



**Prototipo de máquina extrusora para filamento de impresoras 3D a partir de material
reciclado PET.**

Mario Alejandro Tabares Orjuela

Modalidad de práctica cursada
Semestre Industria

Tutor

Cesar Augusto Isaza (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería
Medellín
2024

Cita	Tabares Orjuela [1]
Referencia	[1] Tabares Orjuela M.A. Prototipo de máquina extrusora para filamento de impresoras 3D. [Semestre industria]. Universidad de Antioquia
Estilo IEEE	Medellín, Colombia
(2020)	



Asesor externo: María Clara Marín.

Asesor interno: Cesar Augusto Isaza Merino.

Institución interna: Universidad de Antioquia.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio César Saldarriaga.

Jefe departamento: Eduardo Emiro Rodríguez Ramírez

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Oscar Marino Tabares y Fabiola Orjuela por todo el apoyo y amor brindado durante esta etapa de mi vida, sin ellos nada de esto hubiera sido posible. A mis familiares que contribuyeron a lograr mi formación profesional y a mi abuela Rosa Alba Gordillo, que fue una fuente de inspiración para culminar mis estudios académicos. Agradecer a los profesores de la facultad de ingeniería electrónica y al departamento por la labor ejercida y por los conocimientos brindados en todos estos años de formación.

También quiero expresar mis agradecimientos a los profesores Augusto Salazar y Johanny Vélez que contribuyeron a la elaboración del prototipo con sus consejos, al compañero Jonatan Pulgarín por sus contribuciones en las piezas de la parte mecánica y al tutor Cesar Augusto Isaza por la confianza y las enseñanzas dejadas a lo largo de esta práctica académica.

Por último y no menos importante, agradecer a mis compañeros de carrera y compañeros de universidad que me apoyaron en todo momento. A la universidad de Antioquia por permitirme ser parte del alma mater y dejarme gratos recuerdos de esta etapa profesional en mi vida.

CONTENIDO

I. Resumen	7
II. Introducción	8
III. Objetivos	10
3.1 Objetivo general	10
3.2 Objetivos específicos	10
IV. Marco Teórico	11
4.1. El reciclaje de materiales poliméricos termoplásticos	11
4.1.1. Reciclado mecánico	11
4.1.2. Reciclado químico	12
4.2. Antecedentes	13
4.2.1. Los primeros pasos de la extrusión	13
4.2.2. Llegada de los termoplásticos	14
4.2.3. Tipos de máquinas para fabricación de filamentos	14
4.2.4. Aplicaciones de los Filamentos PET	16
4.3. Manufactura adictiva	17
4.3.1. Técnica FDM	17
4.4. Extrusión de plásticos	18
4.4.1. Componentes de una máquina de extrusión	19
4.4.2. Tipos de máquinas extrusoras y sus aplicaciones	19
4.4.3. Características térmicas en el proceso de extrusión	22
4.5. Control de temperatura	22
4.5.1. Controlador de temperatura On / Off	22
4.5.2. Controlador de temperatura proporcional	23
4.5.3. Controlador de temperatura PID	23

4.6. Controlador y características	24
4.6.1. Control Discreto	25
4.6.2. Función de transferencia:	27
4.7. Microcontrolador.	27
4.8. Optoacoplador.	28
4.9. Triac.	28
V. Metodología	¡Error! Marcador no definido.
5.1. Identificación y selección de componentes.	30
5.1.1. Criterios de selección de elementos y dispositivos	30
5.2. Ensamble de máquina	32
5.2.1. Diseño asistido por computador	32
5.2.2. Fabricación de componentes	37
5.3. Implementación del sistema electrónico y mecánico de la extrusora	40
5.3.1. Control de motor	40
5.3.2. Control de temperatura y pantalla	41
5.3.3. Cruce por cero	42
5.3.4. Disparo por triac	43
5.4. Determinación de herramientas para la operación de la extrusora	44
5.4.1. Software de diseño	44
5.4.2. Software de programación	44
5.4.3. Software de las máquinas	45
5.4.4. Software electrónico	45
5.5. Pruebas de validación	45
5.5.1. Validación del control	46
5.5.2. Validación por medio de calificación del filamento extruido.	47

