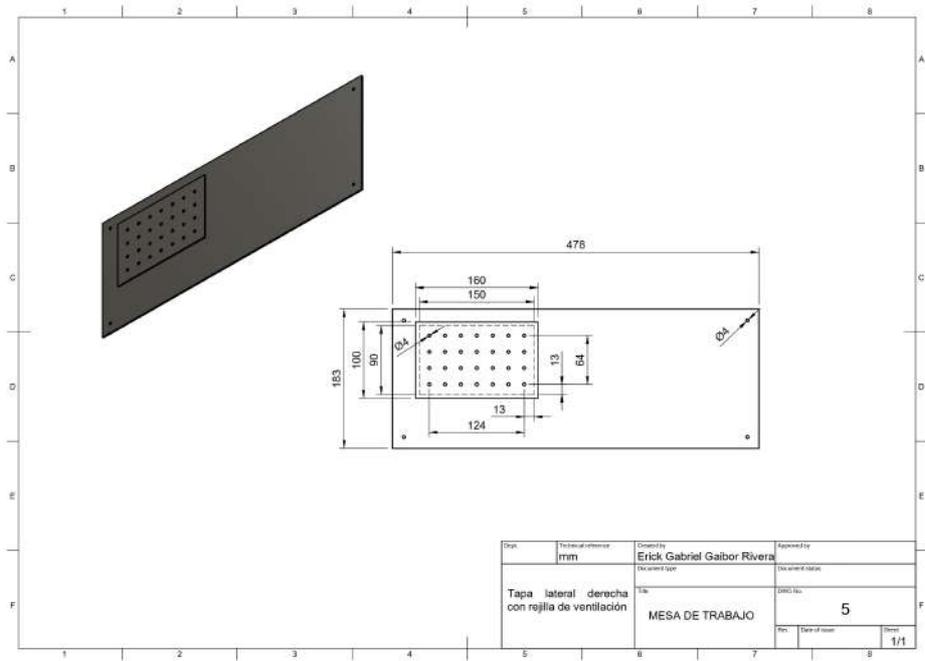


Figura 28. Tapa lateral

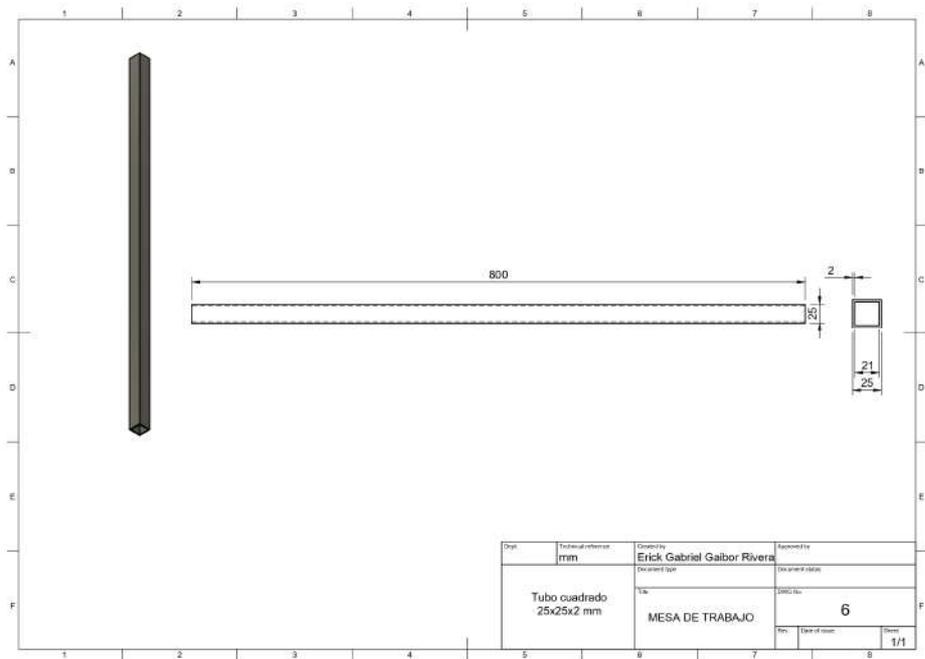


Figura 29. Tubo cuadrado

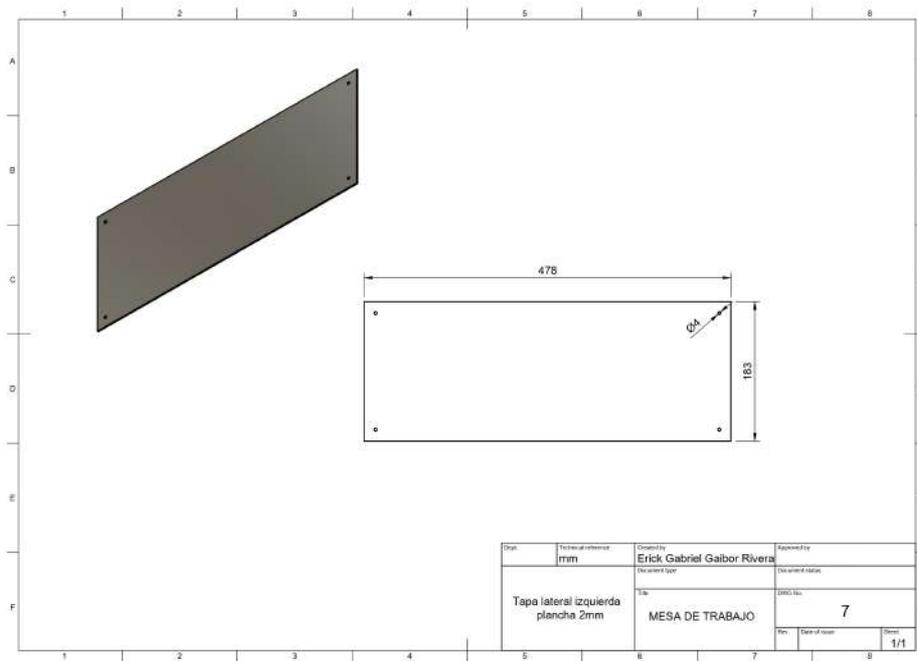


Figura 30. Tapa lateral izquierda

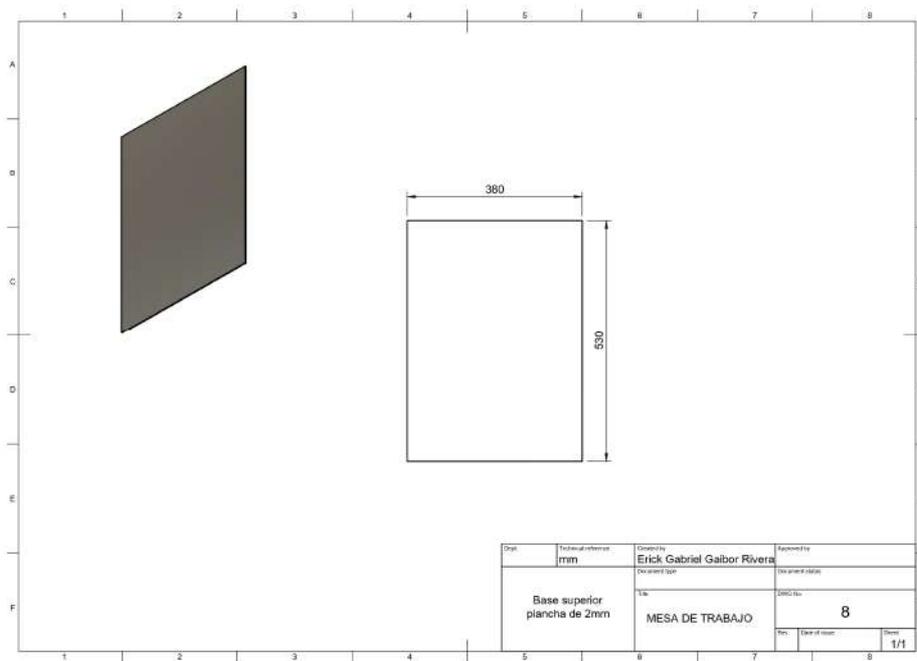


Figura 31. Base superior

