



Carrera
Ingeniería Civil Mecánica
Universidad de Concepción

Filamento 3D con Pet reciclado.

Nelson Gabriel Eduardo Olea Coloma

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Meylí Valin

Julio 2025
Concepción, Chile

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional, ánimo y fortaleza en los momentos más difíciles de mi carrera, motivándome a seguir adelante. También agradezco profundamente a mis amigos y compañeros, que durante todos estos años estuvieron presentes, compartiendo experiencias y ayudándome a comprender aquellos aspectos que me resultaban más complejos.

De manera muy especial, deseo extender un afectuoso saludo y mi gratitud a mi profesora guía, por su constante apoyo, orientación y correcciones, que fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo. Finalmente, expreso mi reconocimiento a todos mis profesores, por su dedicación y paciencia al transmitirme con esfuerzo y compromiso los conocimientos necesarios para culminar con éxito esta etapa de formación profesional.

Resumen

La impresión 3D ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años; sin embargo, los elevados costos de los filamentos comerciales y la acumulación de residuos plásticos, especialmente de botellas de PET, plantean desafíos económicos y ambientales. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar, construir y validar un prototipo de máquina capaz de transformar botellas de PET recicladas en filamento para impresión 3D, contribuyendo a la valorización de residuos y a la economía circular.

La metodología contempló el diseño mecánico y la fabricación de los principales subsistemas corte de fibras, bloque calefactor, transmisión de potencia y bobinado junto con la selección de materiales de bajo costo y la integración de controles térmicos y de velocidad. Se realizaron pruebas de extrusión con fibras de diferentes espesores, impresión de probetas normalizadas y ensayos de tracción según la norma ASTM D638. Finalmente, se desarrolló una evaluación económica a partir de los costos de fabricación, estimación de la producción y comparación con alternativas comerciales.

Los resultados experimentales mostraron que el filamento de rPET presenta propiedades mecánicas inferiores al PLA: resistencia media de 20,9 MPa y módulo de 1,5 GPa frente a 60,2 MPa y 12 GPa del PLA. No obstante, el rPET evidenció mayor deformación antes de la fractura (18,2 % en promedio), lo que lo convierte en una alternativa viable en aplicaciones donde la flexibilidad y la sostenibilidad sean prioritarias. Estos hallazgos se alinean con estudios recientes que reportan valores similares para filamentos reciclados, confirmando que, aunque no se cumple íntegramente la hipótesis inicial de alcanzar propiedades comparables a las de filamentos comerciales, el material conserva potencial de uso en contextos específicos.

Se identificaron limitaciones críticas en el rPET relacionadas con su preparación previa (lavado, secado y control de humedad) y con la calidad interlaminar durante la impresión FDM, factores que condicionan tanto la homogeneidad del filamento como la repetibilidad de las piezas impresas. Estas limitaciones, descritas en la literatura, explican la dispersión observada en los resultados mecánicos y plantean la necesidad de optimizar los parámetros de procesamiento.

Desde el punto de vista económico, el prototipo fue fabricado con un costo total de \$128.650 CLP, cifra inferior al valor de equipos comerciales de \$190.000 CLP. El costo de producción del filamento reciclado se estimó en \$35 CLP por metro, lo que representa un ahorro respecto a los \$45 CLP por metro del filamento PETG comercial. Además, los indicadores financieros (VAN positivo y TIR cercana al 20 %) evidencian la viabilidad del sistema en escenarios de pequeña escala.

Se confirmó que el trabajo valida la factibilidad técnica y económica de producir filamento 3D a partir de botellas recicladas, aunque reconoce que el rPET no alcanza plenamente las propiedades mecánicas de filamentos comerciales como el PLA. La investigación resalta la importancia de mejorar las etapas de pretratamiento y sugiere como línea futura la incorporación de aditivos, mezclas poliméricas y una segunda máquina que permita unir los tramos extruidos para obtener filamentos continuos de calidad comercial. Estos avances permitirán fortalecer el aporte del rPET a la manufactura aditiva sostenible y a la economía circular.

Abstract

3D printing has experienced significant growth in recent years; however, the high cost of commercial filaments and the accumulation of plastic waste, especially PET bottles, pose both economic and environmental challenges. In this context, the present work aimed to design, build, and validate a prototype machine capable of transforming recycled PET bottles into 3D printing filament, thus contributing to waste valorization and the circular economy.

The methodology included the mechanical design and fabrication of the main subsystems—fiber cutting, heating block, power transmission, and winding—along with the selection of low-cost materials and the integration of thermal and speed control systems. Extrusion tests were performed with fibers of different thicknesses, followed by the printing of standardized specimens and tensile tests according to ASTM D638. Finally, an economic evaluation was carried out, considering manufacturing costs, production estimates, and comparison with commercial alternatives.

Experimental results showed that rPET filament exhibits lower mechanical properties compared to PLA: an average tensile strength of 20.9 MPa and a modulus of 1.5 GPa, versus 60.2 MPa and 12 GPa for PLA. Nevertheless, rPET demonstrated a higher deformation before fracture (average of 18.2 %), making it a viable alternative for applications where flexibility and sustainability are prioritized. These findings are consistent with recent studies reporting similar values for recycled filaments, confirming that although the initial hypothesis of achieving properties comparable to commercial filaments was not fully met, the material retains potential for specific applications.

Critical limitations of rPET were identified, mainly related to pre-processing stages (washing, drying, and moisture control) and interlayer quality during FDM printing, which affect both filament homogeneity and the repeatability of printed parts. These limitations, also reported in the literature, explain the variability observed in the mechanical results and highlight the need to optimize processing parameters.

From an economic perspective, the prototype was built at a total cost of 128,650 CLP, which is lower than the value of commercial extruders (\approx 190,000 CLP). The production cost of recycled filament was estimated at 35 CLP per meter, representing savings compared to 45 CLP per meter for commercial PETG filament. Furthermore, financial indicators (positive NPV and IRR close to 20 %) demonstrate the viability of the system at a small-scale level.

It was confirmed that this work validates the technical and economic feasibility of producing 3D printing filament from recycled PET bottles, although it acknowledges that rPET does not fully match the mechanical properties of commercial filaments such as PLA. The study emphasizes the importance of improving pre-treatment stages and suggests as future work the incorporation of additives, polymer blends, and the development of a second machine capable of joining extruded segments to obtain continuous filaments with commercial quality. These improvements will strengthen the contribution of rPET to sustainable additive manufacturing and the circular economy.

Contenido

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas.....	2
Glosario	3
Nomenclatura	3
1 Introducción	4
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Hipótesis.....	5
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Descripción del trabajo	6
2 Marco Teórico	7
2.1 Procesos de reciclaje Pet.....	7
2.2 Extrusión de filamento	8
2.2.1 Etapas del proceso.....	8
2.3 Materiales de impresión 3D.....	9
2.4 Sistema de transmisión de potencia.....	10
2.5 Control de temperatura	10
2.6 Teoría de engranajes.....	11
2.6.1 Relación de transmisión.....	11
2.6.2 Fuerzas de los engranajes sobre la máquina	11
2.7 Pruebas de cubo en impresión 3D.....	12
2.8 Caracterización mecánica del filamento.....	14
3 Estado del Arte.....	15
3.1 Máquinas para extrusión de Pet reciclado.	16
3.2 Caracterización del filamento Pet reciclado.....	17
4 Diseño y fabricación.....	18
4.1 Diseño general de la máquina y consideraciones de diseño.....	18
4.2 Descripción de componentes.	18
4.2.1 Motor eléctrico y sistema de transmisión.....	18
4.2.2 Sistema de extrusión.....	20

4.2.3	Sistema de soportes	21
4.2.4	Control de velocidad.	22
4.2.5	Control de temperatura	23
4.2.6	Fuente de poder.....	25
4.2.7	Sistema de corte de la botella	25
4.3	Cálculos de diseño.....	26
4.3.1	Dimensionamiento del eje.....	26
4.3.2	Chaveta	30
4.4	Ensamblaje del sistema.....	31
4.5	Consideraciones de seguridad.	32
5	Resultados caracterización del filamento.....	33
5.1	Ensayos preliminares de extrusión	33
5.2	Resultados pruebas de impresión	35
5.3	Preparación de probetas para ensayos de tracción	37
5.4	Ensayo de tracción	39
5.5	Resultados experimentales	41
6	Evaluación Económica	45
6.1	Costos de fabricación.....	45
6.2	Indicadores VAN y TIR.....	45
6.3	Comparación con soluciones comerciales	46
6.4	Capacidad de producción	47
7	Conclusiones.....	48
8	Referencias.....	49
9	Anexos.....	51

Lista de Figuras

Figura 1:Proceso de fabricación filamento rPET.	9
Figura 2: Fuerzas Producidas en un diente recto.....	12
Figura 3: Prueba de impresión cubo.	13
Figura 4: Impresora creality ender 3 V3.	13
Figura 5: Impresora creality K1 MAX.....	14
Figura 6: Geometría de la probeta tipo IV utilizada en ensayos de tracción, según norma ASTM D638.	15
Figura 7: Dimensiones motor DC.	19
Figura 8: Engranajes diseñados.....	19
Figura 9: Bloque calentador.....	20
Figura 10: Bloque calentador.....	20
Figura 11: Soporte eje.	21
Figura 12: Soporte motor.	21
Figura 13: Controlador de velocidad.....	22
Figura 14: Diagrama de conexiones controlador de velocidad.....	23
Figura 15: Controlador PID.	23
Figura 16: Relé utilizado conexión resistencia.....	24
Figura 17:Conexiones controlador PID y cartucho calentador.....	24
Figura 18: Fuente de poder conectada a la alimentación motor y controlador de velocidad.....	25
Figura 19: Sistema de corte de botella.....	25
Figura 20: Diagrama de cuerpo libre Eje.....	28
Figura 21: Diseño del eje.....	29
Figura 22: Ensamblaje sistema.....	31
Figura 23: Ensamblaje completo de piezas fabricadas.....	32
Figura 24: Filamento obtenido con fibra de 6 mm.....	33
Figura 25: Filamento obtenido con fibra de 8 mm.....	34
Figura 26: Filamento obtenido con fibra de 10 mm.....	34
Figura 27: Corte transversal rPET.....	35
Figura 28: Resultados prueba de impresión cubo.	36
Figura 29: Probeta impresa en impresora creality ender 3 V3.....	36
Figura 30: Probetas PLA norma D638 IV.	38
Figura 31: Probetas rPET norma D638 IV.....	39
Figura 32: Probetas PLA ensayadas.	40
Figura 33: Probetas rPET ensayadas.....	41
Figura 34: Gráfica esfuerzo vs deformación.....	42
Figura 35: Gráfica esfuerzo vs deformación rPET.....	43

Lista de Tablas

Tabla 1: Cuadro comparativo de alternativas de transmisión.	10
Tabla 2: Dimensiones de la probeta tipo IV según la norma ASTM D638	15
Tabla 3: Características engranajes	19
Tabla 4: Resultados de las fuerzas de los engranajes.	26
Tabla 5: Coeficientes de corrección.	27
Tabla 6 :Resultados de las sumatorias de fuerzas y momentos.	28
Tabla 7: Parámetros eje.....	29
Tabla 8: Parámetros chaveta.....	30
Tabla 9: Resultados esfuerzo de corte y aplastamiento chaveta.	31
Tabla 10: Parámetros utilizados para impresión probetas PLA.	37
Tabla 11: Tabla de parámetros para probetas impresión rPET.	38
Tabla 12: Condiciones ensayos de tracción.	39
Tabla 13: Resultados de los ensayos de tracción de probetas PLA tipo IV (ASTM D638).....	41
Tabla 14: Resultados de los ensayos de tracción de probetas rPET tipo IV (ASTM D638).....	43
Tabla 15: Costo total maquina extrusora rPET.....	45
Tabla 16: Indicadores evaluación económica.....	46

Glosario

PET	:	Tereftalato de polietileno
PLA	:	Ácido Poliláctico
PETG	:	Polietileno Tereftalato Glicol-modificado
FDM	:	Modelado por Deposición Fundida
VAN	:	Valor Actual Neto
TIR	:	Tasa interna de retorno

Nomenclatura

ω	:	$\left[\frac{mm}{s}\right]$	Velocidad angular del engrane
D	:	$[mm]$	Diámetro primitivo
i	:	$[-]$	Relación de transmisión entre dos engranajes
Z	:	$[-]$	Numero de dientes
F_t	:	$[N]$	Fuerza tangencial generada en el engranaje
F_r	:	$[N]$	Fuerza radial generada en el engranaje
M_{max}	:	$[Nm]$	Momento máximo
T	:	$[Nm]$	Torque generado por el engranaje impulsor
d	:	$[mm]$	Diámetro del eje
τ	:	$[MPa]$	Esfuerzo cortante máximo
A_c	:	$[mm^2]$	Área de corte
A_a	:	$[mm^2]$	Área de aplastamiento
K_f	:	$[-]$	Factor de concentración de esfuerzos
S_f	:	$[Pa]$	Resistencia a la fatiga
S_u	:	$[Pa]$	Límite de esfuerzo último
σ	:	$[MPa]$	Esfuerzo de aplastamiento

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La impresión 3D ha revolucionado diversos sectores industriales y domésticos gracias a su capacidad de fabricar piezas personalizadas con precisión y rapidez. Sin embargo, uno de los principales desafíos de esta tecnología es el costo y la sostenibilidad de los materiales utilizados, como el filamento plástico. Por otro lado, los residuos plásticos, especialmente las botellas de PET representan una grave amenaza para el medio ambiente, ya que pueden tardar entre 100 y 1000 años en degradarse. Cada año, alrededor de 8 millones de toneladas de plástico PET terminan en los océanos, afectando gravemente la vida acuática [1]. Se espera que este problema se agrave en los próximos años debido al alto consumo de este material. Ante este panorama, el reciclaje de botellas de PET para la fabricación de filamento de impresión 3D surge como una alternativa viable y sostenible [2]. Este enfoque no solo ayuda a reducir la contaminación por plásticos, sino que también permite desarrollar materiales más accesibles y promueve una economía circular, donde los desechos se transforman en recursos útiles para nuevas aplicaciones tecnológicas.

Siendo el reciclaje PET una necesidad urgente y viendo que existen diversas aplicaciones para este, es que se plantea el siguiente proyecto el cual busca diseñar una máquina que permita la obtención de fibras PET a partir de botellas recicladas, las que a futuro podrían ser utilizadas en cualquiera de estas aplicaciones. Hoy en día, el tereftalato de polietileno reciclado tiene diversas aplicaciones. Una de ellas se encuentra en la investigación de T.Ochi y S.Okubo[3], donde este material se emplea como refuerzo en concreto, mejorando sus propiedades mecánicas. Posteriormente, el concreto reforzado con rPET se utiliza en la construcción de pavimentos para caminos rurales y como soporte de entrada en la mina Hishikari, Japón.

Laura Mansilla y Marcos Ruiz [4] investigaron el reciclaje de botellas de PET con el objetivo de transformarlas en fibra corta de poliéster mediante un proceso de trituración y posterior procesamiento. Este material reciclado presenta una amplia variedad de aplicaciones en la industria textil, siendo utilizado en la fabricación de prendas de vestir, relleno para cojines, alfombras, cortinas y otros productos. Además, su uso contribuye a la reducción del impacto ambiental al disminuir la dependencia de fibras sintéticas derivadas del petróleo.

Por otro lado, Ashwani Kumar [5] llevo a cabo una investigación aplicando rPET como material base una variedad de compuestos de matriz polimérica. Su estudio analizó el impacto rPET en las propiedades mecánicas, térmicas y estructurales de estos compuestos, evaluando su viabilidad en comparación con polímeros vírgenes. Además, exploró el uso de diferentes refuerzos, como fibras naturales y sintéticas, así como la incorporación de micro y nano-rellenos, con el objetivo de mejorar la resistencia, durabilidad y sostenibilidad de los materiales resultantes.

Ahora para lo siguiente tenemos la investigación de Lazlo Toth y Emese Slesak [6], se exploró la extrusión de filamentos a partir de mezclas de rPET de baja calidad y

postindustrial, combinado con etileno-butil-acrilato-glicidil-metacrilato (EBA-GMA) en diferentes proporciones. Posteriormente, estos filamentos fueron utilizados en la impresión 3D mediante tecnología de fabricación de filamento fundido. La investigación demostró que la combinación de rPET con un aditivo elastomérico mejora significativamente la resistencia al impacto de las piezas impresas en 3D, lo que las hace más duraderas y versátiles. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de este aditivo, las piezas pueden volverse más porosas, afectando su resistencia mecánica. A pesar de ello, las muestras impresas mantuvieron un equilibrio en sus propiedades, logrando una resistencia a la flexión del 40 % al 60 % en comparación con las piezas moldeadas por inyección. Estos resultados indican que el uso de rPET modificado es una alternativa viable y sostenible para reemplazar plásticos tradicionales como el ABS en la impresión 3D, permitiendo la fabricación de piezas con diseños personalizados y buen rendimiento mecánico.

Esta investigación busca ofrecer soluciones sostenibles y accesibles para mitigar la contaminación plástica y fomentar la economía circular. La fabricación de una máquina capaz de transformar botellas de PET recicladas en filamento para impresión 3D no solo representa una alternativa eficiente para reutilizar residuos plásticos, sino que también contribuye a reducir los costos de producción y a fortalecer la sostenibilidad en la fabricación aditiva [7]. Dado que el PET es uno de los plásticos más utilizados y, a su vez, uno de los principales contaminantes ambientales, su reciclaje se vuelve esencial para minimizar su impacto en los ecosistemas y disminuir la dependencia de materiales vírgenes. En este contexto, la reutilización del PET en aplicaciones de alto valor agregado, como la impresión 3D, no solo amplía su ciclo de vida útil, sino que también promueve un modelo de producción más responsable y alineado con las necesidades ambientales y económicas actuales.

1.2 Hipótesis

El uso de botellas PET recicladas como materia prima para la fabricación de filamento de impresión 3D permite obtener un material con propiedades mecánicas y térmicas comparables a los filamentos comerciales, reduciendo el impacto ambiental y los costos de producción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

Obtener filamento de impresión 3D a través de extrusión de tereftalato de polietileno presente de botellas recicladas.

1.3.2 Objetivos específicos

OE1: Determinar las especificaciones de la máquina de obtención de filamento 3D, incluyendo capacidad de producción, dimensiones del filamento y compatibilidad con diferentes tipos de impresoras 3D FDM.

OE2: Seleccionar y justificar los materiales adecuados y aplicar técnicas de fabricación para construir los sistemas diseñados, garantizando su durabilidad y precisión.

OE3: Realizar pruebas operativas para evaluar la calidad del filamento producido y la eficiencia del proceso.

OE4: Determinar la resistencia mecánica del material obtenido por impresión 3D para especificar posibles aplicaciones.

OE5: Evaluar la viabilidad económica del diseño y fabricación de la máquina para garantizar su sostenibilidad y competitividad.

1.4 Descripción del trabajo

OE1: Realizar una investigación exhaustiva de estudios previos relacionados con la obtención de filamentos 3D a partir de PET reciclado. Se analizarán las tecnologías existentes, sus ventajas y limitaciones, con el objetivo de establecer un marco teórico sólido que sirva de base para el diseño del sistema de extrusión.

OE2: Definir las especificaciones técnicas del filamento, incluyendo el diámetro, la tolerancia dimensional y las propiedades mecánicas requeridas. Diseñar el sistema de procesamiento de botellas de PET, abarcando las etapas de extrusión, enfriamiento y bobinado. Desarrollar e integrar los sistemas de extrusión, enfriamiento y bobinado, optimizando los parámetros críticos del proceso. Implementar el sistema de control operativo, incorporando sensores y reguladores para gestionar adecuadamente la temperatura y la velocidad de extrusión. Seleccionar los materiales adecuados y adquirir los componentes necesarios para la construcción del sistema. Fabricar e integrar los distintos subsistemas conforme al diseño establecido.

OE3: Realizar pruebas funcionales individuales de los sistemas de extrusión, enfriamiento y bobinado para validar su funcionamiento. Ajustar los parámetros operativos en función de los resultados obtenidos. Ejecutar pruebas operativas integrales para evaluar la calidad del filamento producido, considerando su diámetro, resistencia y uniformidad. Llevar a cabo pruebas de impresión 3D utilizando el filamento rPET, seguidas de ensayos mecánicos de tracción para determinar sus propiedades mecánicas. Además, se evaluarán sus características térmicas para validar su compatibilidad con procesos de fabricación aditiva.

OE4: Comparar los resultados obtenidos con las propiedades de filamentos comerciales, como el PLA, para evaluar el desempeño del filamento rPET.

OE5: Recopilar y analizar los costos asociados a la fabricación, operación y mantenimiento del sistema. Comparar estos costos con los de filamentos comerciales para evaluar la rentabilidad y sostenibilidad del filamento producido.