VI. Resultados y análisis	48
6.1. Selección de los elementos por medio de ponderaciones	48
6.1.1. Matriz de caracterización	48
6.1.2. Matriz de ponderación	49
6.2. Controladores	50
6.2.1. Control de Motor	50
6.2.2. Control Temperatura	53
6.2.3. Control Enfriamiento	61
6.2.4. Control Transporte	62
6.3. Cualificación de los filamentos extruidos	63
6.3.1. Caracterización de la máquina	63
6.3.2. Cualificación del filamento	65
VII. Conclusiones.	72
VIII. Referencias	75
IX. Anexos	76

I. RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo principal el desarrollo del control de un prototipo de máquina extrusora de filamento para impresoras 3D, empleando botellas de plástico PET recicladas como materia prima. En el trabajo se busca no solo innovar en la fabricación de filamento para impresoras 3D, sino también fomentar la sostenibilidad al reutilizar plásticos que, de otro modo, contribuirían al problema de los desechos ambientales. Además, se incentivó el desarrollo de productos a través de prototipos, impulsando la creación de soluciones sostenibles dentro de la industria de la impresión 3D. Para cumplir con estos objetivos, se plantea la selección cuidadosa de los dispositivos y componentes necesarios, el ensamblaje de la máquina extrusora, y la validación tanto del sistema de control como del material extruido. Con este proceso se logró que la máquina funcione correctamente y produzca un filamento de calidad, apto para la impresión 3D, cerrando así el ciclo de reciclaje de manera eficiente y sostenible.

Abstract

The main objective of this project was to develop a control system for a prototype filament extruder designed for 3D printers, utilizing recycled PET plastic bottles as the primary raw. The project aims not only to innovate in the production of filament for 3D printing but also to promote sustainability by repurposing plastics that would otherwise contribute to the environmental waste problem. Additionally, the project encouraged the development of products through prototyping, driving the creation of sustainable solutions within the 3D printing industry. To achieve these objectives, the project involves the careful selection of necessary devices and components, the assembly of the extruder machine, and the validation of both the control system and the extruded material. With this process it was ensured that the machine operates correctly and produces high-quality filament suitable for 3D printing, thus efficiently and sustainably closing the recycling loop.

II. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva, es un proceso de fabricación que construye objetos tridimensionales capa por capa a partir de datos digitales. A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación sustractiva, donde se elimina material de una pieza bruta, la manufactura aditiva agrega material de manera incremental, lo que la hace muy versátil y eficiente para diversas aplicaciones. Aunque los conceptos básicos de la manufactura aditiva se remontan a la década de 1980, ha sido en las últimas dos décadas cuando ha experimentado un crecimiento exponencial debido a la disponibilidad de tecnologías más accesibles y asequibles, junto con avances significativos en materiales y procesos. Esto ha impulsado su adopción en una amplia gama de industrias y la ha posicionado como una solución innovadora para necesidades de fabricación moderna, incluyendo prototipado rápido, personalización de productos, creación de diseños complejos y optimizados, y reducción de residuos y consumo de material.

En el campo de la impresión 3D de materiales poliméricos, existen diversos materiales desarrollados para satisfacer diferentes necesidades. Cada uno de estos materiales se distingue por sus propiedades mecánicas, como la elasticidad, la resistencia al calor, y la capacidad para ser pigmentados, así como otras características técnicas, como la dureza, la fragilidad y la resistencia a la tracción. Entre los materiales más comunes actualmente se encuentran el PLA (Ácido poliláctico), ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), Nylon, TPU (Poliuretano termoplástico), PVA (Alcohol polivinílico), y PETG (Tereftalato de polietileno glicolizado), entre otros.