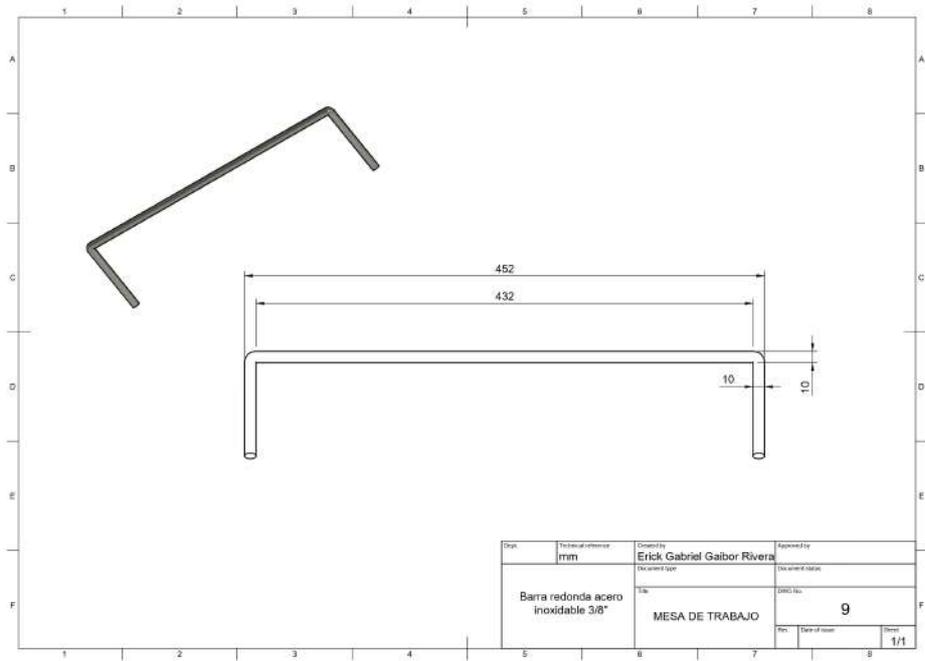


Figura 32. Barra redonda

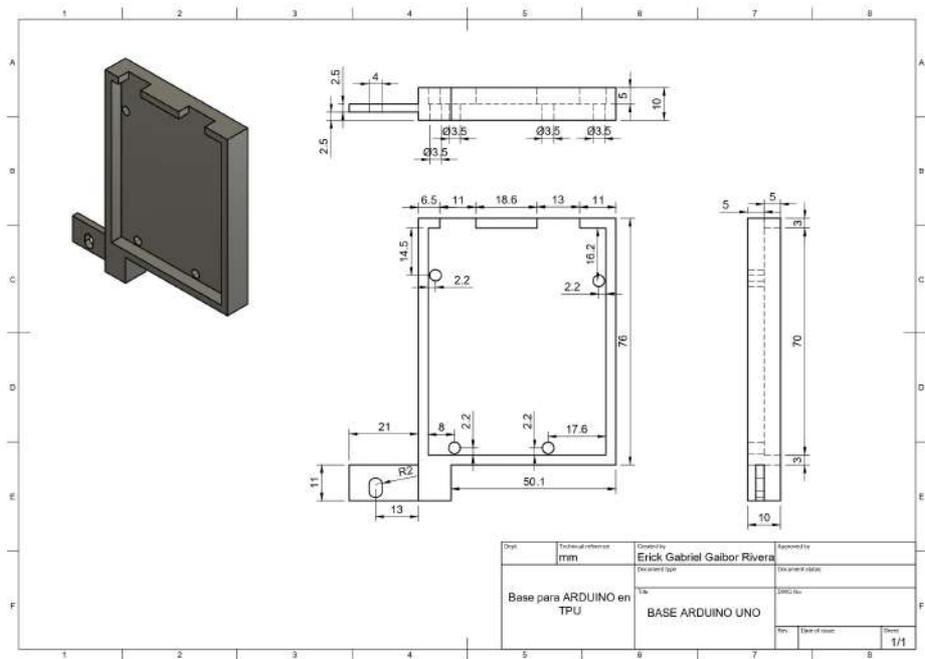


Figura 33. Base Arduino Uno

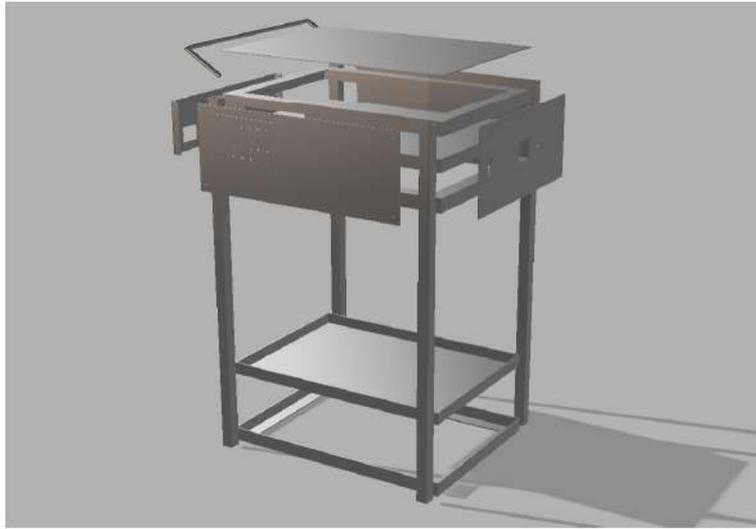


Figura 34. Mesa de trabajo

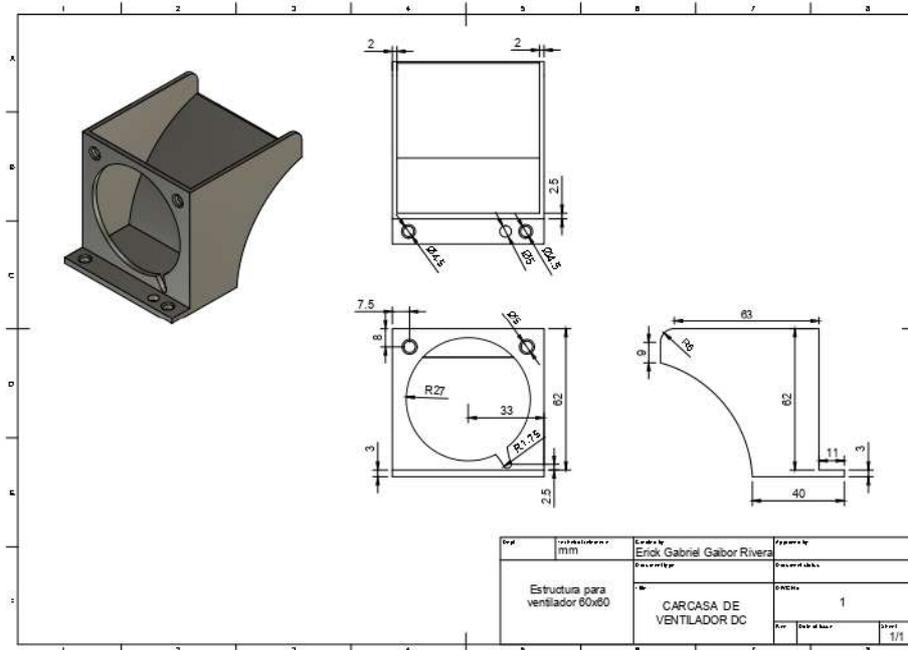


Figura 35. Carcasa de ventilador 24v

ANEXO B  
PRUEBAS DE PROBETAS PETG Y PET RECICLADO

Palabra llave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	50mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	1150.0000

Nombre	MElastico	Max._Fuerza	Max._Desplazamiento	Max._Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	17204.4	1719.52	3.98460	42.9881
Media	17204.4	1719.52	3.98460	42.9881
Desviación Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max._Deformacion	Pend._Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm
1_1	0.34649	598.415
Media	0.34649	598.415
Desviación Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 36. Prueba 1. PETG - Winkle