2 Marco Teórico

2.1 Procesos de reciclaje Pet.

El tereftalato de polietileno (PET) es uno de los polímeros más utilizados a nivel mundial, principalmente en la fabricación de envases, botellas y fibras textiles. Su creciente consumo ha generado una gran acumulación de residuos plásticos, lo que ha impulsado el desarrollo de diversas técnicas de reciclaje orientadas a minimizar su impacto ambiental y a extender su ciclo de vida útil.

2.1.1 Reciclaje mecánico.

El reciclaje mecánico es el método más comúnmente empleado debido a su bajo costo, simplicidad de operación y menor consumo energético. Este proceso consiste en la recolección, selección, lavado, trituración y fundición del PET para convertirlo nuevamente en materia prima que puede utilizarse en la fabricación de nuevos productos, como fibras, láminas, envases no alimentarios y, en este caso, filamentos para impresión 3D.

El procedimiento inicia con la separación de residuos plásticos por tipo y color, seguido de un lavado intensivo para eliminar impurezas, etiquetas y adhesivos. Luego, las botellas son trituradas hasta obtener hojuelas de PET, las cuales se secan y posteriormente se funden para ser reprocesadas.

Este método presenta algunas limitaciones técnicas, ya que el material reciclado puede sufrir degradación térmica y pérdida de propiedades mecánicas después de varios ciclos de reprocesamiento. Sin embargo, la adecuada selección y limpieza de los residuos puede minimizar estos efectos y permitir la obtención de productos de buena calidad [8].

2.1.2 Reciclaje químico.

El reciclaje químico implica la descomposición del PET en sus monómeros originales a través de procesos como la hidrólisis, la glicólisis o la metanólisis. Este tipo de reciclaje permite obtener materiales equivalentes a los polímeros vírgenes, por lo que el PET reciclado puede ser reutilizado incluso en aplicaciones alimentarias.

El reciclaje químico presenta la ventaja de restaurar las propiedades originales del material, pero es considerablemente más costoso que el reciclaje mecánico, requiere mayor cantidad de energía y demanda instalaciones industriales especializadas [7].

2.1.3 Selección del proceso de reciclaje.

Para aplicaciones a pequeña escala y proyectos orientados a la reutilización local de residuos, como es el caso de esta investigación, el reciclaje mecánico es la alternativa

seleccionada. Además, esta técnica permite transformar residuos fácilmente disponibles, como las botellas PET postconsumo, en nuevos productos útiles, fomentando la economía circular y reduciendo la contaminación ambiental.

El proceso de reciclaje mecánico se ha convertido en una herramienta fundamental en el manejo sustentable de residuos plásticos, con un potencial significativo en la fabricación de filamentos para impresión 3D, los cuales pueden mantener propiedades satisfactorias cuando se procesan correctamente.

En el contexto de este proyecto, se selecciona el reciclaje mecánico debido a su bajo costo y aplicabilidad a pequeña escala. No obstante, debe considerarse que el PET reciclado presenta una reducción en su peso molecular y cristalinidad tras múltiples ciclos térmicos [6], lo que afecta directamente su resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Esta condición explica la necesidad de un secado previo a la extrusión, ya que la presencia de humedad puede generar productos de baja calidad.

2.2 Extrusión de filamento

La extrusión de filamento 3D a partir de botellas de PET recicladas se realiza a través de un proceso adaptado de corte y transformación de las botellas, diferenciándose de los métodos tradicionales que emplean triturado y fundición directa de pellets.

El proceso inicia con el corte asistido de las botellas PET en fibras longitudinales de diferentes espesores, según el ancho original del envase. Para ello, la botella es guiada a través de una cuchilla de corte que ajusta y define el espesor requerido para la posterior fabricación del filamento. Estas fibras, obtenidas en tiras continuas, son introducidas directamente en un bloque calentador especialmente diseñado, que permite moldear la fibra sin necesidad de triturarla ni fundirla completamente. Este bloque calentador está equipado con una boquilla de salida de 1.75 mm de diámetro, la cual conforma la fibra PET reciclada en un filamento uniforme, adecuado para su uso en impresoras 3D FDM. A diferencia de los procesos convencionales que requieren la fundición total del polímero, esta metodología trabaja a temperaturas controladas cercanas a 210 °C, lo que permite moldear y calibrar la fibra sin alcanzar la temperatura completa de fusión del PET, logrando así un proceso más eficiente y de menor consumo energético.

2.2.1 Etapas del proceso.

En la Figura 1 se presenta las etapas evaluadas para la obtención del filamento rPet.

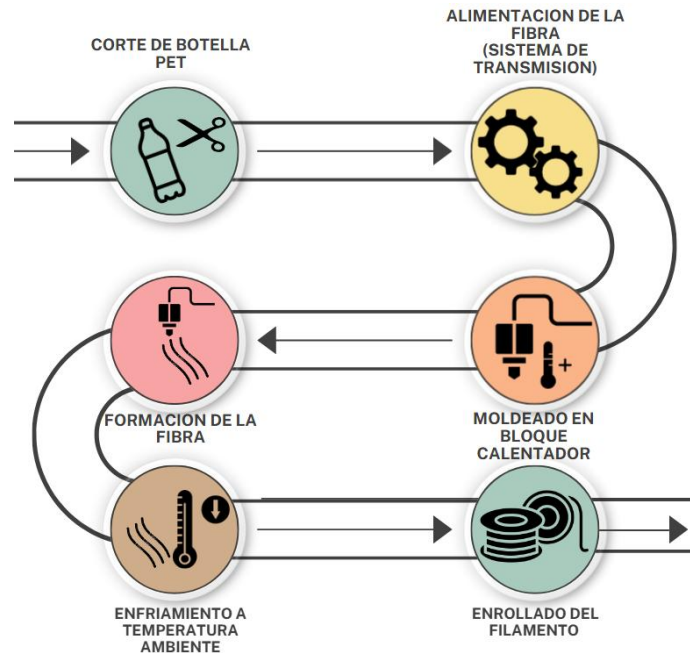


Figura 1:Proceso de fabricación filamento rPET.

2.3 Materiales de impresión 3D.

En esta sección se identifican y analizan los materiales más utilizados en la fabricación aditiva por deposición de filamento fundido, destacando aquellos aplicados en el presente trabajo para la producción de piezas del sistema extrusor. La elección de estos polímeros se justifica en función de sus propiedades mecánicas, térmicas y de procesabilidad, ya que estas determinan la viabilidad estructural y la estabilidad dimensional de los componentes fabricados.

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los materiales más empleados en impresión 3D debido a su facilidad de procesado, bajo costo y buena rigidez. Según Vidakis et al. (2016), presenta una resistencia a la tracción promedio en el rango de 60 MPa y un módulo de elasticidad cercano a 3.5 GPa, lo que lo hace adecuado para piezas de precisión y con baja exigencia térmica [9].

Por otro lado, el polietileno tereftalato modificado con glicol (PETG) y su versión reciclada (rPETG) constituyen materiales de interés en aplicaciones sostenibles. Estudios recientes demuestran que el reciclado de PETG permite mantener propiedades mecánicas comparables al material virgen, con resistencias a la tracción entre 48–52 MPa y módulo de elasticidad en torno a 2 GPa [10]. No obstante, el contenido de rPETG reduce la temperatura de degradación y la elongación a la rotura, lo que implica un compromiso entre sostenibilidad y desempeño mecánico.

Finalmente, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ampliamente utilizado en ingeniería, ofrece buena tenacidad y resistencia térmica. En investigaciones recientes se han incorporado cargas nano y micro de óxido de zinc (ZnO) para mejorar sus propiedades, alcanzando valores de resistencia a la tracción de 27–38 MPa y módulo elástico entre 0.6

y 0.8 GPa [11]. Estas mejoras abren la posibilidad de obtener piezas más robustas y funcionales mediante impresión 3D.

La comparación de estos materiales permite establecer criterios objetivos para la selección del polímero en función de las necesidades específicas de la máquina extrusora, considerando tanto el desempeño estructural como los aspectos de sostenibilidad.

2.4 Sistema de transmisión de potencia

La transmisión de potencia en la máquina diseñada se realiza mediante un sistema de engranajes rectos, seleccionado tras evaluar diversas alternativas como poleas, cadenas y transmisión directa por eje. Esta elección responde a su capacidad de operar con precisión a bajas velocidades, minimizando pérdidas por deslizamiento y garantizando una transmisión eficiente y constante del torque. Además, su fabricación mediante impresión 3D con filamento PETG permite reducir costos sin comprometer la funcionalidad.

En la Tabla 1 se presenta un cuadro comparativo entre los principales sistemas de transmisión evaluados, considerando criterios como eficiencia, mantenimiento, compacidad y comportamiento a bajas revoluciones. A partir de este análisis, los engranajes rectos se destacan como la opción más adecuada para este proyecto, debido a su fiabilidad, facilidad de montaje, bajo mantenimiento y adecuación a los requerimientos mecánicos del proceso de extrusión.

Tabla 1: Cuadro comparativo de alternativas de transmisión.

Sistema de Transmisión	Precisión de velocidad	Eficiencia mecánica	Mantenimiento	Costo de fabricación	Compacidad	Adecuado para bajas RPM	Nivel de ruido
Engranajes rectos	Alta	Alta (~95%)	Bajo	Bajo (impresión 3D)	Alta	Sí	Bajo
Poleas y correas	Media	Media (~90%)	Medio (requiere tensión)	Bajo	Baja	Limitado	Muy bajo
Cadenas	Media	Alta (~96%)	Medio (lubricación)	Medio	Media	Sí	Alto
Transmisión directa por eje	Alta	Muy alta	Bajo	Bajo	Alta	Sí	Muy bajo

La elección de engranajes rectos impresos en PETG se fundamenta en la necesidad de transmitir un torque estimado de 6,8 Nm a bajas revoluciones. Aunque su resistencia es inferior a la de engranajes metálicos, esta solución resultó suficiente para un prototipo de bajo costo. Alternativas como correas hubiesen introducido deslizamientos, afectando la precisión del arrastre del filamento.

2.5 Control de temperatura

El sistema de control de temperatura es fundamental para asegurar la correcta conformación del filamento durante el proceso de extrusión. Para ello, se implementa un controlador PID que regula la temperatura de un cartucho calefactor, utilizando una termocupla tipo K como sensor. Este sistema mantiene de forma precisa una temperatura de operación de aproximadamente 210 °C, valor óptimo para ablandar la fibra PET sin llegar a su punto de fusión.

El controlador PID ajusta dinámicamente la potencia suministrada al calentador, en función de la diferencia entre la temperatura real y el valor objetivo. Este tipo de controlador es ampliamente utilizado en procesos térmicos industriales debido a su capacidad de mantener condiciones estables frente a perturbaciones externas y su respuesta precisa en sistemas de calefacción [12], lo que mejora la calidad dimensional del filamento y evita la degradación del material.

En este trabajo se utiliza un controlador PID debido a su capacidad de mantener la temperatura en ± 2 °C, condición crítica para garantizar la calidad del filamento. Un control ON/OFF hubiese inducido fluctuaciones térmicas que generan vacíos o variaciones en el diámetro. Dado que el PET funde en torno a 250–260 °C, se opera en un rango inferior ≈ 210 °C para ablandar las fibras y reducir consumo energético.

2.6 Teoría de engranajes

Los engranajes son elementos mecánicos fundamentales para la transmisión de potencia entre ejes rotatorios, y su funcionamiento se basa en el contacto sucesivo de dientes perfilados que permiten transferir movimiento sin deslizamiento significativo. En esta máquina se utilizaron engranajes rectos, debido a su alta eficiencia, precisión a bajas revoluciones y facilidad de fabricación mediante impresión 3D.

El comportamiento cinemático de los engranajes se rige por la conservación de la velocidad tangencial en los diámetros primitivos, lo que implica que el producto entre la velocidad angular de cada engranaje y su respectivo diámetro primitivo debe mantenerse constante. Esta relación se visualiza en la ecuación (1).

$$\omega_1 \cdot D_1 = \omega_2 \cdot D_2 \quad (1)$$

Donde ω_1 y ω_2 son las velocidades angulares del engranaje motriz y del conducido, y D_1 , D_2 los diámetros primitivos.

2.6.1 Relación de transmisión.

La relación de transmisión entre dos engranajes puede determinarse a partir del cociente entre el número de dientes del engranaje conducido y el motriz, según la ecuación (2).

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2)$$

En esta ecuación Z_1 representa el número de dientes del engranaje motriz y Z_2 el del engranaje conducido. Esta relación permite calcular cómo se modifican la velocidad angular y el torque a lo largo del sistema de transmisión, siendo un parámetro clave en el diseño para lograr el arrastre uniforme del filamento durante la extrusión.

2.6.2 Fuerzas de los engranajes sobre la máquina

Para este diseño se estimó utilizar engranajes rectos debido a su mayor simplicidad geométrica a la hora de la impresión de la pieza, las fuerzas generadas en el engranaje están descritas en la Figura 2. por lo que la fuerza tangencial generada por los engranajes se obtiene directamente del torque a transmitir a través de la ecuación (3).

$$F_t = \frac{T}{\frac{D}{2}} \quad (3)$$

El ángulo entre la fuerza total y la componente tangencial se conoce como ángulo de presión, es utilizado para obtener la fuerza radial a través de la ecuación (3) donde para engranajes rectos posee 9 valores generalmente de 14.5° , 20° o 25° , en este caso se considera el ángulo de presión como 20° y se obtienen los valores de las fuerzas observados en la ecuación (4).

$$F_r = F_t \cdot \tan(\phi) \quad (4)$$

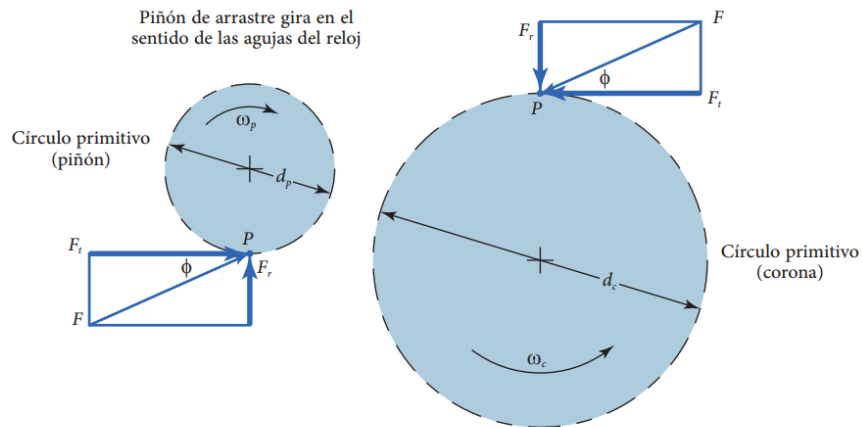


Figura 2: Fuerzas Producidas en un diente recto.

2.7 Pruebas de cubo en impresión 3D.

El cubo de prueba constituye una pieza de geometría simple utilizada ampliamente en la impresión 3D para evaluar la calidad del filamento y del proceso de deposición. A través de este ensayo es posible analizar distintos aspectos críticos: en primer lugar, la precisión dimensional, ya que la comparación entre la medida nominal y la obtenida en la pieza impresa permite determinar la capacidad del filamento de mantener un flujo estable; en segundo lugar, la calidad superficial, donde la homogeneidad entre capas refleja la consistencia del diámetro del filamento y su adhesión capa a capa, mientras que la presencia de rugosidades, vacíos o huecos internos indica variaciones en la extrusión; adicionalmente, la adhesión entre capas, pues uniones débiles o espacios visibles revelan problemas asociados a la viscosidad del material o a un control inadecuado de la temperatura; y finalmente, la estabilidad del proceso, ya que la continuidad de la impresión sin interrupciones confirma que el filamento puede ser procesado adecuadamente en impresoras FDM comerciales sin generar atascos ni fallas críticas, en la Figura 3 se presenta el cubo a imprimir.

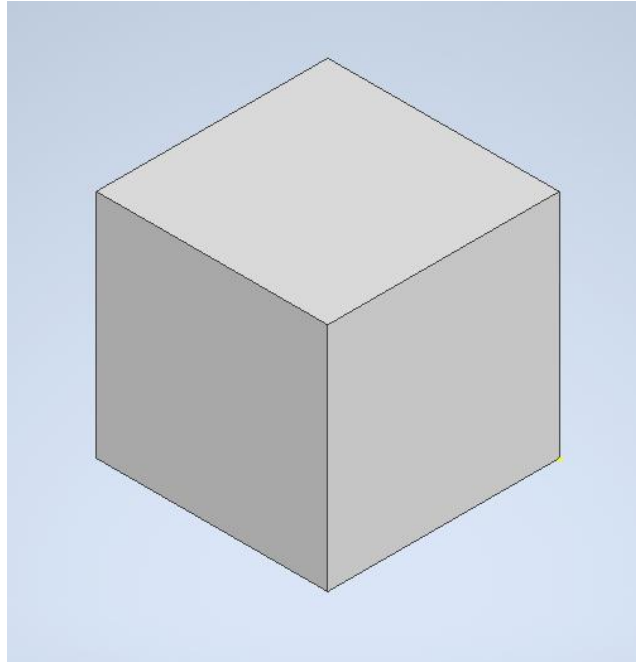


Figura 3: Prueba de impresión cubo.

Las impresiones se llevan a cabo en dos impresoras 3D FDM, una creality ender 3 V3, la cual se puede ver en la Figura 4 y la otra una creality K1 max en la Figura 5.



Figura 4: Impresora creality ender 3 V3.



Figura 5: Impresora creality K1 MAX.

Diversos autores recomiendan el uso de este tipo de pruebas para validar filamentos experimentales, ya que constituyen un método rápido, económico y representativo de la calidad del material antes de emplearlo en aplicaciones funcionales [13]. Además, la prueba de cubo permite comparar directamente el desempeño del rPET con filamentos comerciales como PLA o PETG, estableciendo una primera aproximación a sus limitaciones en precisión y acabado superficial.

En el contexto de este proyecto, la prueba del cubo se utilizó como herramienta preliminar para determinar la viabilidad del filamento rPET obtenido en el prototipo de extrusión. De este modo, se estableció un vínculo entre la calidad del filamento producido y su desempeño real en impresión 3D, lo cual complementa los ensayos mecánicos realizados posteriormente en probetas.

2.8 Caracterización mecánica del filamento.

La caracterización del filamento PET reciclado es fundamental para evaluar su calidad y comportamiento frente a los requerimientos de impresión 3D. Este análisis considera aspectos como la uniformidad dimensional, la capacidad de impresión y las propiedades mecánicas del material extruido.

En primer lugar, se realiza una medición del diámetro del filamento a lo largo de su longitud, con el fin de verificar su estabilidad geométrica. Esta variable es crítica para garantizar una alimentación constante en impresoras FDM, donde se espera una tolerancia típica de $\pm 0,05$ mm respecto al valor nominal de 1,75 [mm]. Estas mediciones siguen los lineamientos establecidos en la norma ASTM D638, la cual define parámetros dimensionales en materiales para fabricación aditiva.

Posteriormente, se realizan ensayos de impresión empleando parámetros estándar para evaluar la adherencia entre capas, la fluidez del material y la calidad superficial de las piezas impresas. Estas pruebas se ejecutan según la norma ASTM 52903-1, que establece los requisitos específicos para materiales de extrusión en sistemas FDM.

Finalmente, se aplican ensayos mecánicos básicos como tracción sobre piezas impresas, con el objetivo de estimar la resistencia estructural del material reciclado. Estos ensayos se alinean con lo indicado en la norma ISO 527-2, que establece métodos de prueba específicos para materiales plásticos bajo cargas de tracción.

Para estos ensayos, se emplearon probetas del tipo IV definidas en la norma ASTM D638. Esta geometría específica es recomendada para la caracterización mecánica de polímeros obtenidos mediante fabricación aditiva, particularmente para evaluar la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad. Las dimensiones de las probetas impresas, validadas previamente en estudios como el de Al Rashid [2], en la Tabla 2 se observan las dimensiones de las probetas.

Tabla 2: Dimensiones de la probeta tipo IV según la norma ASTM D638

Parte de la probeta	Dimensión [mm]
Longitud total	115
Ancho de la zona de sujeción	19
Ancho de la sección reducida	6
Espesor promedio	3.25

La Figura 3 presenta la geometría específica de las probetas utilizadas. Durante la impresión, se mantuvieron constantes los parámetros relevantes del proceso para asegurar la repetibilidad y comparabilidad de resultados. Las dimensiones fueron verificadas con un pie de metro digital (precisión de $\pm 0,01$ mm), realizando tres mediciones por muestra. Los ensayos de tracción se ejecutaron con una máquina universal equipada con una celda de carga de 1,5 kN, una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min y una longitud de galga de 50 mm, condiciones consistentes con las recomendaciones de la norma ASTM D638.