A pesar de sus fortalezas en términos de flexibilidad de diseño, reducción de costos de producción, capacidad de producción bajo demanda y oportunidades continuas de innovación, el uso de plásticos en algunas técnicas de manufactura aditiva presenta desafíos ambientales significativos. Una de las formas de mitigar este impacto es a través del reciclado de tereftalato de polietileno (PET), un polímero ampliamente utilizado en productos como las botellas de plástico convencionales. Además, es importante señalar que la fracción reciclable de materiales, como las botellas de PET, actualmente se recupera en un rango que oscila entre el 20% y el 22%. Esta fracción reciclada se refiere a la parte del suministro que proviene del proceso de reciclaje y que puede ser reutilizada de manera rentable. Sin embargo, alcanzar altas tasas de reciclaje no siempre es posible en la práctica. Hay que anotar, que el reciclaje de botellas PET es particularmente difícil debido a problemas como la contaminación, la mezcla de diferentes plásticos, el tamaño, la resistencia al calor y los estrictos requisitos de limpieza. Además, los termoplásticos como el PET se utilizan a menudo en productos voluminosos de baja densidad, como las botellas, lo que incrementa los costos del proceso de reciclaje [1]. Estos factores hacen que el reciclaje de plásticos

sea menos eficiente y más costoso en comparación con otros materiales. Sin embargo, aún se deben hacer esfuerzos e investigaciones para mitigar el impacto de los plásticos y entre estos está la reutilización de este material para la fabricación de materias primas para procesos como la impresión 3D. En este contexto, la técnica de extrusión [2] se presenta como una solución viable para transformar botellas de PET recicladas en filamento de impresoras 3D que emplean la técnica de modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés).

Este trabajo presenta el diseño y fabricación de un prototipo de extrusora de filamento por extrusión, que consiste en un sistema de varias etapas: almacenamiento por tolva de pellets, deformación del material mediante calor y tornillo sin fin, enfriamiento por agua y almacenamiento del material resultante por movimientos mecánicos. Con cada una de estas etapas, se busca contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes para la gestión de residuos plásticos y promover la adopción de prácticas de fabricación más responsables desde el punto de vista ambiental. Además, pretende sensibilizar sobre la importancia de la manufactura en la economía circular, destacando su relevancia en la reducción de residuos y el aprovechamiento de recursos reciclados en la producción industrial.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Fabricar un prototipo de máquina extrusora para crear filamento de impresión 3D a partir de material reciclado, implementando un sistema de control en cada fase del proceso para asegurar la calidad del material adecuado para usarlo en el laboratorio de prototipado

3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una matriz de comparación de atributos de los prototipos de máquinas existentes para seleccionar los mecanismos electrónicos y mecánicos requeridos por medio de una valoración de costo-beneficio
- Construir y ensamblar una máquina extrusora de filamento, implementando las fases principales de Almacenamiento, moldeo del material, sistema de enfriamiento y transporte, utilizando archivos open source en internet
- Integrar componentes electrónicos digitales y analógicos para los sistemas de control automatizados con controladores, separando el proceso en fases de almacenamiento, enfriamiento, formación del filamento y transporte, para un manejo adecuado y sistematizado de las variables de la máquina
- Validar el sistema mediante pruebas de impresión e identificación de la calidad del filamento obtenido por medio de ensayos mecánicos estándar

IV. MARCO TEÓRICO

4.1. El reciclaje de materiales poliméricos termoplásticos

Los polímeros termoplásticos [3] son aquellos que se comportan como la mantequilla. Cuando tenemos un bote de mantequilla en la nevera, ésta se encuentra en estado sólido, pero en cambio si la calentamos en una sartén pasa a estado líquido. Pero en este caso el cambio de estados es totalmente reversible, ya que si dejamos de nuevo enfriar la mantequilla volverá a su estado sólido. Además, si la dejamos enfriar dentro de un molde tomará la forma de molde. De manera que podemos decir que la mantequilla la podemos fundir, moldear y solidificar varias veces sin perder las propiedades mecánicas.