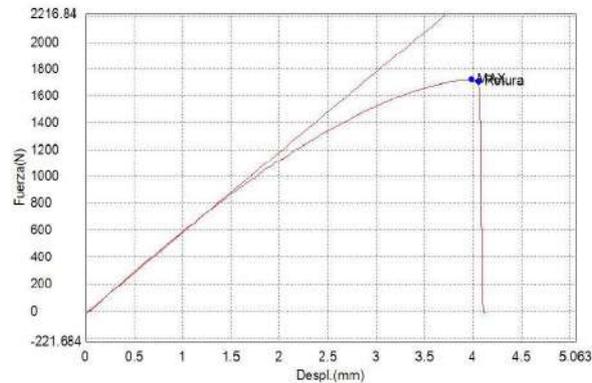


Figura 37. Gráfico 1. Prueba 1. PETG - Winkle

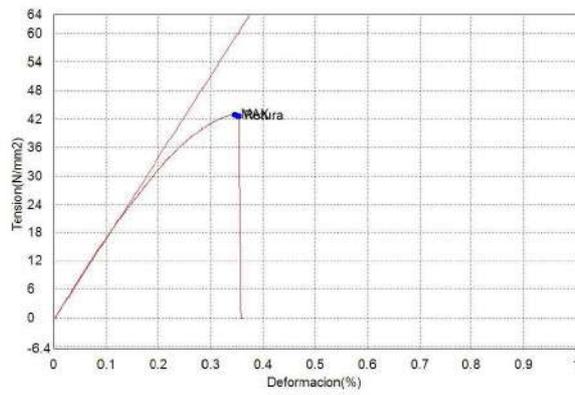


Figura 38. Gráfico 2. Prueba 1. PETG - Winkle

Palabra llave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	115.0000

Nombre	M.Elastico	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	Max_Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	1651.61	1500.42	3.53992	37.5104
Media	1651.61	1500.42	3.53992	37.5104
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max_Deformacion	Pend_Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm
1_1	3.07819	574.473
Media	3.07819	574.473
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 39. Prueba 2. PETG - Winkle

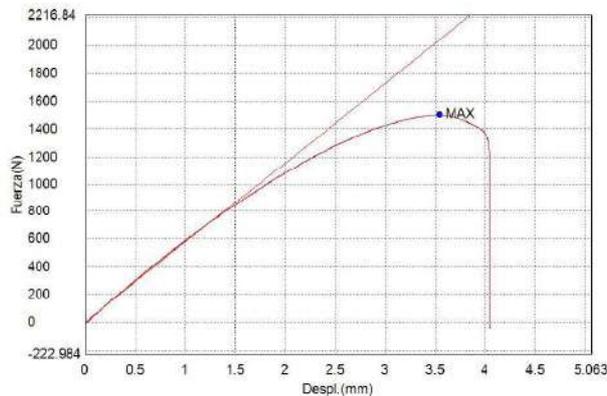


Figura 40. Gráfico 1. Prueba 2. PETG - Winkle

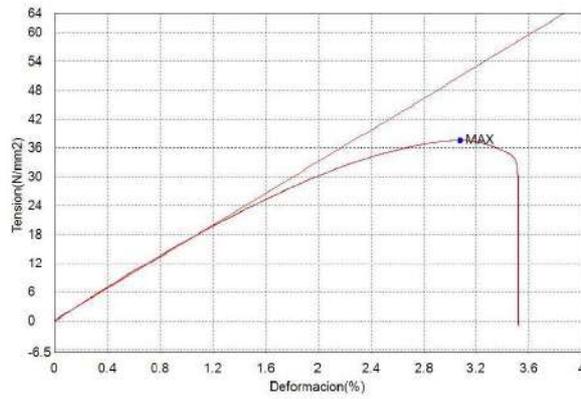


Figura 41. Gráfico 2. Prueba 2. PETG - Winkle

Palabra llave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	115.0000

Nombre	M.Elastico	Max._Fuerza	Max._Desplazamiento	Max._Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	1632.61	1479.63	3.41993	36.9906
Media	1632.61	1479.63	3.41993	36.9906
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max._Deformacion	Pend._Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm
1_1	2.97385	567.866
Media	2.97385	567.866
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 42. Prueba 3. PETG - Winkle