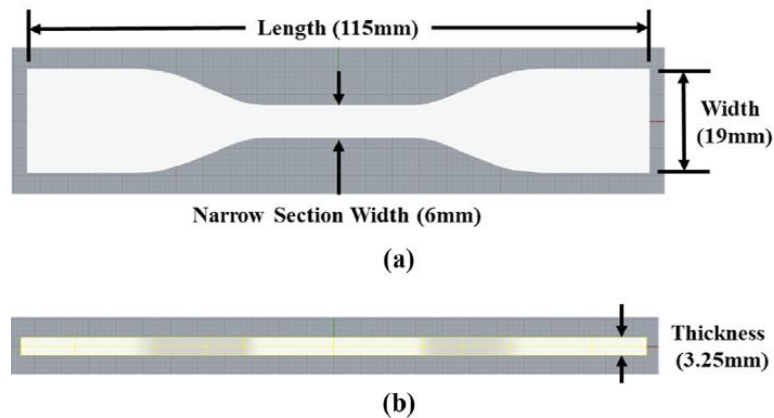


Figura 6: Geometría de la probeta tipo IV utilizada en ensayos de tracción, según norma ASTM D638.

3 Estado del Arte.

El presente capítulo tiene por objetivo contextualizar el trabajo de investigación a partir de una revisión de estudios recientes relacionados con el procesamiento de botellas PET para la obtención de filamento, así como la caracterización mecánica y funcional de dicho

material reciclado aplicado a impresión 3D. Esta revisión permite identificar enfoques previos, tecnologías utilizadas y resultados relevantes que sustentan la propuesta desarrollada en este proyecto.

En primer lugar, se analizan diversos desarrollos experimentales y comerciales de máquinas extrusoras adaptadas para trabajar con botellas de PET recicladas, destacando sus configuraciones técnicas, procesos de alimentación, sistemas de corte, control térmico y mecanismos de tracción del filamento. Estos antecedentes permiten reconocer las soluciones implementadas por otros autores y la evolución del diseño de equipos a pequeña y mediana escala.

Posteriormente, se revisan investigaciones centradas en la evaluación de propiedades físicas y mecánicas del filamento PET reciclado, incluyendo su resistencia a tracción, estabilidad dimensional, comportamiento térmico y desempeño en procesos de impresión aditiva por deposición fundida. Estas referencias son fundamentales para validar el comportamiento del filamento desarrollado y compararlo con estándares o materiales comerciales.

3.1 Máquinas para extrusión de Pet reciclado.

El diseño de máquinas extrusoras adaptadas al procesamiento de PET reciclado ha sido objeto de creciente interés, especialmente en contextos de economía circular y fabricación distribuida. Diversos estudios han explorado la viabilidad técnica de transformar botellas plásticas en filamento utilizable en impresión 3D, empleando tecnologías accesibles y soluciones de bajo costo.

Rashwan y Zachary [13] utilizan un extrusor de doble husillo para procesar pellets de rPET mezclados con aditivos como PMDA, SEBS-g-MA y E-EA-GMA, con el objetivo de mejorar la ductilidad y el flujo del filamento. Con una temperatura de extrusión de 280 °C y velocidad de tornillo de 150 rpm, obtuvieron filamentos uniformes con buenas propiedades térmicas y mecánicas, apropiados para impresión FDM, lo que demuestra la eficacia de incorporar aditivos en el proceso de extrusión de rPET.

Un estudio reciente de Tolcha y Woldemichael [14] evalúa la influencia del diseño de extrusoras de escritorio sobre las propiedades del filamento rPET obtenido a partir de botellas recicladas. El trabajo se centró en el análisis de la estabilidad dimensional, la eficiencia de extrusión y la calidad de impresión del filamento fabricado en condiciones domésticas. Los autores concluyen que, mediante un control adecuado de parámetros como la temperatura del bloque calefactor y el diámetro de boquilla, es posible producir filamentos con tolerancias aceptables para impresión 3D. Además, se destacó la importancia de una geometría eficiente de los componentes de la extrusora para mejorar la homogeneidad del flujo del polímero reciclado y evitar degradación térmica.

En conjunto, estos desarrollos reflejan una tendencia creciente hacia la fabricación de máquinas accesibles para el reciclaje térmico del PET, priorizando soluciones de bajo costo, materiales locales, impresión 3D para componentes estructurales y control simplificado. La investigación que se realiza se basa en estas referencias, lo cual, se propone una máquina compacta que prescinde del proceso de triturado, alimentándose directamente de fibras longitudinales de PET cortadas manualmente, lo que representa un enfoque novedoso y eficiente frente a los sistemas tradicionales de extrusión.

3.2 Caracterización del filamento Pet reciclado

La caracterización del filamento reciclado es esencial para evaluar su aptitud en impresión 3D y compararlo con materiales comerciales.

Manoj Nikam y Passad Pawar [15] investigaron sobre una boquilla de 1.6 mm de diámetro con bloque calentador para garantizar un control preciso de la temperatura durante la extrusión del filamento. Su estudio exploró la viabilidad de producir filamento de impresión 3D sostenible a partir de botellas recicladas PET, logrando un diámetro consistente de 1.65 mm. Además, realizaron un análisis de elementos finitos (FEA) en SolidWorks para comparar las propiedades mecánicas del PET reciclado con el PLA, evaluando tensión, deformación y desplazamiento. Los resultados ofrecen información valiosa sobre el potencial del PET reciclado como una alternativa ecológica en la fabricación aditiva.

Gonzales y Pearce [16] evaluaron la viabilidad técnica de utilizar hojuelas recicladas de PET y HDPE como insumo para impresión 3D a gran escala mediante fabricación granular por fusión. El estudio demuestra que, tras procesos básicos de limpieza y trituración, es posible imprimir objetos de gran volumen con materiales reciclados multimateriales, logrando una reducción de costos de hasta 88 %. Esta investigación refuerza el potencial del rPET como material reutilizable en entornos de reciclaje distribuido y manufactura aditiva sostenible.

En un estudio reciente, Lendvai y Singh [17] evaluaron el uso de polvo de mármol residual como agente de refuerzo en compuestos de PET reciclado. Se fabricaron mezclas con distintos porcentajes de polvo (0–20 %) mediante extrusión e inyección, y se caracterizaron mediante técnicas térmicas y mecánicas. Los resultados mostraron que el polvo de mármol puede actuar como nucleante, incrementando la temperatura de cristalización del rPET, aunque también redujo su cristalinidad. A nivel térmico, se observó un leve aumento en la estabilidad de descomposición. En cuanto al comportamiento mecánico, los análisis DMA revelaron una mejora en la rigidez del material y una adecuada interacción entre fases, aunque a contenidos superiores al 5 % de refuerzo se evidenció una pérdida de eficiencia por aglomeración. Este estudio respalda el potencial del rPET modificado como material compuesto funcional para aplicaciones estructurales ligeras en impresión 3D y fabricación aditiva.

Liu y Nguyen. [18] evaluaron el desempeño del rPET y PETG en impresión 3D utilizando la técnica de fabricación granular por fusión (FGF), aplicando un diseño de experimentos para estudiar la influencia de variables como espesor de capa, densidad de relleno y número de contornos. El rPET alcanzó una resistencia máxima a tracción de 26,4 MPa, y el rPETG 44,8 MPa, dependiendo de las condiciones de impresión. Los análisis térmicos y espectroscópicos confirmaron la estabilidad estructural de ambos materiales tras el proceso de impresión. Estos resultados evidencian que tanto el rPET como el rPETG son materiales técnicamente viables para aplicaciones de manufactura aditiva sostenible mediante FGF, ofreciendo una alternativa real al uso de polímeros vírgenes.

4 Diseño y fabricación.

El presente capítulo describe detalladamente el proceso de diseño y fabricación de la máquina de extrusión desarrollada con el propósito de transformar botellas de tereftalato de polietileno recicladas en filamento útil para impresión 3D. Esta sección aborda tanto las decisiones de diseño conceptual como los procedimientos técnicos seguidos para la materialización del prototipo, considerando aspectos funcionales, estructurales, térmicos y económicos.

4.1 Diseño general de la máquina y consideraciones de diseño.

El sistema se organiza en cuatro módulos principales: un módulo de alimentación, un módulo de extrusión térmica, un sistema de tracción y un módulo de control. En conjunto, permiten alimentar una fibra de PET, moldearla térmicamente en forma cilíndrica y enrollarla de manera continua para su posterior uso.

El módulo de alimentación permite el ingreso controlado del material previamente cortado. La extrusión térmica se lleva a cabo mediante un bloque calefactor que ablanda el material sin llegar a su punto de fusión, seguido de una boquilla calibrada para garantizar un diámetro uniforme del filamento. El sistema de tracción utiliza un motor DC de baja velocidad (10 RPM) acoplado a engranajes rectos impresos en 3D, lo que permite generar el torque necesario para el arrastre sin comprometer la precisión del sistema. Finalmente, el módulo de control, compuesto por un controlador PID para la temperatura y un controlador PWM para la velocidad del motor, permite ajustar finamente los parámetros críticos del proceso.

En cuanto a las consideraciones de diseño, se priorizó la estabilidad dimensional del filamento, adoptando un control preciso de la velocidad de extrusión y de la temperatura en el bloque calefactor. Dado que el PET reciclado puede presentar variaciones en sus propiedades térmicas y mecánicas, el sistema fue diseñado con tolerancias amplias y con la posibilidad de regular los parámetros de operación. Se eligieron engranajes en lugar de correas por su mayor precisión en la transmisión de torque a bajas revoluciones, y se optó por imprimir estas piezas en PETG para equilibrar resistencia mecánica y facilidad de fabricación.

4.2 Descripción de componentes.

4.2.1 Motor eléctrico y sistema de transmisión.

El movimiento del sistema es generado por un motor DC de 12 V y 10 RPM, el cual se visualiza en la Figura 7, el cual fue seleccionado por su alto torque, necesario para arrastrar la fibra PET a través del sistema. Para garantizar una transmisión precisa y constante, se optó por un sistema de engranajes rectos, fabricados mediante impresión 3D con filamento PETG. Esta elección ofrece buena resistencia mecánica y permite un diseño más compacto en comparación con sistemas de poleas. En la Tabla 3 se presentan las características de los engranajes.

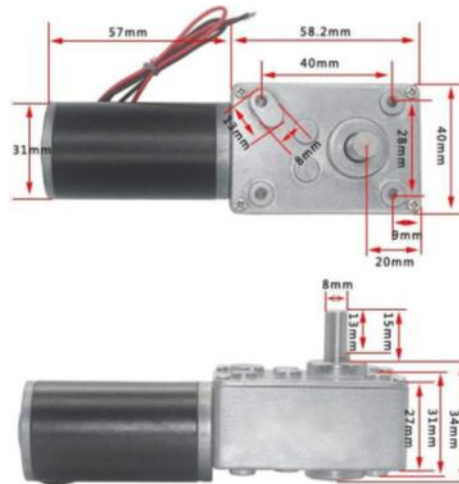


Figura 7: Dimensiones motor DC.

Tabla 3: Características engranajes

Engranaje	Diámetro primitivo [mm]	Número dientes
Piñón	60	15
Corona	100	25

Se optó por un motor DC de baja velocidad y alto torque, ya que este tipo de componente entrega directamente las condiciones de operación requeridas para el arrastre del filamento sin necesidad de reductores adicionales. La elección respondió a criterios de bajo costo, alta disponibilidad en el mercado y simplicidad de integración, suficientes para un prototipo de laboratorio. El uso de un motor más potente habría incrementado los costos sin aportar ventajas significativas, dado que el proceso opera a bajas revoluciones.

Los engranajes diseñados se presentan en la Figura 8.



Figura 8: Engranajes diseñados.

4.2.2 Sistema de extrusión.

El bloque calefactor presentado en la Figura 9, compuesto por un cartucho calentador cilíndrico, es responsable de moldear la fibra PET en forma de filamento. La temperatura de trabajo fue fijada en torno a 210 °C, suficiente para ablandar el PET sin llegar a su punto de fusión (≈ 250 °C), evitando su degradación.



Figura 9: Bloque calefactor.

La boquilla instalada en el extremo del bloque es calibrada para un diámetro cercano a 1.75 mm, ajustada manualmente con taladro. Esta dimensión es compatible con la mayoría de las impresoras 3D del mercado.

El sistema completo se presenta en la Figura 10, este mantiene un flujo uniforme del material, sin obstrucciones ni pérdida de temperatura.

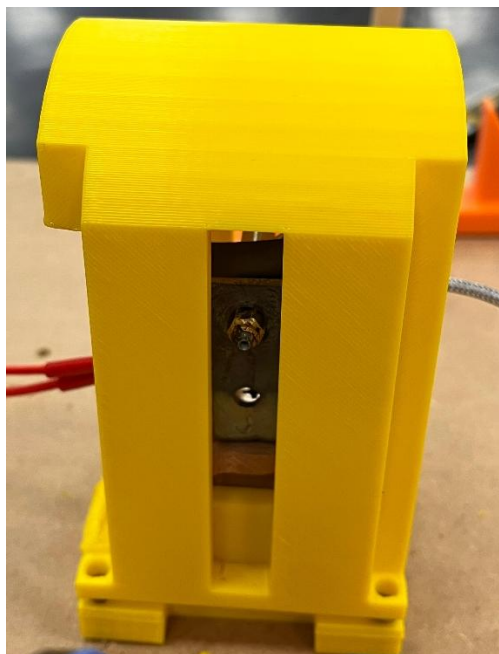


Figura 10: Bloque calefactor.

4.2.3 Sistema de soportes

Para el montaje del eje de extrusión Figura 11, se diseñó un soporte fijo tipo pedestal cuya geometría permite alojar un rodamiento de bolas de ranura profunda con designación SKF 61806 [19], el cual posee un diámetro interior de 30 mm, exterior de 42 mm y un ancho de 7 mm. El diseño del soporte fue modelado considerando una estructura tipo “triángulo reforzado” para maximizar la rigidez y minimizar la flexión ante cargas radiales y axiales transmitidas por el eje. Se incorpora una cavidad cilíndrica con tolerancias acordes a un ajuste de interferencia leve para asegurar la correcta sujeción del rodamiento sin provocar deformaciones indeseadas.

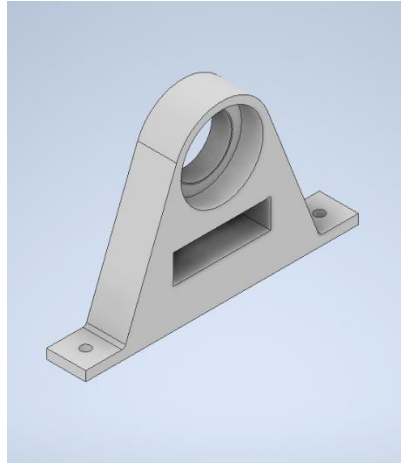


Figura 11: Soporte eje.

El soporte fue fabricado mediante impresión 3D utilizando PLA, un polímero termoplástico biodegradable ampliamente utilizado en prototipado funcional. La elección se fundamenta en la facilidad de manufactura, bajo costo y resistencia suficiente para las solicitaciones mecánicas moderadas que se esperan durante la operación. La base del soporte incluye perforaciones para su fijación directa mediante tornillos a la estructura de madera de la máquina, lo que proporciona una sujeción firme y estable sin necesidad de insertos metálicos adicionales.

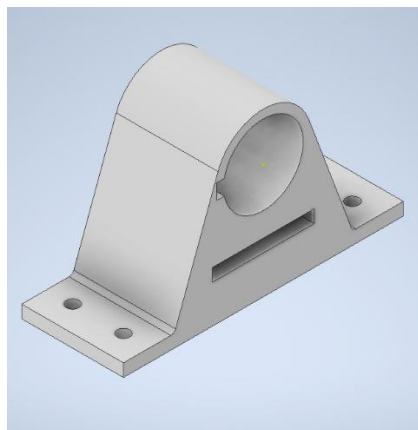


Figura 12: Soporte motor.

En la Figura 12 se presenta el diseño de una geometría tipo puente reforzado [20], con laterales inclinados que permiten distribuir uniformemente las cargas generadas por el peso del motor y los pares de arranque, además de reducir concentraciones de esfuerzo. Se incorporó una cavidad cilíndrica para alojar el cuerpo del motor y ranuras laterales abiertas que permiten la ventilación y reducen el consumo de material.

Los soportes se fabricaron en PLA mediante impresión 3D debido a la facilidad de manufactura, bajo costo y rapidez de reemplazo en caso de fallas. Si bien materiales como PETG o aluminio ofrecen mayor resistencia, el PLA resultó adecuado para un prototipo experimental, dado que las cargas aplicadas eran reducidas y la prioridad del proyecto estaba en la validación funcional del concepto más que en la robustez estructural definitiva.

4.2.4 Control de velocidad.

Debido a las variaciones geométricas del material de entrada se incorporó un controlador de velocidad PWM, el cual se observa en la Figura 13 permite ajustar con precisión la velocidad del motor. Esto garantiza una extrusión estable y un diámetro constante del filamento.

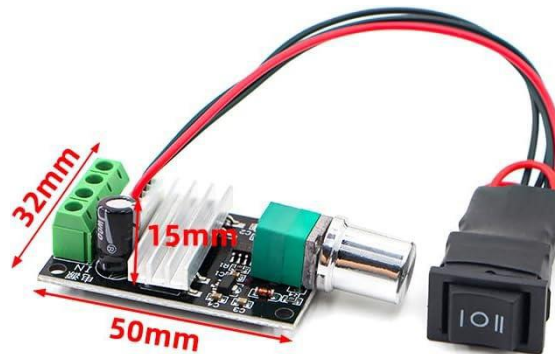


Figura 13: Controlador de velocidad.

La Figura 14 muestra el esquema de conexión del controlador de velocidad modelo 1203BB, utilizado para regular un motor DC mediante un potenciómetro de 100 kΩ con interruptor integrado. El controlador recibe alimentación desde una fuente de corriente continua, respetando la polaridad indicada para evitar daños.

El sistema permite variar la velocidad del motor y cambiar el sentido de giro mediante un interruptor de reversa, sin necesidad de reconfigurar el cableado. Además, incluye un LED indicador del estado operativo. Este módulo fue elegido por su simplicidad, bajo costo y adecuada compatibilidad con motores utilizados en sistemas de extrusión.

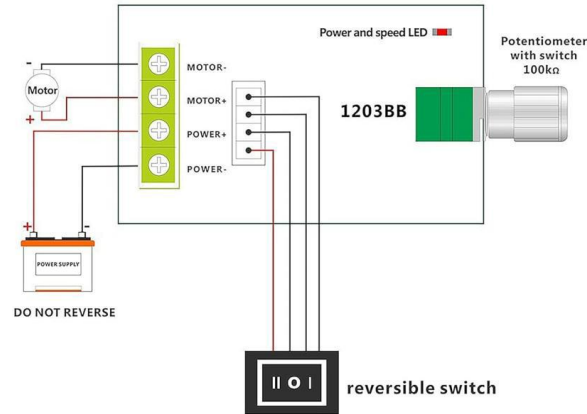


Figura 14: Diagrama de conexiones controlador de velocidad.

Se incorporó un controlador de velocidad manual para el motor con el fin de regular la velocidad de arrastre del filamento de forma práctica y económica. Este tipo de control es suficiente para el prototipo, ya que permite ajustar experimentalmente las condiciones de tracción del material sin necesidad de sistemas más complejos.

4.2.5 Control de temperatura

Para regular la temperatura del bloque calefactor, se implementó un controlador PID que trabaja en conjunto con una termocupla tipo K y un relé de estado sólido que se puede visualizar en la Figura 15. Este sistema permite mantener la temperatura deseada con una alta precisión, evitando fluctuaciones térmicas que podrían afectar la calidad del filamento.



Figura 15: Controlador PID.

La Figura 16 se presenta el relé utilizado en la conexión, lo cual este permite el paso del voltaje para cierta temperatura seteada desde el controlador PID.



Figura 16: Relé utilizado conexión resistencia.

En la Figura 17 se presenta las conexiones para alimentar el cartucho calefactor, donde se presenta los diferentes componentes necesarios para alimentar la resistencia del bloque calentador.

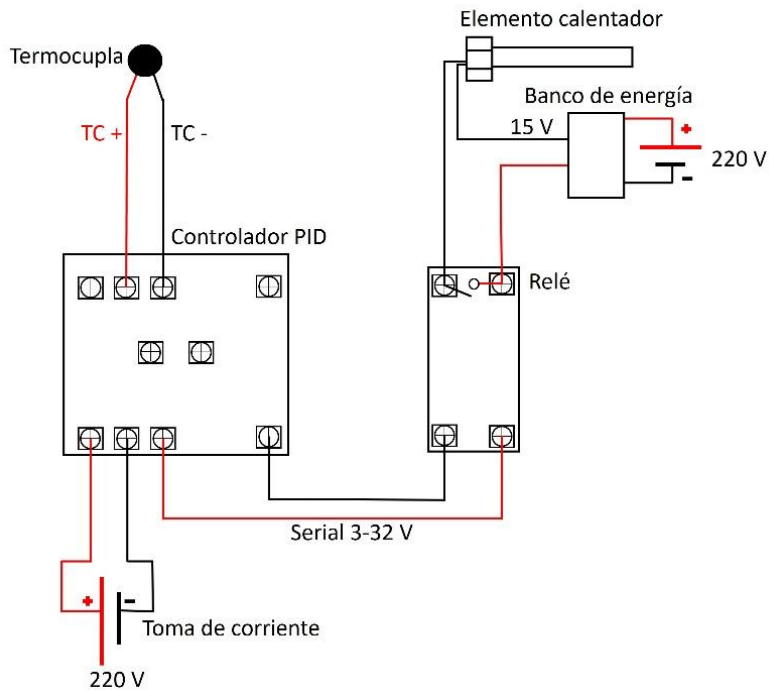


Figura 17: Conexiones controlador PID y cartucho calentador.