De igual forma ocurre con los polímeros termoplásticos. Este tipo de polímeros se pueden fundir y moldear varias veces aumentando su periodo de vida. Es por ello que los polímeros termoplásticos se consideran plásticos reciclables, porque se pueden reciclar mecánicamente por fusión y moldeo durante varios ciclos.

Dentro de este grupo existen diferentes tipos de plásticos, algunos de los más conocidos son:

- **PET (Tereftalato de polietileno):** Ampliamente usado para envasar botellas de agua y zumos.
- **LDPE Y HDPE (Polietileno de baja y alta densidad):** Se utilizan para la fabricación de bolsas y botellas de detergentes
- **PP (Polipropileno):** Se utiliza en la fabricación de detergentes, en la fabricación de tela no tejido o para tapones de botellas.
- **PCV (Cloruro de polivinilo):** Se utiliza para revestimientos de cables, marcos de ventanas y puertas, así como también en la fabricación de tarjetas de crédito.

La producción de plástico reciclado se lleva a cabo siguiendo dos caminos fundamentales de producción, el primero llamado reciclaje mecánico, el segundo correspondiente al reciclaje químico.

4.1.1. Reciclado mecánico

El tratamiento mecánico [4] de los diferentes materiales plásticos se lleva a cabo para obtener un material que sea lo más similar posible al polímero virgen correspondiente. Cuanto más cerca esté el plástico reciclado de la pureza y el color del material virgen, mayor será su valor y sus posibilidades de reutilización. El reciclaje mecánico de materiales plásticos comienza con una fase

de selección cuidadosa por tipo de material plástico con la separación relativa de otros materiales no deseados como vidrio, metales y papel, que también puede ser seguido por una selección del material para colorear. La calidad y el éxito del reciclaje mecánico están estrechamente relacionados con el grado de selección que se puede obtener del polímero a reciclar, y esto explica la creciente sensibilidad de la industria en el desarrollo de sistemas industriales capaces de refinar el material plástico con mejor precisión. Del reciclaje mecánico es posible obtener polímeros termoplásticos molidos, es decir, gránulos y escamas adecuados para la realización de nuevos artículos manufacturados; o polímeros termoestables molidos, es decir, micropartículas de plástico que pueden usarse como cargas inertes en el procesamiento de materiales termoestables y termoplásticos. Luego se realiza una molienda para eliminar los fragmentos de metal presentes. El polímero molido se somete a un ciclo de lavado para eliminar la tierra y otros fragmentos y llevar a cabo una separación adicional de materiales plásticos pesados (que se hunden en el agua) y materiales plásticos ligeros (que flotan). El secado del suelo se prepara para su conversión en gránulos (perlas, gránulos, cubos) a través de la extrusión que funde el plástico y lo extruye a través de una cadena. Los gránulos se mezclan posteriormente en silos especiales, se analizan para evaluar la pureza y las características mecánicas. Los materiales reciclados obtenidos por medios mecánicos se utilizan principalmente en la construcción, la agricultura y la producción de bienes duraderos. En general, reemplazan o se mezclan con los plásticos vírgenes correspondientes.

4.1.2. Reciclado químico

El proceso de reciclaje químico hace posible descomponer el polímero en los monómeros originales con el objetivo de obtener combustibles y productos químicos alternativos de los de origen fósil, lo que contribuye significativamente a reducir el uso de materias primas. Los polímeros de policondensación como el PET y el nylon son más adecuados para someterse al proceso de despolimerización. Este proceso varía según el método utilizado o el tratamiento térmico necesario para lograr el agrietamiento de la cadena de polímero. La pirólisis es el tratamiento que permite descomponer las moléculas a través de un proceso de calentamiento al vacío que conduce a la producción de una mezcla de hidrocarburos líquidos y gaseosos similar al petróleo. En cambio, la hidrogenación permite que los polímeros se transformen en hidrocarburos líquidos a partir de los cuales se puede obtener nuevamente polietileno, polipropileno, PVC y caucho sintético. A través de la gasificación, se obtiene una mezcla de hidrógeno y monóxido de