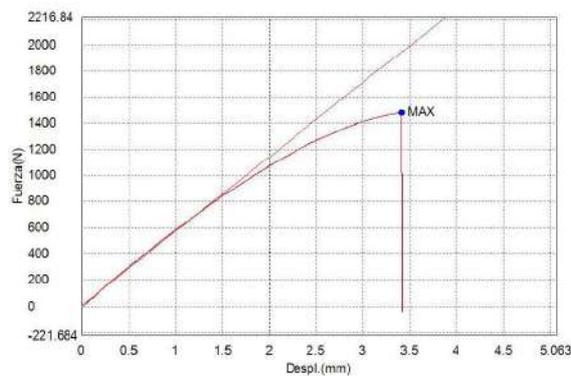


Figura 43. Gráfico 1. Prueba 3. PETG - Winkle

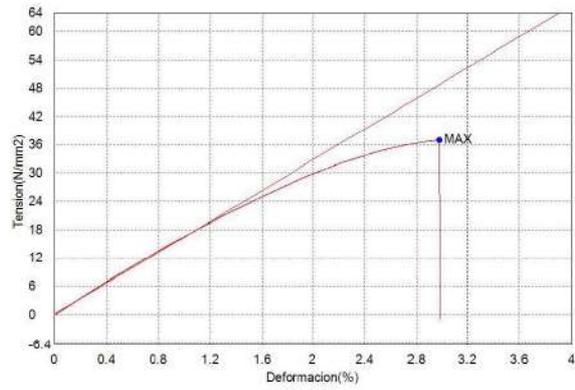


Figura 44. Gráfico 2. Prueba 3. PETG - Winkle

Palabra llave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	115.0000

Nombre	MElastico	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	Max_Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	1577.50	1434.09	3.51658	35.8522
Media	1577.50	1434.09	3.51658	35.8522
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max_Deformacion	Pend. Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm
1_1	3.05789	548.696
Media	3.05789	548.696
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 45. Prueba 4. PETG - Winkle

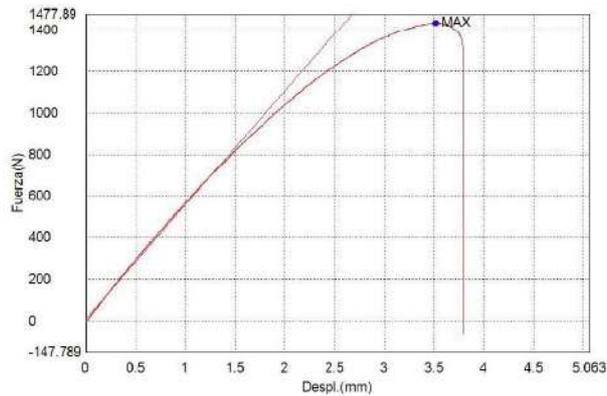


Figura 46. Gráfico 1. Prueba 4. PETG - Winkle

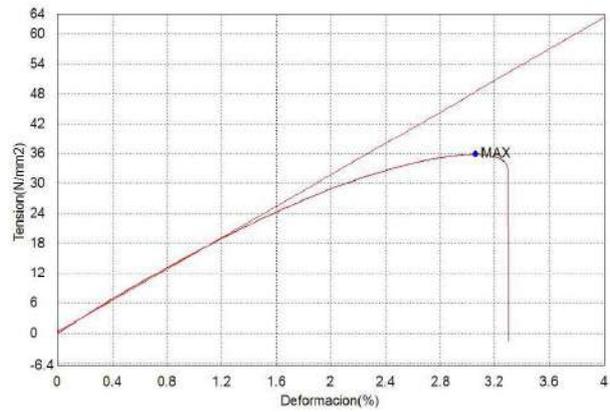


Figura 47. Gráfico 2. Prueba 4. PETG - Winkle

Palabra llave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	115.0000

Nombre	M.Elastico	Max. Fuerza	Max. Desplazamiento	Max. Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	1842.40	1116.18	2.23658	27.9045
Media	1842.40	1116.18	2.23658	27.9045
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max. Deformacion	Pend. Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm
1_1	1.94485	640.836
Media	1.94485	640.836
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 48. Prueba 1. PET Reciclado