El controlador PID fue implementado para regular la temperatura del bloque calefactor, manteniéndola en un rango estable (± 2 °C). Esta elección se justifica porque un control ON/OFF hubiera generado fluctuaciones térmicas que afectan el diámetro del filamento. El PID asegura una extrusión más homogénea y controlada, fundamental para evaluar la viabilidad del rPET como insumo de impresión 3D.

4.2.6 Fuente de poder.

Se utilizó una fuente de alimentación universal con voltaje variable, capaz de entregar 12 VDC tanto al motor como al controlador de velocidad, simplificando la conexión y asegurando la estabilidad del sistema.



Figura 18: Fuente de poder conectada a la alimentación motor y controlador de velocidad.

4.2.7 Sistema de corte de la botella

La Figura 19 muestra el sistema de corte implementado para las botellas PET, diseñado para obtener fibras con espesores de 6 mm, 8 mm y 10 mm. Estos valores fueron seleccionados con el propósito de analizar el comportamiento del material bajo distintas condiciones de corte y alimentación, considerando que la variación en el espesor de la fibra influye directamente en la uniformidad del filamento y en la estabilidad del proceso de extrusión. El sistema corresponde a un corte vertical asistido por una guía, la cual mantiene la botella en un ángulo controlado, permitiendo que la trayectoria de la cuchilla sea más precisa y que los espesores obtenidos se mantengan constantes a lo largo de la fibra.

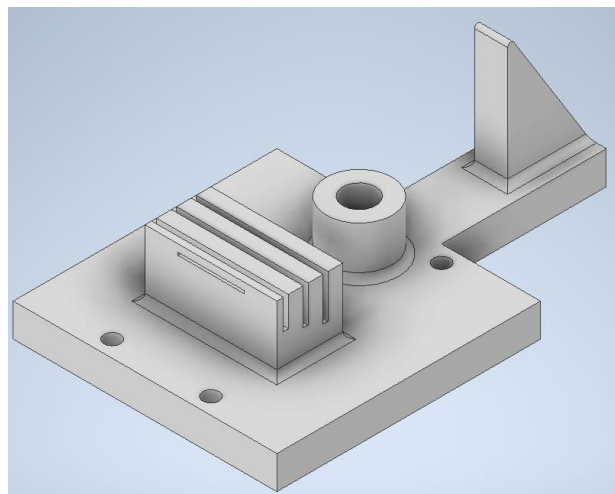


Figura 19: Sistema de corte de botella.

El sistema se diseñó para trabajar en disposición horizontal por motivos de simplicidad estructural y estabilidad del prototipo. La configuración vertical, aunque común en equipos comerciales, requiere una estructura de soporte más robusta y encarece el montaje. La disposición horizontal facilitó la integración de los componentes y permitió validar la funcionalidad general de la máquina.

4.3 Cálculos de diseño.

El diseño estructural de la máquina considera como elemento clave el eje sobre el cual se monta el sistema de tracción y recolección del filamento. Este eje está sometido principalmente a esfuerzos de torsión y flexión debido al torque transmitido por los engranajes y la carga radial proveniente del carrete de enrollado. Utilizando las ecuaciones de la teoría de engranajes se presenta en la Tabla 5 los resultados.

Tabla 4: Resultados de las fuerzas de los engranajes.

Fuerza tangencial [N]	Fuerza radial [N]
228.7	83.2

4.3.1 Dimensionamiento del eje.

El eje principal de la máquina cumple la función de transmitir el torque generado por el engranaje impulsor hacia el sistema de bobinado, además de servir de soporte para el carrete recolector. Dado que este componente está fabricado en PLA mediante impresión 3D, los criterios de dimensionamiento no se basan únicamente en resistencia mecánica convencional, sino también en limitaciones del material, geometría impresa y rigidez. Siguiendo el procedimiento para el diseño de ejes otorgado por [21] descrito bajo la norma ANSI B106.1M para el diseño de ejes, tenemos la teoría de falla de Von Mises descrita por la ecuación (5) tomando en cuenta las siguientes consideraciones: El torque es constante, por lo que el esfuerzo alterno a torsión es cero, no existe una fuerza axial debido a que se trabaja con engranajes rectos y el esfuerzo de flexión es variable e invertido, por lo que el esfuerzo medio de flexión es cero.

$$\sqrt{\left(\frac{K_f \cdot \sigma_a}{S_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{0.6S_r}\right)^2} = \frac{1}{N} \quad (5)$$

Donde el esfuerzo alterno a la flexión al ser variable e invertido, el esfuerzo máximo es igual al esfuerzo mínimo, pero en sentido contrario por lo que reemplazando en la ecuación 6 considerando el módulo de sección circular no hueca de la ecuación 7 se obtiene la ecuación 8.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - (-\sigma_{min})}{2} = \frac{M_{max}}{Z} \quad (6)$$

$$Z = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \quad (7)$$

$$\sigma_a = \frac{32 \cdot \sigma_{max}}{\pi \cdot D^3} \quad (8)$$

Ahora para el esfuerzo medio se considera el esfuerzo constante de torsión el cual se obtiene de la ecuación 9 considerando el módulo polar para una sección circular de la ecuación 10, obteniendo finalmente la ecuación 11.

$$\sigma_m = \frac{T}{Z'} \quad (9)$$

$$Z' = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \quad (10)$$

$$\sigma_m = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D^3} \quad (11)$$

Luego se sustituye las ecuaciones 8 y 11 en la ecuación 5 y factorizando y despegando en función de D obtenemos la siguiente ecuación 12.

$$\sqrt[3]{10.19 \cdot N^2 \sqrt{\left(\frac{K_f \cdot M_{max}}{S_f}\right)^2 + 0.694 \left(\frac{T}{S_r}\right)^2}} = D \quad (12)$$

Para poder continuar con la obtención del diámetro se requiere obtener la resistencia a la fatiga afectada por los factores de corrección pertinentes los cuales están tabulados en la Tabla 5 y descritos en la ecuación 13, además de las propiedades del material en este caso PLA obtenidos de [22], [23] donde se considera que el límite de fatiga del material es de alrededor del 25% del esfuerzo último.

Tabla 5: Coeficientes de corrección.

Propiedad	Valor
Coeficiente de temperatura (CT)	1
Coeficiente de tamaño (Ct)	0.818
Coeficiente de superficie (Cs)	0.6
Coeficiente de carga (Cc)	1

$$S_f = CT \cdot Ct \cdot Cs \cdot Cc \cdot 0.2 \cdot S_u \quad (13)$$

Para el valor de Kf se considera un chaflán con borde cortante (valor de 2.5) donde existirá el cambio de diámetro del eje para las secciones donde se encontrarán los descansos de los rodamientos.

Ahora solo queda obtener los valores de los momentos para eso se realiza un balance de fuerzas y momentos en el eje descrito por las ecuaciones 14 hasta la 17.

$$\sum F_x = R_{x1} - Fr + R_{x2} \quad (14)$$

$$\sum F_y = R_{y1} - Ft + R_{y2} \quad (15)$$

$$\sum M_x = -\frac{3}{100} \cdot Fr \cdot + \frac{8.5}{100} \cdot R_{x2} \quad (16)$$

$$\sum M_y = -\frac{3}{100} \cdot Ft \cdot + \frac{8.5}{100} \cdot R_{y2} \quad (17)$$

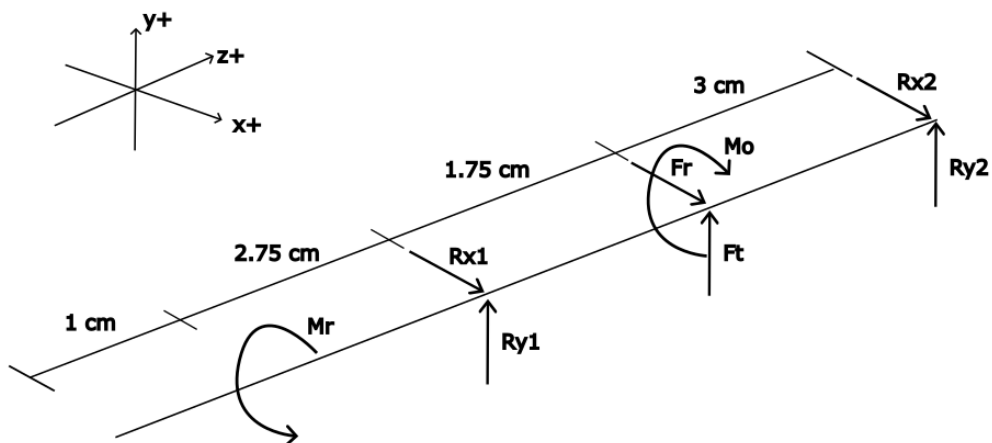


Figura 20: Diagrama de cuerpo libre Eje.

En donde para las reacciones se obtuvieron los resultados observados en la Tabla 6 las cuales serán utilizadas para obtener los diagramas de momento flector los que se utilizan en la ecuación 18 para obtener el momento resultante.

Tabla 6 :Resultados de las sumatorias de fuerzas y momentos.

Reacción	Valor (N)
Rx1	52.5

Ry1	144.4
Rx2	30.7
Ry2	84.2

$$M_t = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (18)$$

Finalmente se obtiene el valor del momento resultante para la sección donde se encuentra la corona en el eje el cual tiene un valor de 2.69 Nm y se procede a calcular el diámetro mínimo que debe poseer el eje reemplazando todos los valores obtenidos en la ecuación 12, llegando a un valor mínimo para el diámetro de 28 mm por lo que cualquier valor por sobre este se considerará aceptable, pero para el diseño se elegirá un diámetro de 30 mm para el eje.

El eje mostrado en la Figura 21 fue diseñado para transmitir el torque desde el engranaje al sistema de bobinado, asegurando alineación y estabilidad. Se determina por un diámetro de 30 mm, adecuado para soportar los esfuerzos de torsión considerando el uso de PLA impreso en 3D. El canal para chaveta permite una unión mecánica rígida con el engranaje, evitando el deslizamiento relativo.

Además, se incorporaron topes integrados en los extremos, cuya función es limitar el movimiento axial del carrete sin necesidad de fijaciones externas. El diseño fue optimizado para impresión FDM, cuidando la orientación de capas y evitando concentraciones de esfuerzo, lo que permite una solución funcional, liviana y de bajo costo.

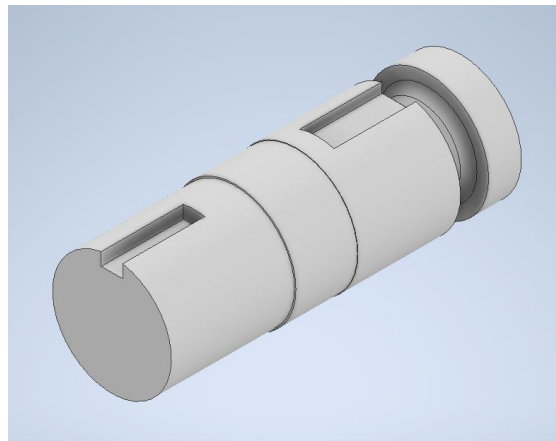


Figura 21: Diseño del eje.

suficiente para bajas velocidades. En la Tabla 7 se observan los parámetros de diseño.

Tabla 7: Parámetros eje.

Parámetro	Valor	Unidad
-----------	-------	--------

Torque transmitido	6.86	Nm
Velocidad de rotación eje	10	RPM
Diámetro del eje	30	mm

En esta sección con la ecuación (19) se calcula el esfuerzo cortante máximo por torsión, para determinar que el eje no sea una zona crítica.

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3} \quad (19)$$

En donde tenemos un resultado de 1.29 MPa lo que permite compararlo con un valor conservador de resistencia al corte del PLA impreso en 3D fue 5 MPa [24]. Por lo tanto, el esfuerzo inducido se encuentra por debajo del límite del material, se concluye que el eje es estructuralmente apto para soportar las cargas de operación previstas.

4.3.2 Chaveta

La chaveta utilizada en el sistema tiene como función transmitir el torque del engranaje al eje, evitando el deslizamiento relativo entre ambas piezas. Para ello, debe resistir tanto el esfuerzo de corte como el esfuerzo de aplastamiento, según los criterios clásicos para chavetas prismáticas. Los parámetros utilizados para el cálculo de la chaveta se observan en la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros chaveta.

Parámetro	Valor	Unidades
Torque transmitido	6.86	Nm
Diámetro eje	30	mm
Largo útil de la chaveta	20	mm
Ancho de la chaveta	8	mm
Altura de la chaveta	7	mm
Área de corte	160	mm
Área de aplastamiento	70	mm

A partir de los parámetros mencionados se puede calcular la fuerza tangencial en la ecuación (20).

$$F_t = \frac{2T}{d} \quad (20)$$

Por lo tanto, la fuerza da tangencial da un valor 457.3 N, para la ecuación (21) y (22), se necesita para determinar y comparar los modos de falla para la chaveta los cuales son corte y aplastamiento.

$$\tau_c = \frac{F}{A_c} \quad (21)$$

$$\sigma_a = \frac{F}{A_a} \quad (22)$$

En la Tabla 9 podemos revisar los resultados obtenidos para el diseño de la chaveta. Por lo que se determina que la chaveta diseñada cumple con los parámetros mencionados en la Tabla 8.

Tabla 9: Resultados esfuerzo de corte y aplastamiento chaveta.

Modo de falla	Valor calculado	Limite admisible PLA
Corte	2.86 MPa	5 MPa
Aplastamiento	6.53 MPa	10 MPa

4.4 Ensamblaje del sistema.

El ensamblaje del sistema se realizó integrando los componentes previamente diseñados y fabricados mediante impresión 3D, siguiendo una configuración modular que facilita el montaje, mantenimiento y futuras modificaciones. La disposición de los elementos mecánicos y eléctricos fue optimizada para garantizar el alineamiento funcional y la estabilidad durante la operación.

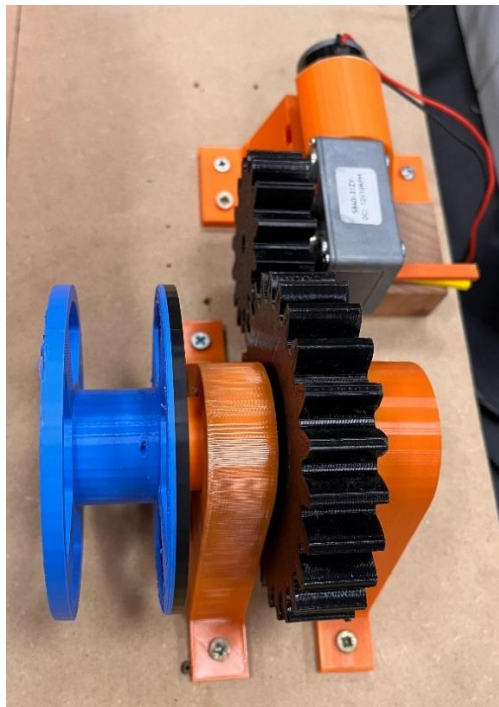


Figura 22: Ensamblaje sistema

La Figura 22 muestra el conjunto motor-eje-engranaje, donde se aprecia el acoplamiento directo del motor DC al engranaje impulsor negro, el cual está unido al eje de 30 mm de diámetro mediante la chaveta prismática. Esta conexión permite una transmisión directa del torque sin deslizamiento, mientras que el soporte impreso en PLA asegura la fijación del eje a la base, reduciendo vibraciones y desviaciones durante el funcionamiento.

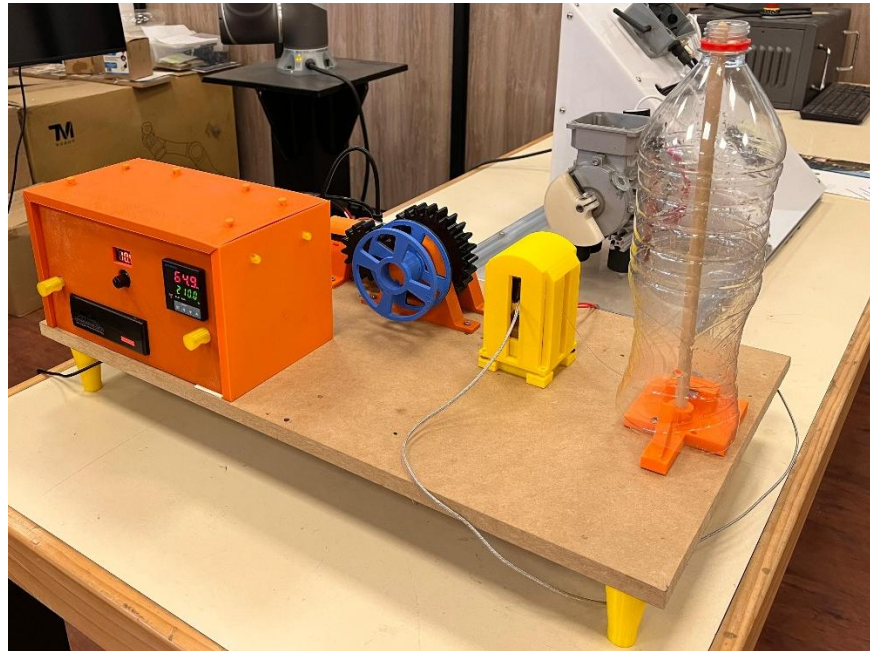


Figura 23: Ensamblaje completo de piezas fabricadas.

En la Figura 23 se presenta una vista del sistema completo en funcionamiento. Se observa la disposición lineal de los módulos: el sistema de tracción, el bloque calefactor, y el carrete recolector, alineados sobre una base de madera. El filamento de rPET es arrastrado desde la boquilla caliente hasta el eje de bobinado, asegurando un flujo continuo y sin obstrucciones. El eje recolector, guiado por topes impresos integrados, gira de forma sincronizada con la salida del filamento, manteniendo una tensión constante.

4.5 Consideraciones de seguridad.

Aunque el presente prototipo fue desarrollado con fines experimentales, se identifican riesgos asociados al contacto con superficies calientes, partes móviles y conexiones eléctricas. En particular, el bloque calefactor, que alcanza temperaturas superiores a 200 °C, representa un riesgo de quemaduras si no se manipula con precaución. De igual forma, el sistema de tracción incorpora engranajes y un eje giratorio que pueden ocasionar atrapamientos durante la operación.

Con el fin de reducir estos riesgos, se implementaron cubiertas de protección para los componentes eléctricos y una carcasa en la zona del bloque calefactor, destinada a evitar el contacto directo con la superficie a alta temperatura. Estas medidas básicas permiten aumentar la seguridad durante la operación del prototipo en un entorno experimental.

No obstante, aún se proyecta para trabajos futuros la incorporación de protecciones mecánicas adicionales en el sistema de transmisión, un interruptor de corte de emergencia y el desarrollo de un protocolo de operación segura, con el fin de garantizar condiciones más adecuadas para un uso continuo o en contextos de mayor escala.

5 Resultados caracterización del filamento.

5.1 Ensayos preliminares de extrusión

Como etapa inicial del proceso experimental, se realizan pruebas de extrusión utilizando fibras de PET obtenidas a partir del corte longitudinal de botellas recicladas. El objetivo de estas pruebas fue evaluar de manera cualitativa la influencia del espesor de la fibra de entrada sobre la estabilidad del proceso y la uniformidad del filamento resultante.

Se seleccionaron tres espesores de fibra: 6 mm, 8 mm y 10 mm [25], los cuales fueron alimentados directamente en el bloque calentador de la máquina diseñada. Durante las pruebas, se mantuvieron constantes la temperatura de operación y la velocidad de arrastre, con el fin de aislar el efecto del espesor como variable principal.

Los resultados obtenidos evidencian diferencias entre las muestras. En la Figura 24 se presenta el resultado del filamento hecho con fibra de 6 mm lo cual muestra interrupciones frecuentes en el flujo de material, lo que ocasionó irregularidades en el diámetro del filamento.

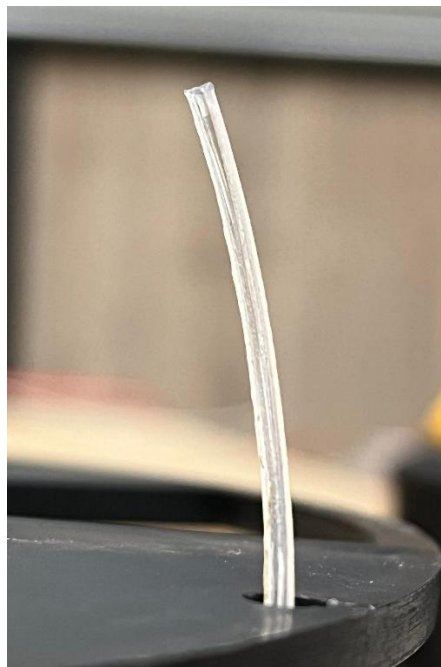


Figura 24: Filamento obtenido con fibra de 6 mm.

Por su parte, en la Figura 25 las fibras de 8 mm mostraron un desempeño más estable, con un flujo uniforme y un diámetro más constante a lo largo de la longitud extruida, lo que

permite evidenciar una calidad más consistente del filamento para así permitir una impresión mejor de calidad en la impresora 3D.

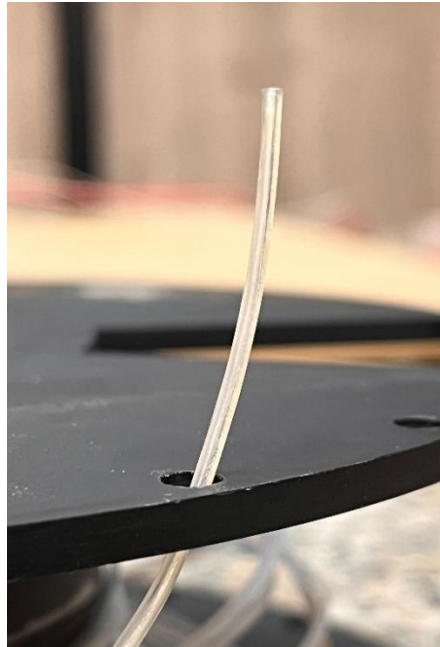


Figura 25: Filamento obtenido con fibra de 8 mm

En contraste, en la Figura 26 las fibras de 10 mm generaron atascamientos parciales en la zona de alimentación, dificultando la extrusión continua y provocando variaciones dimensionales, lo que influye en la calidad del material ya que muchas veces la velocidad de extrusión variaba y dejaba un tiempo mayor el filamento en la boquilla, lo que causaba deformaciones en el filamento.

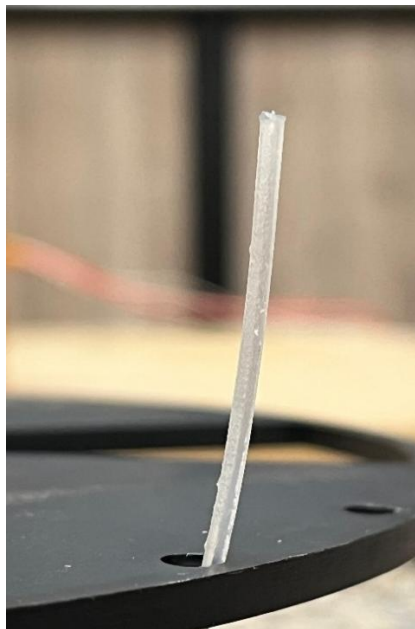


Figura 26: Filamento obtenido con fibra de 10 mm

En base a estas observaciones, se determinó que un espesor de 8 mm resultaba adecuado para la alimentación del sistema [25], al permitir un equilibrio entre la fluidez del material y la estabilidad térmica durante la extrusión. Estos resultados preliminares fueron utilizados como referencia para la preparación de las probetas de tracción, asegurando una mayor consistencia en el filamento destinado a los ensayos mecánicos. Sin embargo, al realizar un corte transversal del filamento, se evidenció una falta de densidad en su parte interna [25], tal como se muestra en la Figura 27.



Figura 27: Corte transversal rPET.

Esto requiere una velocidad mayor de paso del filamento para que logre una impresión de buena calidad, para ello se hacen pruebas de impresión lo que se puede visualizar en la Figura 28 para determinar la calidad a la cual el filamento puede imprimir.

5.2 Resultados pruebas de impresión

Durante la prueba de impresión se identificaron diversas limitaciones atribuibles tanto a la calidad del filamento rPET como al desempeño de la impresora utilizada. En particular, se observó una marcada variación en la calidad superficial del cubo de ensayo, evidenciada por irregularidades entre capas, presencia de espacios intersticiales y deficiencias en la adhesión capa a capa, tal como se aprecia en la Figura 28.



Figura 28: Resultados prueba de impresión cubo.

Se observó además una evidente heterogeneidad en el material, ya que la extrusión no fue completamente uniforme, generando zonas con acabado rugoso y variaciones en la transparencia del cubo impreso. A esta condición se sumaron las limitaciones del equipo empleado, el cual, al no contar con un sistema avanzado de control de flujo ni con una calibración específica para rPET, presentó dificultades para mantener una extrusión estable durante todo el proceso. En la Figura 29 se muestra una de las probetas impresas con la impresora Creality Ender 3 V3, donde se aprecia la influencia de estas restricciones. Estos resultados confirman la necesidad de emplear equipos de impresión con mayores prestaciones como es la impresora creality K1 max, que permitan ajustar de forma precisa parámetros críticos como la temperatura de boquilla, la velocidad de impresión y ventilación, a fin de mejorar la calidad de las piezas fabricadas con rPET.



Figura 29: Probeta impresa en impresora creality ender 3 V3.

A pesar de estas limitaciones, el cubo y la probeta fue fabricado de manera completa, confirmando que el filamento extruido puede ser procesado en impresoras FDM comerciales. No obstante, los resultados reflejan la necesidad de optimizar tanto la calidad del filamento como los parámetros de impresión, para lograr piezas con tolerancias geométricas y propiedades mecánicas comparables a las obtenidas con filamentos comerciales.

Estos resultados se alinean con lo reportado en la literatura, donde diferentes autores han señalado que el rPET presenta mayores desafíos en la impresión debido a su variabilidad dimensional y a la menor adhesión entre capas en comparación con PLA [25], [26].

5.3 Preparación de probetas para ensayos de tracción

Para la caracterización mecánica del filamento obtenido, se fabricaron probetas normalizadas destinadas a ensayos de tracción, siguiendo las directrices de la norma ASTM D638 para plásticos. En particular, se empleó la geometría Tipo IV, ampliamente utilizada en la evaluación de polímeros obtenidos mediante procesos de fabricación aditiva.

Las probetas fueron fabricadas mediante una impresora 3D de tecnología FDM, específicamente el modelo Creality K1 Max, empleando dos tipos de filamento: PLA de referencia comercial y rPET previamente extruido bajo condiciones controladas. Durante el proceso de impresión, se mantuvieron constantes los parámetros críticos con el objetivo de reducir la dispersión en los resultados y garantizar la repetibilidad del procedimiento, permitiendo así una comparación directa entre ambos materiales.

En la Tabla 10 se presentan los parámetros utilizados en la impresión de las probetas de filamento PLA.

Tabla 10: Parámetros utilizados para impresión probetas PLA.

Ajustes	Parámetros
Diámetro boquilla	0.4 mm
Altura de capa	0.2 mm
Velocidad de impresión	200 mm/s
Temperatura boquilla	220°
Temperatura cama	60°
Relleno	25%
Bucles de perímetro	8
Paredes superior e inferior	3

En la Figura 30 se presentan las probetas fabricadas con filamento PLA, destinadas a los ensayos de tracción con el propósito de determinar sus propiedades mecánicas y establecer una comparación con las obtenidas a partir de rPET.

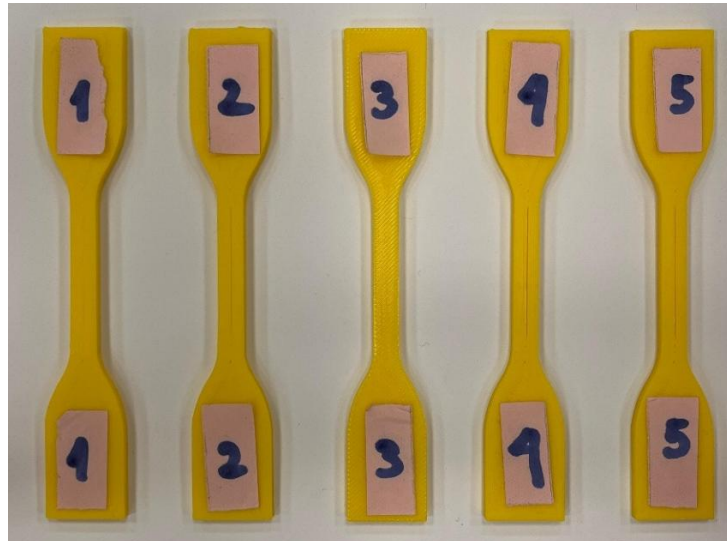


Figura 30: Probetas PLA norma D638 IV.

La Tabla 11 presenta los parámetros empleados en el proceso de impresión de las probetas fabricadas con filamento de rPET.

Tabla 11: Tabla de parámetros para probetas impresión rPET.

Ajustes	Parámetros
Diámetro boquilla	0.4 mm
Altura de capa	0.2 mm
Velocidad de impresión	50 mm/s
Temperatura boquilla	270°
Temperatura cama	80°
Relleno	25%
Bucles de perímetro	8
Paredes superior e inferior	3

En la Figura 31 se muestran las probetas fabricadas con filamento de rPET, utilizadas en los ensayos de tracción con el fin de determinar sus propiedades mecánicas y compararlas con las obtenidas a partir del filamento PLA.

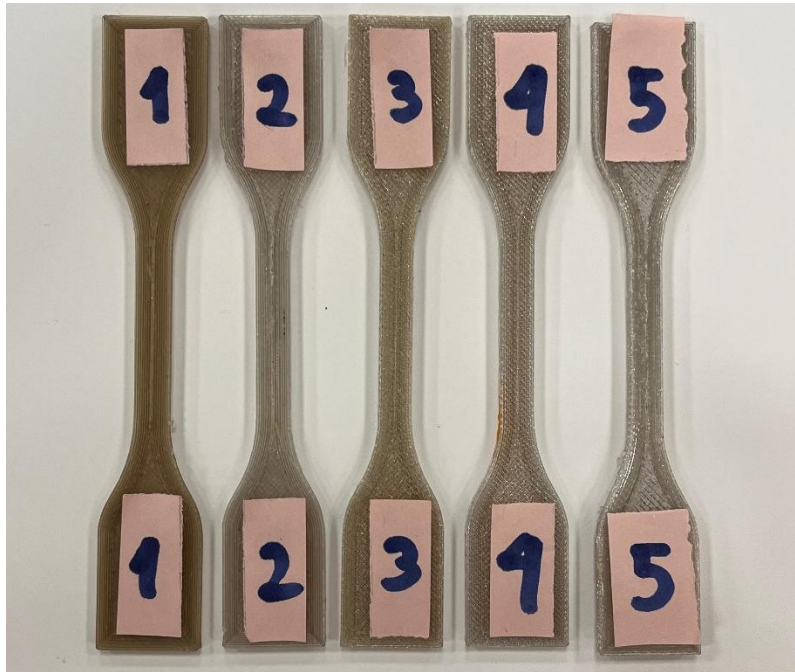


Figura 31: Probetas rPET norma D638 IV.

5.4 Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina Zwick Roell Z005 de ensayos equipada con una célula de carga de 5 kN, adecuada para materiales poliméricos de baja resistencia. El objetivo principal fue determinar la resistencia máxima a tracción, el módulo de elasticidad y la deformación a la rotura del filamento de PET reciclado impreso en probetas normalizadas.

El procedimiento experimental se desarrolló conforme a lo establecido en la norma ASTM D638, asegurando la trazabilidad y comparabilidad de los resultados. Para ello, cada probeta fue montada cuidadosamente en las mordazas de la máquina, procurando evitar concentraciones de esfuerzo adicionales derivadas de una sujeción incorrecta. En la Tabla 12 se muestra las condiciones de ensayos.

Tabla 12: Condiciones ensayos de tracción.

Condiciones ensayos	Parámetros
Velocidad de desplazamiento	5 mm/min
Longitud de mordazas	52.7 mm
Temperatura laboratorio	22±2 °C
Número de probetas ensayadas	5

En la Figura 32 se observa el comportamiento frágil de las probetas de PLA sometidas a tracción, caracterizado por la ausencia de una zona plástica definida y la fractura abrupta tras alcanzar el esfuerzo máximo. Este resultado es consistente con la naturaleza del PLA como polímero semicristalino con elevada rigidez y baja capacidad de deformación, lo que favorece modos de falla frágiles bajo carga uniaxial [10]. Estudios previos confirman que el PLA presenta módulo de elasticidad elevado (2,7–3,6 GPa) y elongación a la rotura limitada ($\leq 10\%$), lo cual explica la rápida propagación de la grieta sin un régimen plástico apreciable [10], [5].

Adicionalmente, en procesos de impresión FDM, el PLA suele exhibir fragilidad interlaminar debido a la limitada difusión de cadenas entre capas, lo que refuerza la ocurrencia de fallas abruptas en la dirección de la carga [18]. Esta condición se vio reflejada en las probetas ensayadas, donde la fractura se produjo de manera inmediata una vez alcanzado el esfuerzo máximo, confirmando que, aunque el PLA es un material con buena rigidez y estabilidad dimensional, su capacidad de absorción de energía y ductilidad es significativamente inferior a la del rPET [2].

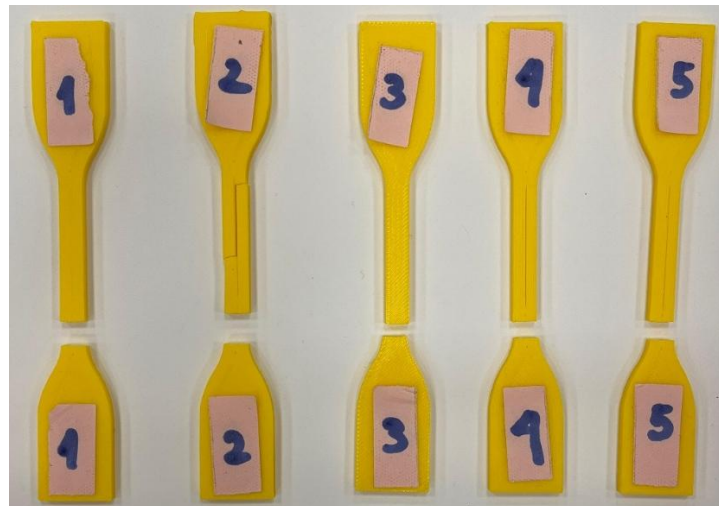


Figura 32: Probetas PLA ensayadas.

En la Figura 33 se presentan las probetas de rPET sometidas a tracción. Dado que el PET es un polímero semicristalino, su respuesta mecánica depende de la fracción cristalina y de la orientación molecular inducida por el procesamiento: mayores niveles de cristalinidad y menor favorecen comportamientos más frágiles, mientras que microestructuras menos ordenadas y con orientación adecuada tienden a exhibir cedencia por cizalle, estricción y mayor deformación antes de la rotura [6], [5]. En concordancia con ello, las probetas de rPET mostraron mayores niveles de deformación previa a la falla respecto del PLA, con una propagación no abrupta y rasgos compatibles con cedencia y coalescencia de microvacíos, más que con una fractura frágil pura [2], [15].

Adicionalmente, se identifican rasgos propios del proceso FDM que condicionan el modo de falla: adhesión interlaminar limitada (indicios de separación entre capas y superficies escalonadas), porosidad/espacios intersticiales y variaciones locales de deposición. Estos defectos actúan como concentradores de tensión y favorecen mecanismos mixtos de falla,

afectando tanto la resistencia máxima como la dispersión de resultados [18]. Por lo tanto, la combinación de la morfología semicristalina del rPET y la calidad de impresión (temperatura de boquilla, humedad del filamento, velocidad y ventilación) explica que las probetas presenten una falla de propagación gradual con mayor deformación global, a la vez que evidencia la necesidad de optimizar parámetros y pretratamientos para mejorar la cohesión entre capas y reducir defectos [9], [2].



Figura 33: Probetas rPET ensayadas.

5.5 Resultados experimentales

Una vez realizados los ensayos de tracción para probetas de PLA y rPET, se obtiene los registros de carga y elongación para cada probeta, los cuales fueron procesados a fin de calcular los parámetros mecánicos característicos del material. Para ello, se consideraron las dimensiones iniciales de la sección reducida de cada muestra, transformando los datos de carga en esfuerzo y las elongaciones en deformación unitaria.

Los resultados individuales y el valor promedio se resumen en la Tabla 13, donde se presentan los principales parámetros evaluados: esfuerzo máximo a tracción, módulo de elasticidad y módulo de Young.

Tabla 13: Resultados de los ensayos de tracción de probetas PLA tipo IV (ASTM D638).

Probetas PLA	Resistencia a la tracción [MPa]	Deformación por falla [%].	Módulo de Young [GPa]
1	59.86	12.45	12.04
2	60.08	14.06	12.32
3	59.72	11.44	12.40
4	60.74	12.06	11.70
5	59.97	11.17	13.84

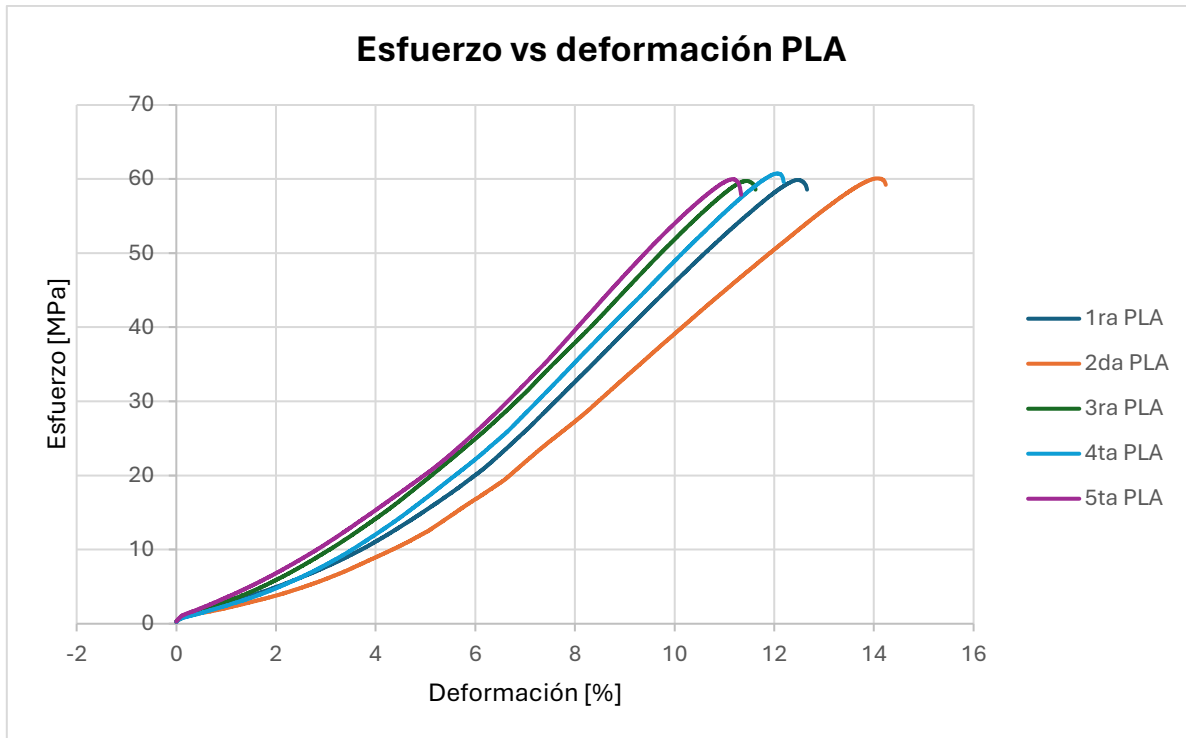


Figura 34: Gráfica esfuerzo vs deformación.

En la Figura 34 se presentan las curvas esfuerzo vs deformación obtenidas en los ensayos de tracción realizados sobre las probetas de PLA. Se observa un comportamiento típicamente frágil [10], caracterizado por la ausencia de una zona plástica definida. Las curvas muestran un tramo inicial lineal correspondiente al régimen elástico, seguido de un rápido ascenso hasta alcanzar el esfuerzo máximo, tras lo cual se produce la fractura sin evidenciar un alargamiento plástico significativo. El esfuerzo máximo promedio alcanzado fue de 60,2 MPa con una desviación estándar de $\pm 3,1$ MPa, mientras que la deformación a la rotura promedió 12,5 % con una dispersión de $\pm 0,9$ %. Estos resultados reflejan una adecuada repetibilidad entre probetas, aunque se identificó una ligera variación en una de ellas, posiblemente atribuida a defectos de impresión o a variaciones en el filamento utilizado.