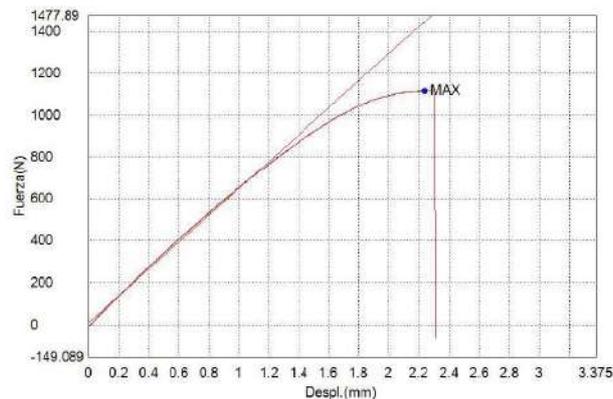


Figura 49. Gráfico 1. Prueba 1. PET Reciclado

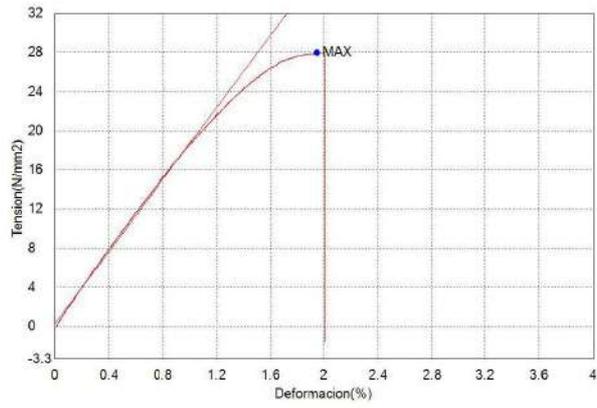


Figura 50. Gráfico 2. Prueba 1. PET Reciclado

Palabra llave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
N° de partidas:	1	N° de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	115.0000

Nombre	M.Elastico	Max. Fuerza	Max. Desplazamiento	Max. Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	1888.85	1144.31	2.18909	28.6079
Media	1888.85	1144.31	2.18909	28.6079
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max. Deformacion	Pend. Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm
1_1	1.90355	656.991
Media	1.90355	656.991
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 51. Prueba 2. PET Reciclado

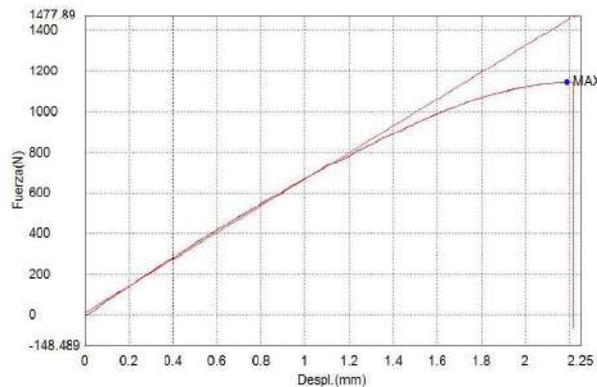


Figura 52. Gráfico 1. Prueba 2. PET Reciclado

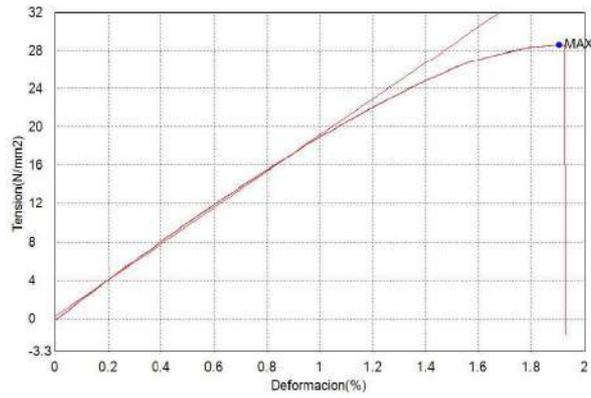


Figura 53. Gráfico 2. Prueba 2. PET Reciclado

Palabra clave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	115.0000

Nombre	M.Elastico	Max. Fuerza	Max. Desplazamiento	Max. Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas N	Calc. at Entire Areas mm	Calc. at Entire Areas N/mm2
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	1882.80	1104.74	2.00408	27.6184
Media	1882.80	1104.74	2.00408	27.6184
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max. Deformacion	Pend. Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm
1_1	1.74267	854.886
Media	1.74267	854.886
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 54. Prueba 3. PET Reciclado