Al comparar con la literatura, los valores obtenidos se encuentran en el rango reportado por otros autores para probetas de PLA impresas en 3D, donde se registran esfuerzos máximos entre 55–65 MPa y deformaciones a la rotura inferiores al 15 % [10], [5]. En este sentido, los resultados son similares a los presentados por Farah et al. [10], quienes reportaron un esfuerzo máximo cercano a 61 MPa, y se ubican ligeramente por debajo de los valores informados por Singh et al. [5], quienes señalaron resistencias próximas a 65 MPa. En general, el comportamiento mecánico obtenido es consistente con las propiedades atribuidas al PLA: un material de alta rigidez y limitada capacidad de deformación antes de la fractura, lo que explica su uso extendido en aplicaciones que requieren estabilidad dimensional, aunque con limitaciones en términos de resistencia al impacto y ductilidad

En la Tabla 14 se presentan los resultados correspondientes a las probetas de rPET, incluyendo los valores de esfuerzo máximo alcanzado y las deformaciones correspondientes a la rotura, parámetros fundamentales para la caracterización mecánica del material.

Tabla 14: Resultados de los ensayos de tracción de probetas rPET tipo IV (ASTM D638).

Probetas rPET	Resistencia a la tracción [MPa]	Deformación por falla.	Módulo de Young [GPa]
1	32.88	19.62	2.06
2	18.28	15.81	1.28
3	17.78	18.48	1.01
4	17.34	19.62	1.83
5	18.31	17.61	1.60

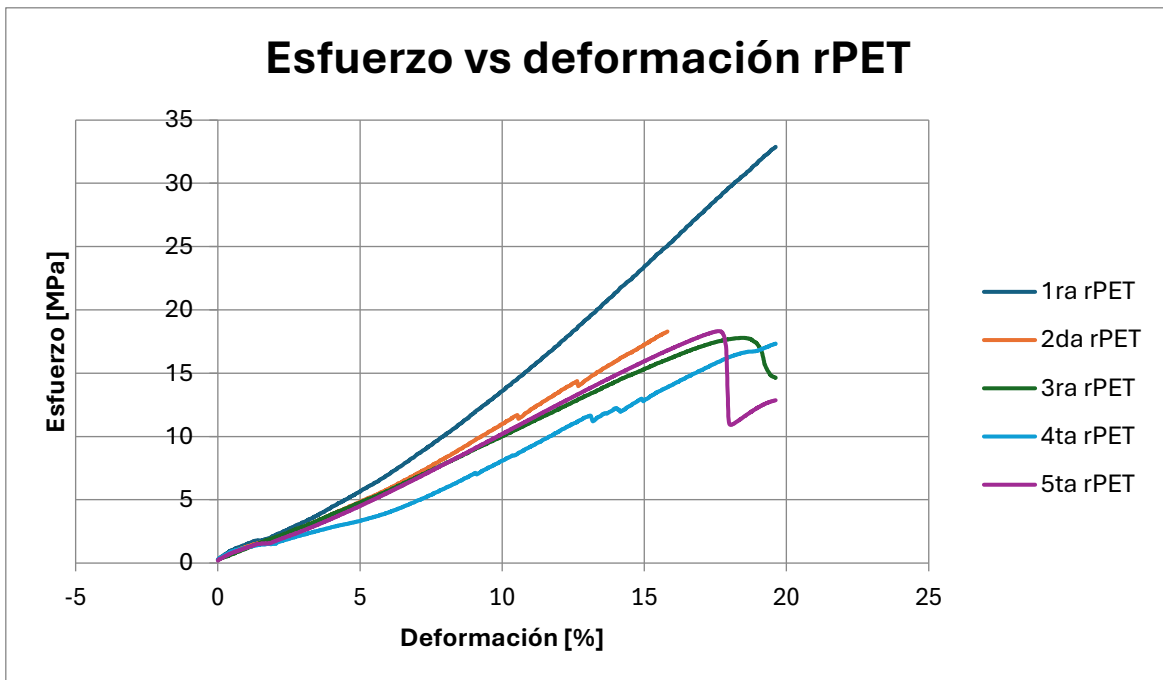


Figura 35: Gráfica esfuerzo vs deformación rPET.

En la Figura 35 se presentan las curvas esfuerzo vs deformación obtenidas en los ensayos de tracción realizados sobre las probetas de rPET. A diferencia del PLA, se observa un comportamiento con mayor capacidad de deformación, evidenciando un tramo plástico apreciable después del régimen elástico inicial [2]. Las curvas muestran un ascenso progresivo del esfuerzo hasta alcanzar un valor máximo en el rango de 17–33 MPa, seguido de una caída gradual asociada al inicio de la falla. El esfuerzo máximo promedio obtenido

fue de 20,9 MPa con una desviación estándar de $\pm 6,8$ MPa, mientras que la deformación a la rotura alcanzó valores entre 15–20 %, con un promedio de 18,2 % y una dispersión de $\pm 1,5$ %.

La mayor dispersión de resultados en comparación con el PLA puede atribuirse a las características propias del material reciclado, donde la historia térmica, la degradación durante procesos previos y la presencia de impurezas afectan la homogeneidad del filamento y, por ende, sus propiedades mecánicas [7], [6]. Al contrastar estos valores con lo reportado en la literatura, los resultados obtenidos son consistentes con los de Nikam y Pawar [6], quienes señalaron esfuerzos máximos cercanos a 22 MPa en filamentos elaborados a partir de botellas de PET, y con los de Al Rashid y Koç [2], quienes informaron resistencias en el rango de 18–30 MPa. Por otra parte, la deformación a la rotura medida 18 % es similar a la reportada en dichos estudios, confirmando que el rPET, aunque presenta menor rigidez y resistencia que el PLA, ofrece una mayor capacidad de deformación antes de la falla, lo que lo posiciona como un material con potencial en aplicaciones donde la flexibilidad sea prioritaria.

Desde un punto de vista ingenieril, los resultados permiten establecer que el PLA continúa siendo un material de referencia para aplicaciones que requieren alta rigidez y estabilidad dimensional, mientras que el rPET se plantea como una alternativa en contextos donde la sostenibilidad es un factor relevante, aun cuando su resistencia sea inferior. Esta diferencia de desempeño sugiere un posible enfoque complementario en las aplicaciones: el PLA resulta más adecuado para piezas estructurales ligeras y de precisión, mientras que el rPET puede destinarse a componentes en los que prime la reutilización de materiales y la reducción del impacto ambiental.

En términos generales, la comparación evidencia que el proceso de reciclaje de PET introduce limitaciones en las propiedades mecánicas frente a materiales vírgenes o comerciales como el PLA. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo validan la factibilidad técnica del uso de rPET en impresión 3D, siempre que se consideren sus características particulares en el diseño de piezas y se optimicen parámetros de impresión que permitan mejorar su homogeneidad y desempeño.

6 Evaluación Económica

La evaluación económica del proyecto tiene como objetivo determinar la viabilidad financiera de la fabricación de una máquina extrusora de filamento PET reciclado a pequeña escala, considerando el costo de adquisición de sus componentes y la comparación con alternativas comerciales disponibles en el mercado.

6.1 Costos de fabricación.

En la Tabla 15, se detallan los componentes adquiridos para la construcción del prototipo y sus respectivos valores en pesos chilenos (CLP).

Tabla 15: Costo total maquina extrusora rPET.

Componentes	Costo [CLP]
Motor	27150
Controlador PID	40000
Bloque calentador	11000
Fuentes de Poder	31500
Rodamientos	12000
Eje	500
Engranajes	1500
Tornillos y fijaciones	3000
Soportes impresos	2000
Total	128650

Este valor representa el costo directo de los materiales empleados para construir el prototipo, sin considerar mano de obra ni gastos indirectos como lo es la mano de obra y herramientas, pero estos se mencionan en el siguiente apartado de los indicadores económicos y flujo de caja del proyecto. Cabe destacar que gran parte de las piezas estructurales y de transmisión fueron fabricadas mediante impresión 3D, lo que permitió reducir significativamente los costos de manufactura.

6.2 Indicadores VAN y TIR.

En la Tabla 16 se presentan los indicadores financieros obtenidos a partir del flujo de caja proyectado del sistema. El análisis considera una inversión inicial de \$130.000 CLP para la construcción del prototipo, junto con un precio de venta de \$10.500 CLP por carrete de filamento y una cantidad base de 25 unidades anuales, a las cuales se aplicó un incremento de ventas del 10 % por año. Además, se incorporaron los principales costos de operación, incluyendo gastos de mantención periódica y la depreciación de los componentes de la máquina, así como los impuestos asociados a las utilidades los que se pueden visualizar en la sección de anexos. Con estos antecedentes fue posible calcular los flujos de caja

anuales y, a partir de ellos, estimar los indicadores de rentabilidad (VAN y TIR), que permiten evaluar de manera integral la viabilidad económica del proyecto.

Tabla 16: Indicadores evaluación económica.

Indicadores	Valores
VAN	16.7
TIR	19.7%

En el escenario de análisis donde se considera la venta de 15 carretes de filamento a un precio de \$10.500 cada uno, los indicadores financieros muestran que el proyecto alcanza un Valor Actual Neto positivo y una Tasa Interna de Retorno de aproximadamente 19,8 %, calculados con una tasa de descuento del 15 %. Estos resultados evidencian que el proyecto sigue siendo financieramente viable, aunque con una rentabilidad más ajustada respecto de escenarios con mayores volúmenes de venta. En este caso, el margen de ganancia es reducido y la conveniencia económica depende de la capacidad de mantener los costos controlados y de incrementar progresivamente la producción o la cantidad de unidades comercializadas.

6.3 Comparación con soluciones comerciales

El costo total del prototipo desarrollado es significativamente menor al de máquinas extrusoras comerciales disponibles en el mercado, cuyo valor parte desde aproximadamente \$190.000 CLP [26], variando según el nivel de automatización, el tipo de alimentación y los sistemas de control integrados. En el caso del presente proyecto, el costo de producción del filamento reciclado se estimó en torno a \$35 CLP por metro, considerando principalmente las botellas PET como materia prima y el consumo eléctrico del sistema. En contraste, el precio promedio del filamento comercial de PETG se ubica cerca de \$45 CLP por metro, lo que representa un ahorro modesto, pero igualmente relevante, por cada metro producido.

Además, el empleo de materia prima reciclada permite disminuir de manera significativa los costos asociados a la fabricación de filamentos, situando el valor de producción por debajo del de los materiales disponibles en el mercado. Este diferencial abre la posibilidad de utilizar la tecnología tanto en el ámbito personal como en entornos educativos, institucionales o comunitarios, donde los recursos son más limitados y la reducción de costos adquiere mayor relevancia.

Desde una perspectiva más amplia, el desarrollo de este tipo de soluciones contribuye al fortalecimiento de estrategias de reciclaje distribuido, promoviendo la valorización de residuos plásticos mediante tecnologías de manufactura aditiva. Si bien el alcance del prototipo es acotado, su implementación en un contexto local demuestra el potencial de la ingeniería aplicada para optimizar recursos, disminuir residuos y favorecer la democratización del acceso a tecnologías de fabricación digital.

6.4 Capacidad de producción

A partir de las especificaciones de diseño y pruebas realizadas, se estima la capacidad de producción de la máquina extrusora. Considerando la velocidad de rotación del sistema de bobinado, el diámetro efectivo de enrollado y el filamento de 1,75 mm de diámetro, se obtuvo una velocidad de producción en el rango de 1,1 a 1,9 metros por minuto, equivalente a 66–113 metros de filamento por hora. Esto corresponde aproximadamente a 0,22–0,38 kg/h de material procesado, con un valor promedio cercano a 0,30 kg/h.

No obstante, este valor corresponde a condiciones ideales de operación, es decir, con alimentación continua y material correctamente preparado. En la práctica, los cuellos de botella asociados a la preparación de la botella y a posibles atascamientos en la boquilla reducen la capacidad efectiva, situándola en un rango de 0,15–0,25 kg/h.

7 Conclusiones

El desarrollo del prototipo de máquina extrusora de filamento a partir de botellas recicladas de PET permitió validar parcialmente la hipótesis planteada. Aunque se logró producir filamento utilizable en impresoras FDM, los resultados mecánicos del rPET no alcanzaron a ser comparables en resistencia y rigidez con los filamentos comerciales como el PLA, lo que indica que la hipótesis inicial no se cumplió en su totalidad.

Los resultados experimentales confirmaron que el rPET presenta menor resistencia a tracción y módulo elástico que el PLA, pero con una mayor deformación antes de la fractura, lo que lo convierte en una alternativa con potencial en aplicaciones donde la flexibilidad y la sostenibilidad sean prioritarias. Esta diferencia de desempeño se alinea con lo reportado en la literatura, donde diversos autores destacan las limitaciones del rPET respecto de materiales vírgenes o comerciales, pero también sus ventajas en términos de circularidad y reducción de residuos plásticos.

Desde el punto de vista económico, el análisis evidenció que el prototipo es altamente competitivo en costos, tanto en la construcción de la máquina como en la producción del filamento, lo que confirma la viabilidad financiera del sistema. No obstante, se identificaron limitaciones asociadas al pretratamiento del material (lavado, secado y control de humedad), que impactan la calidad final del filamento y deben optimizarse para escalar la tecnología a un nivel más industrial y comunitario.

Un aspecto crítico identificado es que, para lograr un filamento continuo y de propiedades comerciales, resulta necesario incorporar una segunda máquina capaz de unir los tramos de filamento obtenidos en la extrusión individual de cada botella PET. Esta etapa permitiría alcanzar longitudes estándar y mayor homogeneidad, facilitando su uso en impresoras FDM sin interrupciones.

Finalmente, este trabajo abre la puerta a líneas de investigación futuras orientadas a mejorar el desempeño del filamento rPET. Entre ellas destacan: el uso de aditivos y mezclas poliméricas para reforzar sus propiedades, el desarrollo de procesos de pretratamiento más robustos que garanticen mayor homogeneidad del material y la evaluación de parámetros de impresión avanzados en diferentes equipos FDM. Estas mejoras permitirán acercar el rendimiento del rPET a los estándares de los filamentos comerciales, potenciando su adopción en aplicaciones técnicas y fortaleciendo su aporte a la economía circular.

8 Referencias

- [1] J. R. Jambeck *et al.*, “Plastic waste inputs from land into the ocean,” *Science* (1979), vol. 347, no. 6223, 2015, doi: 10.1126/science.1260352.
- [2] A. Al Rashid and M. Koç, “3D-Printed Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Sandwich Structures – Influence of Infill Design and Density on Tensile, Dynamic Mechanical, and Creep Response,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.IJLMM.2025.03.001.
- [3] T. Ochi, S. Okubo, and K. Fukui, “Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber,” *Cem Concr Compos*, vol. 29, no. 6, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002.
- [4] L. Mansilla-Pérez and M. Ruiz-Ruiz, “Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster,” *Ingeniería Industrial*, vol. 0, no. 027, 2009, doi: 10.26439/ing.ind2009.n027.627.
- [5] A. K. Singh, R. Bedi, and B. S. Kaith, “Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties – A comprehensive review,” 2021. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108928.
- [6] L. Toth, E. Slezák, K. Bocz, and F. Ronkay, “Progress in 3D printing of recycled PET,” *Materials Today Sustainability*, vol. 26, p. 100757, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.MTSUST.2024.100757.
- [7] Y. H. V. Soong, M. J. Sobkowicz, and D. Xie, “Recent Advances in Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Wastes,” 2022. doi: 10.3390/bioengineering9030098.
- [8] P. C. Caracciolo *et al.*, “Pequeñas fibras, grandes aplicaciones,” *Ciencia hoy*, vol. 21, no. 121, 2011.
- [9] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review,” *Adv Drug Deliv Rev*, vol. 107, pp. 367–392, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- [10] P. Latko-Duralek, K. Dydek, and A. Boczowska, “Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends,” *J Polym Environ*, vol. 27, no. 11, pp. 2600–2606, Nov. 2019, doi: 10.1007/s10924-019-01544-6.
- [11] N. Vidakis *et al.*, “The Mechanical and Physical Properties of 3D-Printed Materials Composed of ABS-ZnO Nanocomposites and ABS-ZnO Microcomposites,” *Micromachines (Basel)*, vol. 11, no. 6, p. 615, Jun. 2020, doi: 10.3390/mi11060615.
- [12] K. J. Astrom and T. Hägglund, “Advanced PID control,” 2006. doi: 10.1109/MCS.2006.1580160.

- [13] O. Rashwan *et al.*, "Extrusion and characterization of recycled polyethylene terephthalate (rPET) filaments compounded with chain extender and impact modifiers for material-extrusion additive manufacturing," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-41744-8.
- [14] D. A. Tolcha and D. E. Woldemichael, "Development and characterization of short glass fiber reinforced-waste plastic composite filaments for 3D printing applications," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22333.
- [15] M. Nikam, P. Pawar, A. Patil, A. Patil, K. Mokal, and S. Jadhav, "Sustainable fabrication of 3D printing filament from recycled PET plastic," *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.205.
- [16] C. Suescun Gonzalez, F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, C. Nouvel, and J. M. Pearce, "Multi-material distributed recycling via material extrusion: recycled high density polyethylene and poly (ethylene terephthalate) mixture," *Polym Eng Sci*, vol. 64, no. 4, 2024, doi: 10.1002/pen.26643.
- [17] L. Lendvai, T. Singh, and F. Ronkay, "Thermal, thermomechanical and structural properties of recycled polyethylene terephthalate (rPET)/waste marble dust composites," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25015.
- [18] P. Q. K. Nguyen *et al.*, "Influences of printing parameters on mechanical properties of recycled PET and PETG using fused granular fabrication technique," *Polym Test*, vol. 132, 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108390.
- [19] SKF, "Rolamentos," 2015.
- [20] F. H. Bañuelos García, A. G. Ayala Milián, and M. A. Escamilla García, "UNA APROXIMACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA Y SU APLICACIÓN A LA EVALUACIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS," *Revista de Ingeniería Sísmica*, no. 110, 2023, doi: 10.18867/ris.110.620.
- [21] L. V. Vanegas Useche, *Diseño de Elementos de Máquinas*. 2018. doi: 10.22517/9789587223019.
- [22] "Poliácido Láctico (PLA): Propiedades del PLA." Accessed: Sep. 30, 2024. [Online]. Available: <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-l%C3%A1ctico/propiedades-del-pla?authuser=0>
- [23] I. G. Bavaresco, "PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE EJES PARA EL DISEÑO DE EJES."
- [24] "Caracterización de filamentos para elaboración de prendas en impresoras 3D," *Ñawparisun - Revista de Investigación Científica*, vol. 4, no. Vol. 3, Num. 4, 2022, doi: 10.47190/nric.v3i4.3.
- [25] I. Tylman and K. Dzierżek, "Filament for a 3D Printer from Pet Bottles- Simple Machine," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics*

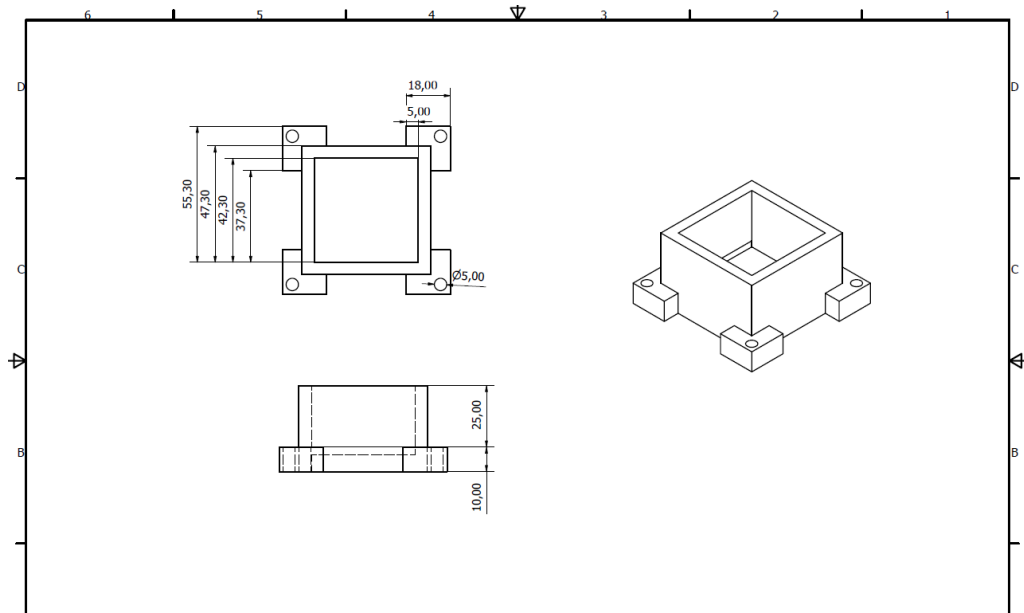
Research, vol. 9, no. 10, pp. 1386–1392, 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392.

- [26] G. B. Vaggar, M. Sameer, M. Chitragar, M. R. Sharif, and A. Kareem, "Plastic Extrusion Machine : A Review," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 11, no. 06, 2022.

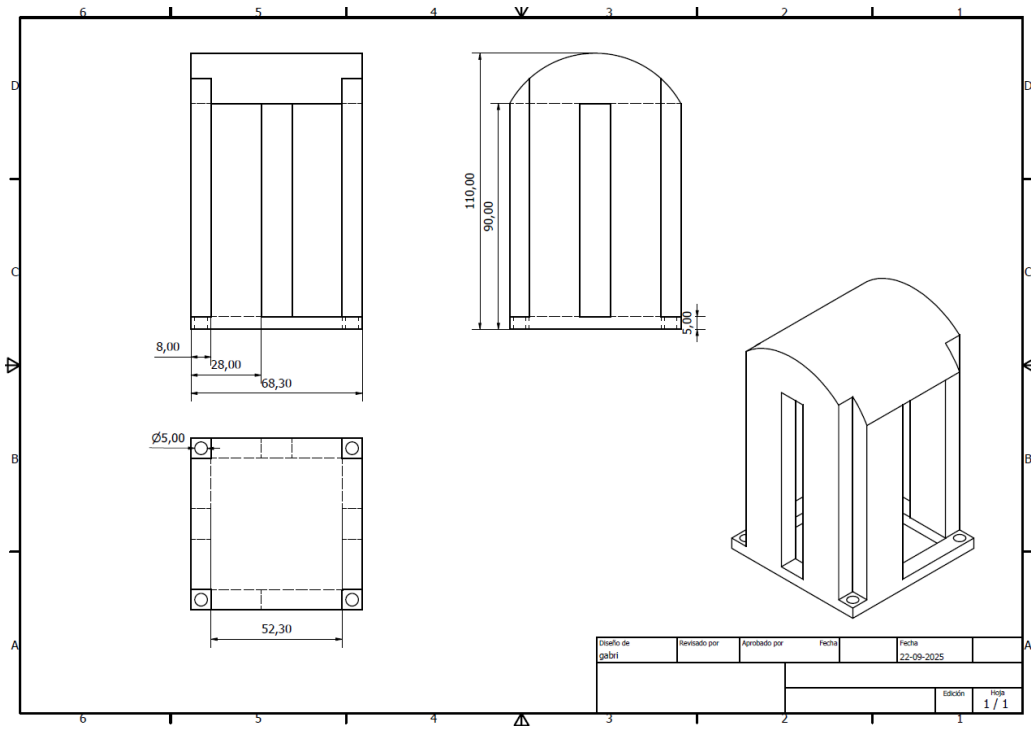
9 Anexos

Dimensiones piezas de la máquina.

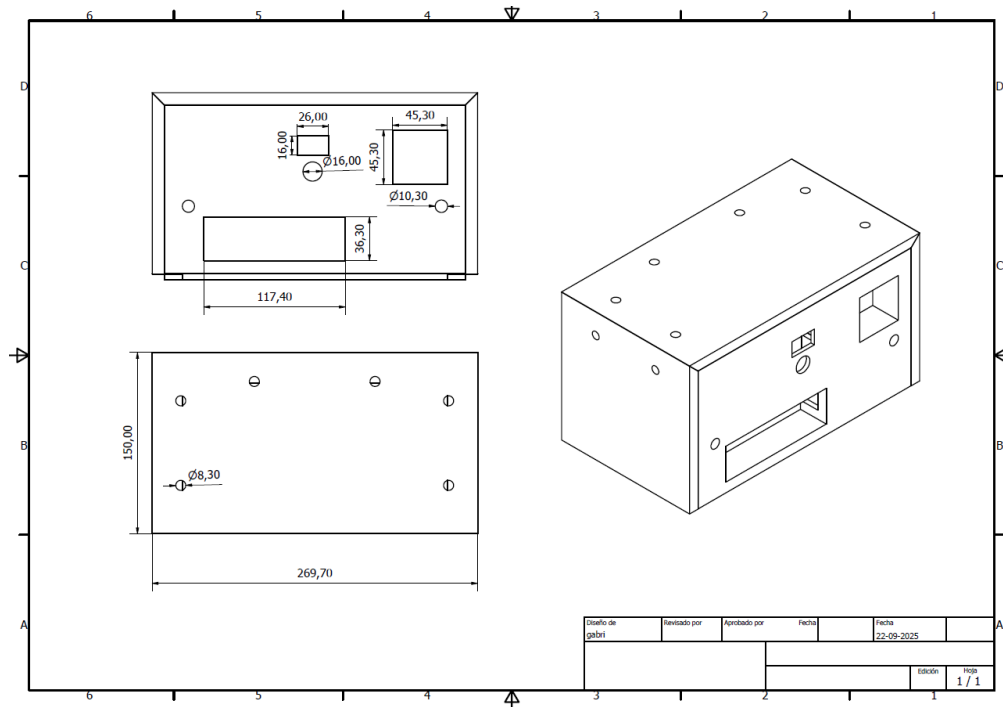
Base extrusor



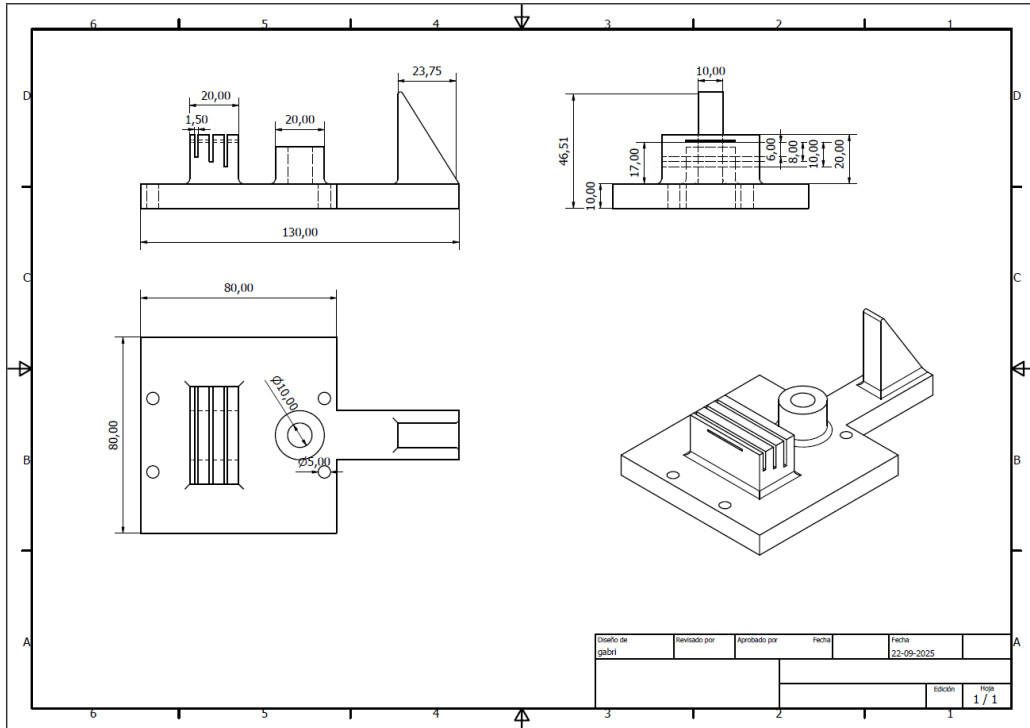
Tapa extrusor



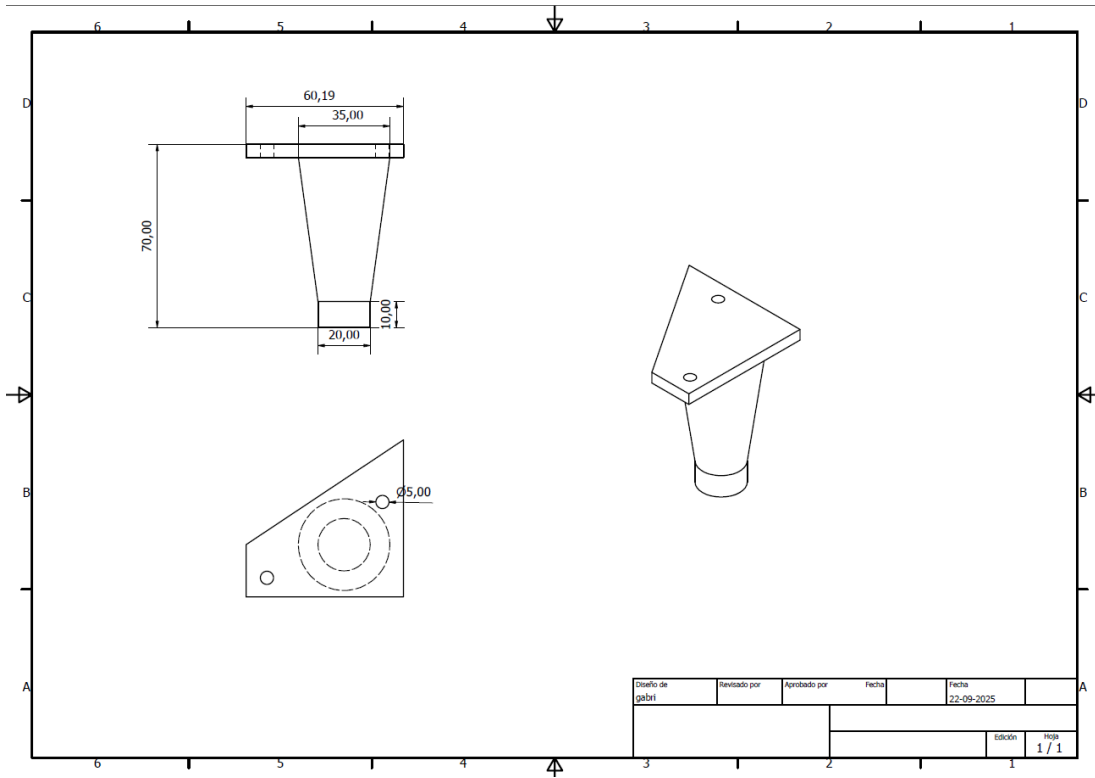
Caja electrónica



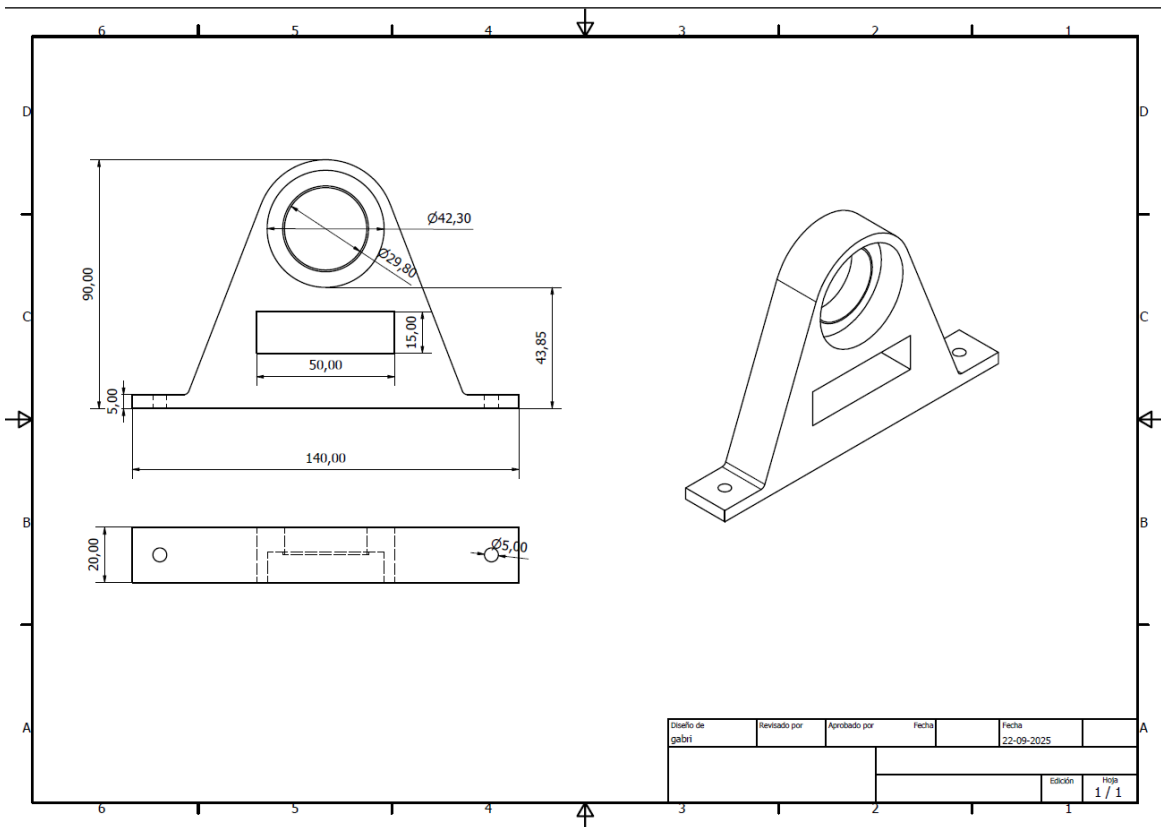
Cortadora Botella



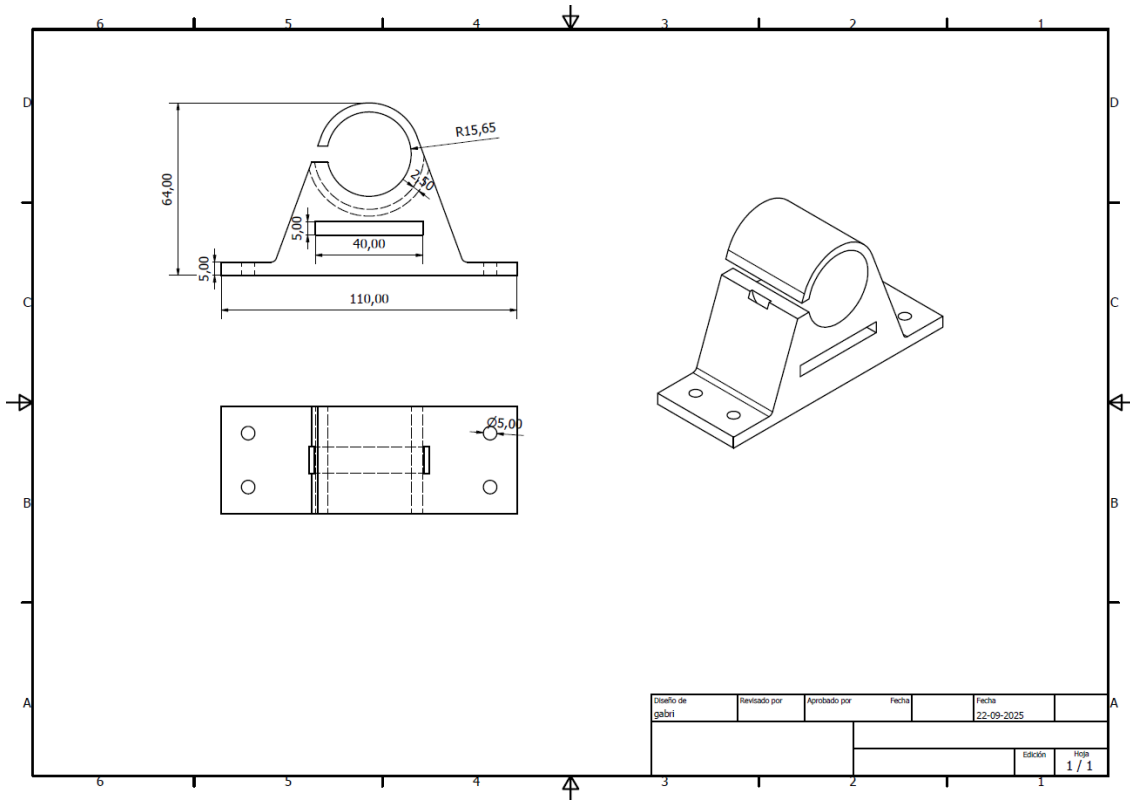
Patás máquina



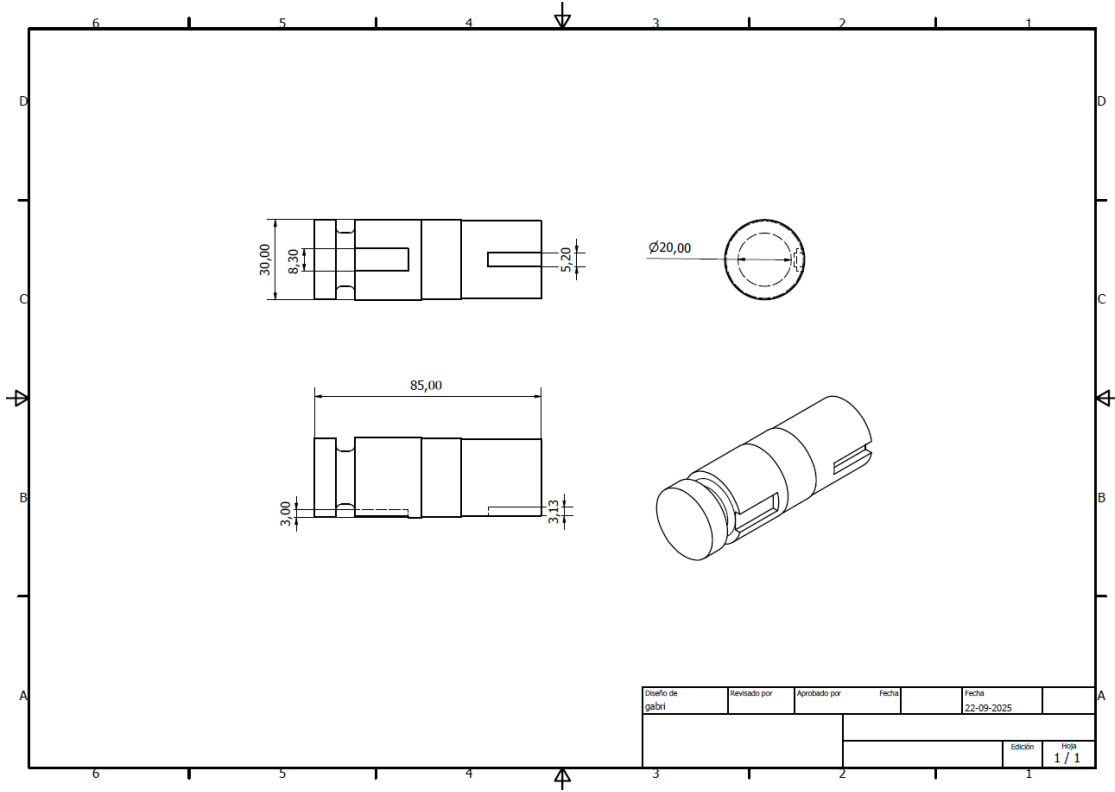
Soporte eje



Soporte motor

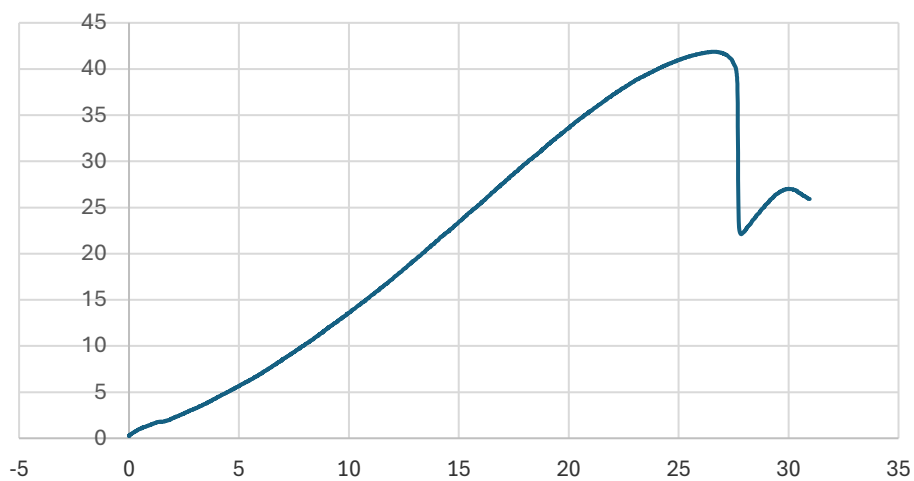


Eje

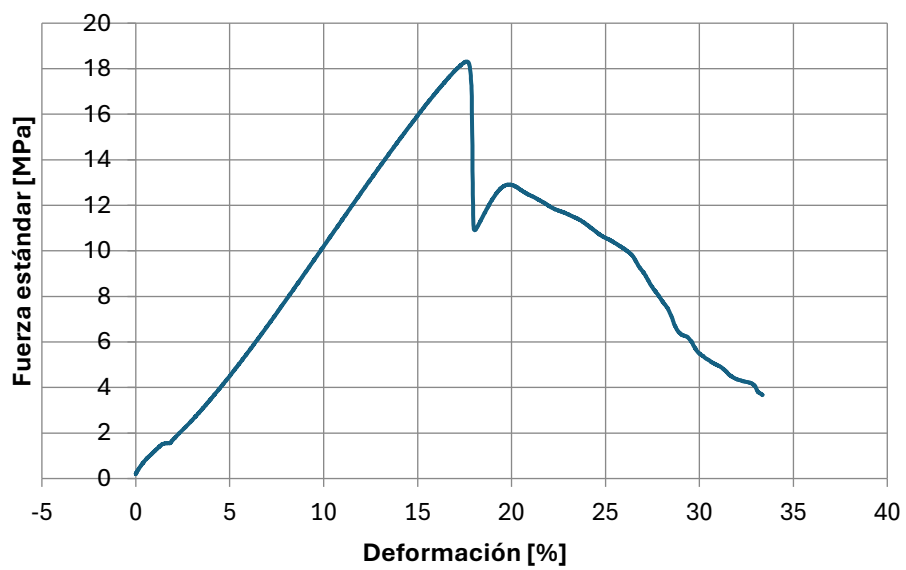


Gráficas rPET sin procesar.