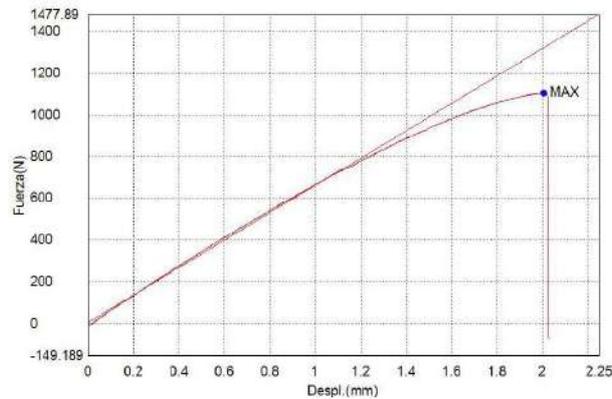


Figura 55. Gráfico 1. Prueba 3. PET Reciclado

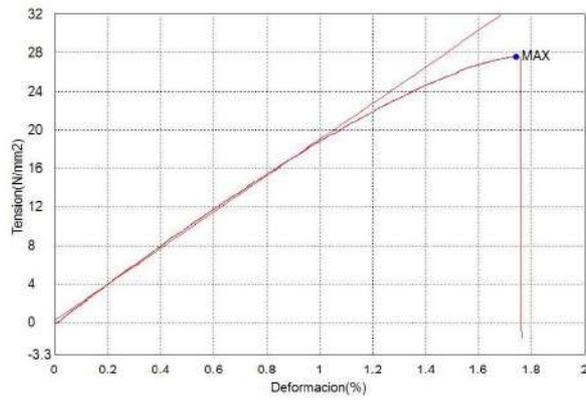


Figura 56. Gráfico 2. Prueba 3. PET Reciclado

Palabra llave	Trihexagonal 35%	Nombre de producto	D638-22
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	PA6 D638.xmas
Fecha de informe	3/5/2024	Fecha de ensayo	3/5/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	4.0000	10.0000	115.0000

Nombre	M.Elastico	Max_Fuerza	Max. Desplazamiento	Max_Tension
Parametros	Tension 0 - 20 N/mm2	Calc. at Entire Areas N	Calc. at Entire Areas mm	Calc. at Entire Areas N/mm2
Unidad	N/mm2	N	mm	N/mm2
1_1	1932.19	1208.21	2.24574	30.2053
Media	1932.19	1208.21	2.24574	30.2053
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre	Max_Deformacion	Pend. Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas %	Tension 0 - 20 N/mm2
Unidad	%	N/mm2
1_1	1.95282	672.067
Media	1.95282	672.067
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000

Figura 57. Prueba 4. PET Reciclado

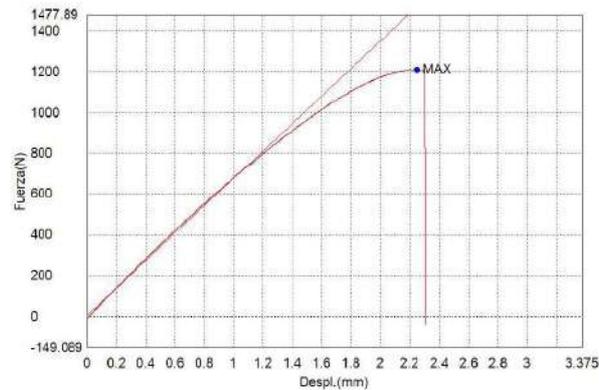


Figura 58. Gráfico 1. Prueba 4. PET Reciclado

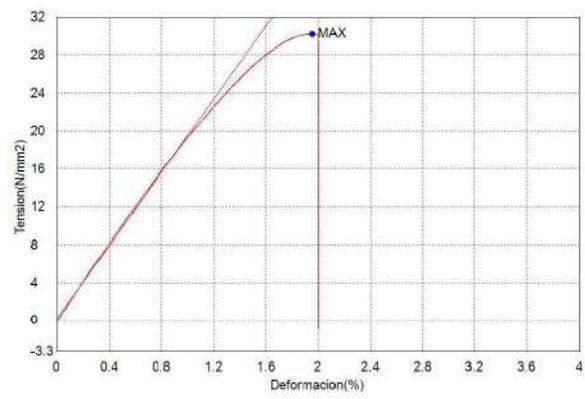


Figura 59. Gráfico 2. Prueba 4. PET Reciclado