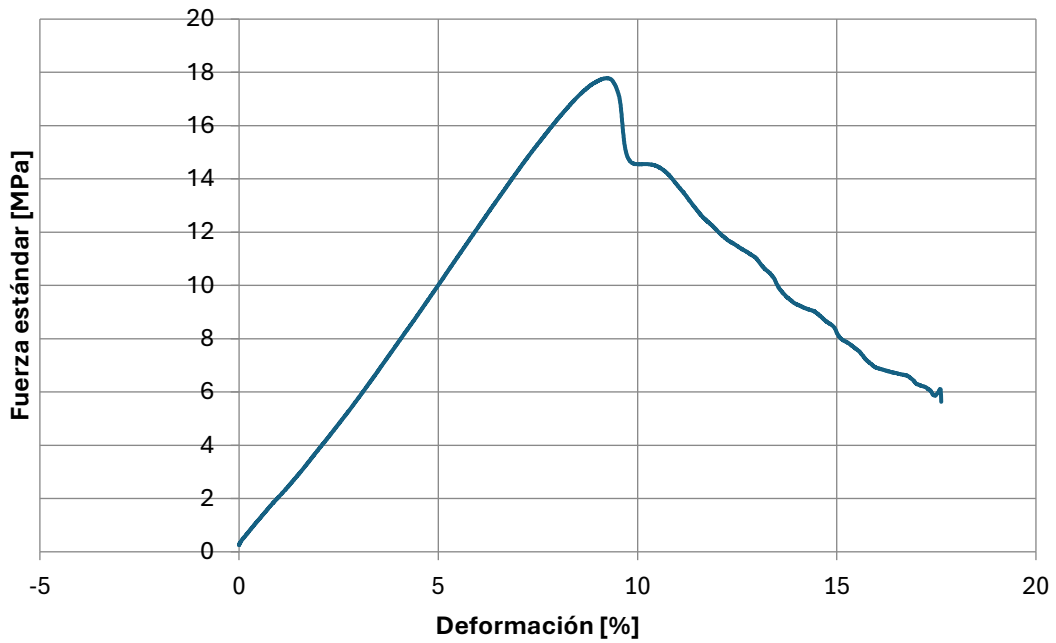
1era rPET



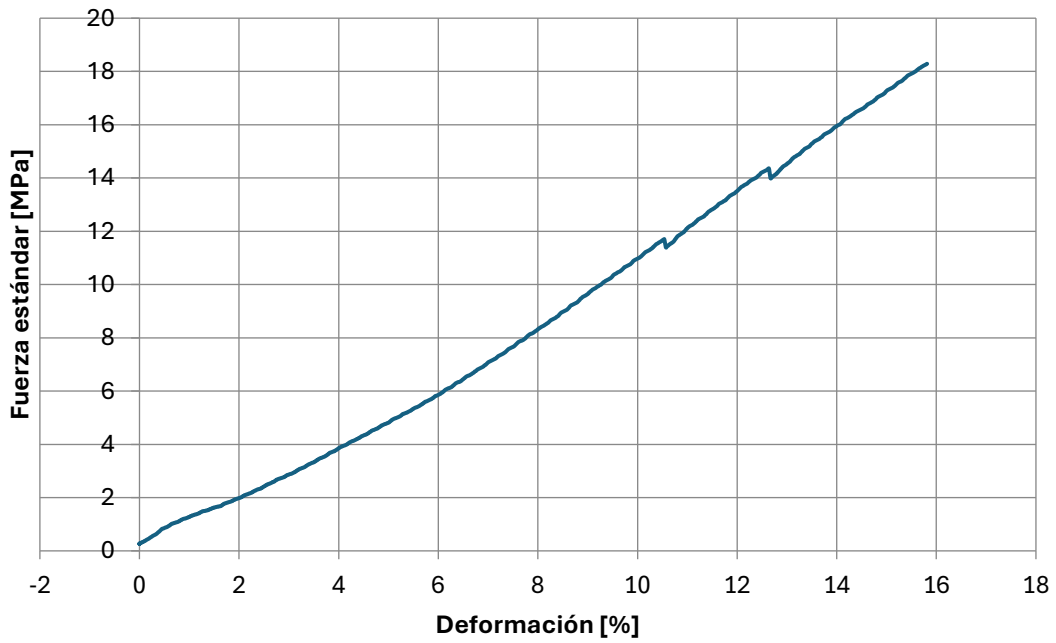
2da rPET

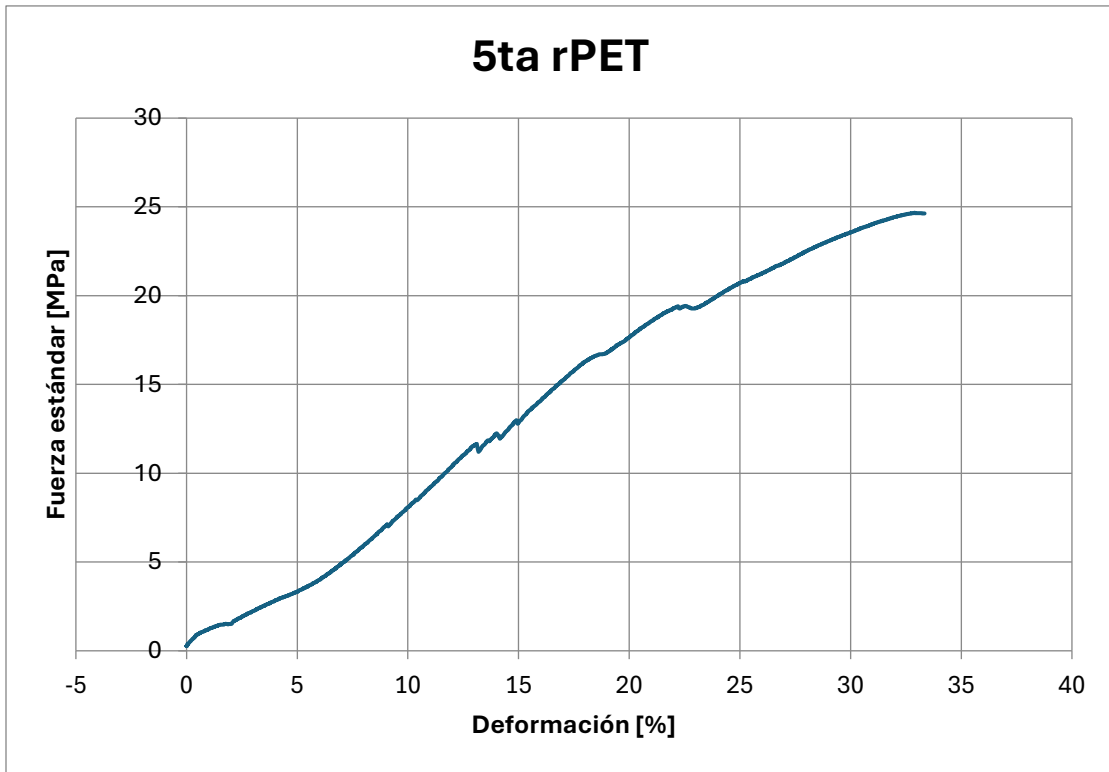


3ra rPET

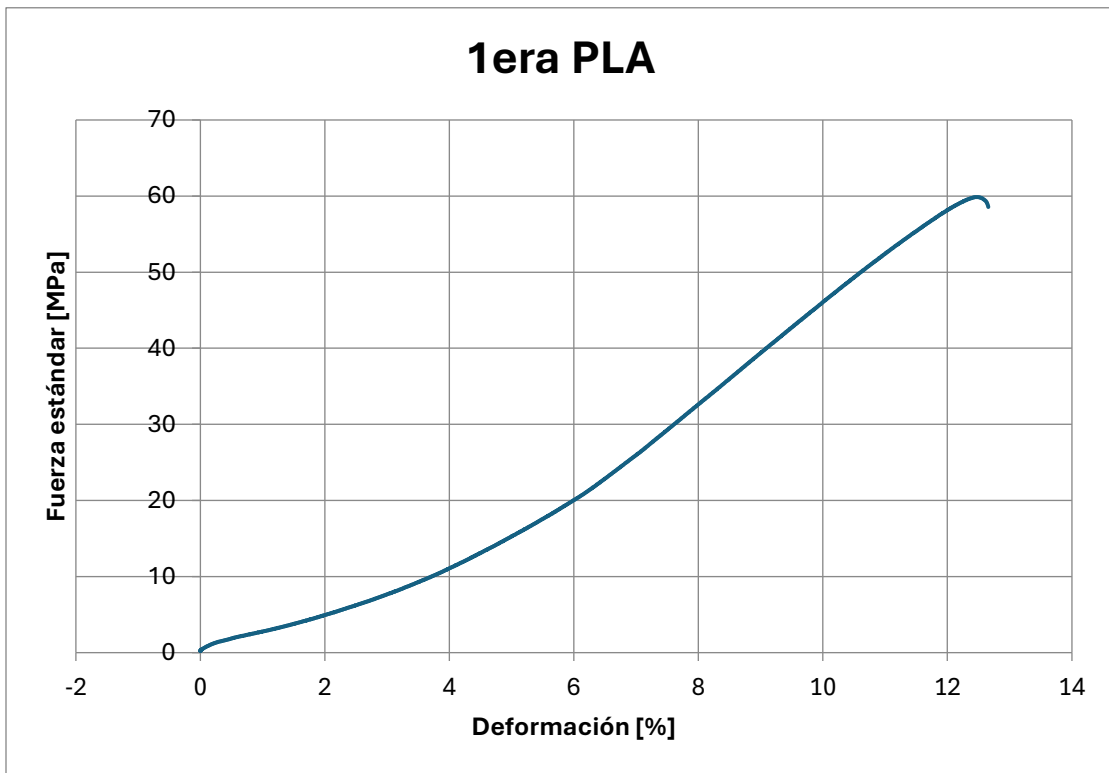


4ta rPET

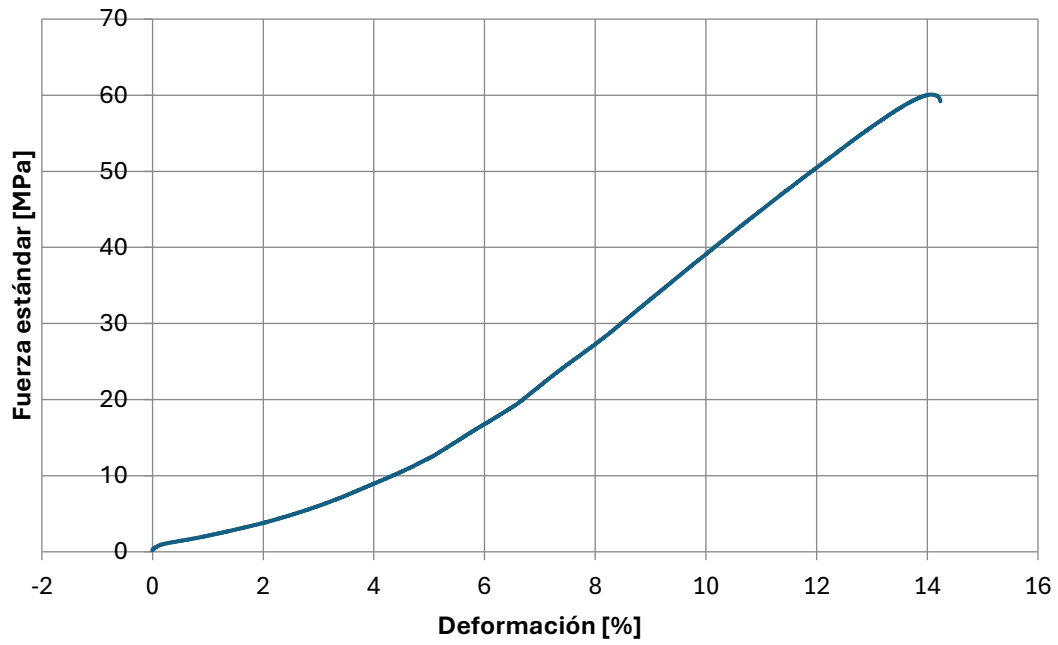




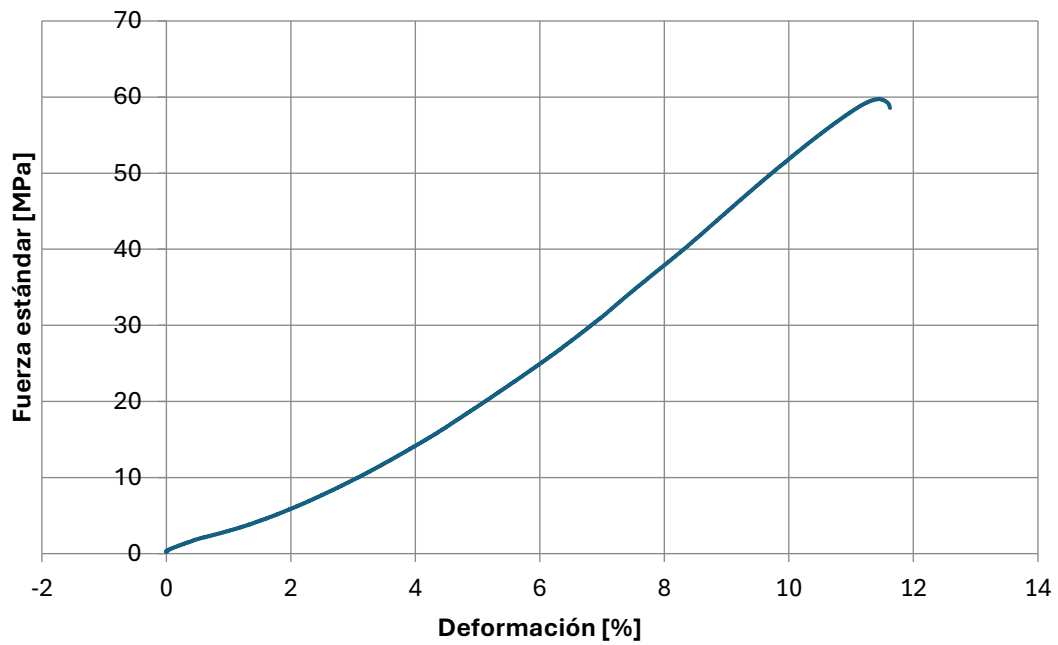
Gráficas PLA sin Procesar



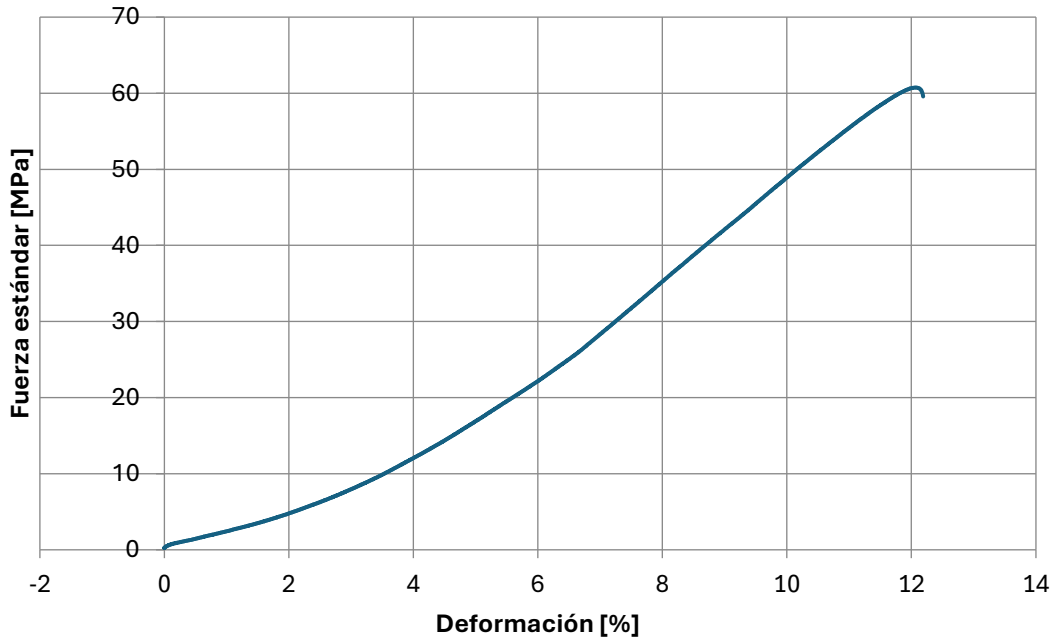
2da PLA



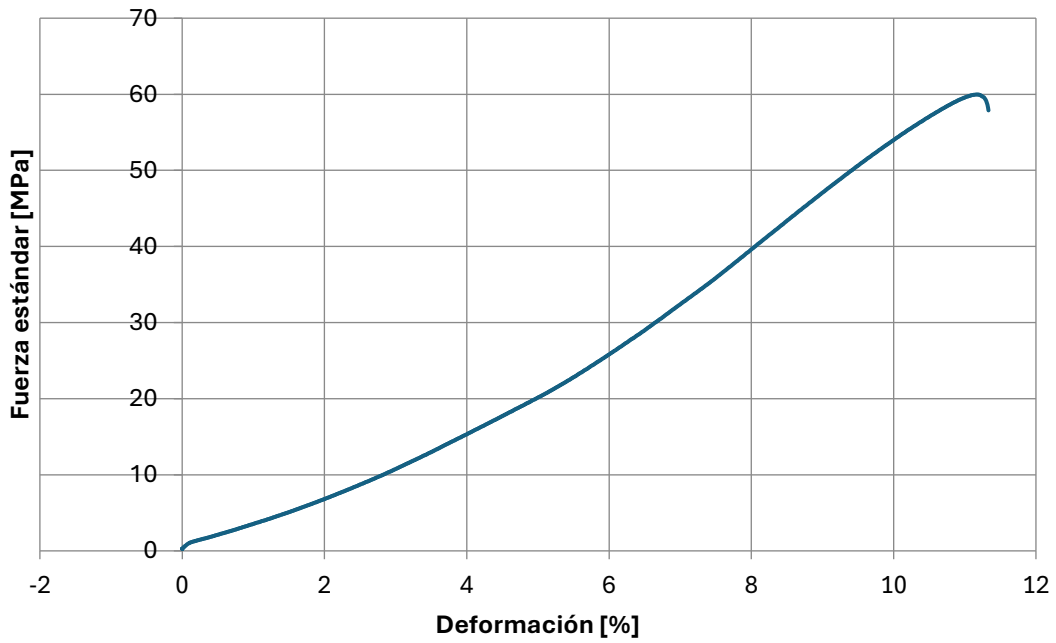
3ra PLA



4ta PLA



5ta PLA



Flujo de caja utilizado en capítulo 6 evaluación económica.

Impuesto	19%
Inversión	-130.000
Precio	10.500
incremento ventas	0,1
cantidad	15

	0	1	2	3	4	5
(-) Inversión	-130.000					
(+) Ingresos por ventas		157.500	165.375	173.644	182.326	191.442
(-) Costos		90.000	90.000	90.000	90.000	90.000
(-) Mantención		30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
(-) Dep. Maq		10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
(-) Dep. Eq.		0	0	0	0	0
(=) UAI		27.500	35.375	43.644	52.326	61.442
(-) Impuesto		5.225	6.721	8.292	9.942	11.674
(=) U. Neta		22.275	28.654	35.351	42.384	49.768
(+) Dep. Maq		10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
(+) Dep. Eq.		0	0	0	0	0
(=) FCN	-130.000	32.275	38.654	45.351	52.384	59.768
FCN descontado		28.065	62.840	103.548	149.555	200.352
FCN Acumulado	-130.000	-101.935	-39.095	64.453	214.008	414.360
VAN	16.778					
TIR	19,7694%					
r	15%					