carbono que puede usarse como combustible o como mezcla en el procesamiento de otros materiales. La quimiólisis puede procesar los materiales en desuso individuales devolviéndolos a su estado original. Finalmente, la glucólisis permite devolver los polímeros de condensación como PET (Tereftalato de polietileno), PA (Poliamida) y PUR(Poliuretano), previamente separados de los otros plásticos, al estado de precursores intermedios

4.2. Antecedentes

La extrusión es uno de los procesos que nacen como necesidad del hombre para encontrar métodos de producción de artículos de plásticos en altos volúmenes, consistentes en características y bajos costos.

4.2.1. Los primeros pasos de la extrusión

Para el año 1845, se tienen datos de los primeros intentos de desarrollo de maquinaria de extrusión para transformación de gutapercha, cuando Bewley diseña un extrusor para la fabricación de tubos [5]. Independientemente del grado tecnológico que pudiera tener esta máquina, porque en ese entonces no se contaba con motores eléctricos, elementos de calefacción o sistemas electrónicos como los que se tienen en la actualidad, es notable este desarrollo el cual sentó las bases y la inquietud para futuros investigadores sobre la mejora y optimización de este proceso continuo.

Catorce años después del diseño de Bewley, Drake realiza en Norteamérica la primera extracción comercial de petróleo e inicia la industrialización de las materias primas del material que revolucionará los conceptos de producción en el mundo: el plástico. Las máquinas se encontraban para entonces conceptualizadas.

En 1879 M. Gray patenta el primer extrusor, ya con diseños más adecuados y con muchos de los elementos que tienen las extrusoras actuales. Se utilizó un huesillo denominado “Arquimedeano” que prácticamente continúa usándose con múltiples modificaciones hasta la fecha.

En 1879 Francis Shaw construye el primer extrusor comercial en Inglaterra. Un año después, en 1880 John Royle & Sons fabrican el primer extrusor con huesillo en Norteamérica para la producción de tubería de hule.

Solamente el recubrimiento de alambre y cable vislumbraba posibilidades de desarrollo, ya que se estaba originando un momento propicio que demandaba la presencia de un nuevo material, pues se observaba el auge de inventos como el telégrafo de Morse y otros. Fue de esta forma, que

nuevamente John Royle & Sons construyen el primer extrusor de huesillo para forro de alambre y cable, aún sin usar termoplásticos.

4.2.2. Llegada de los termoplásticos

En la primera mitad del siglo pasado se muestra un crecimiento importante del proceso de extrusión, principalmente modificando la máquina con motores eléctricos, construcciones más robustas del cañón y equipo en general, modificaciones de los huesillos para los primeros materiales termoplásticos como polietilenos, poliestirenos y otros; existen mayores incursiones de productos extruidos en el mercado, principalmente tubería, perfiles, recubrimientos de alambre y cable, filamentos y láminas.

En 1941 se produce en E.E.U.U, por parte de la empresa Plax. Corp, la primera lámina biaxialmente orientada, que representaría un gran avance en la utilización de PS(Poliestireno) para aplicaciones de envase.

En el auge del desarrollo de nuevos materiales, Du Pont inicia en 1948, las pruebas de producción de polietileno sobre papel, sin encontrar inicialmente una aplicación real a su desarrollo, que en nuestros días representa una aplicación prácticamente insustituible en el sector del envase.

4.2.3. Tipos de máquinas para fabricación de filamentos

En esta sesión se describen diferentes tipos de extrusoras para filamento que se encuentran en el mercado sacadas de [6, p. 59], entre las seleccionadas se identifican algunas máquinas de referencia para la creación del prototipo de máquina extrusora en este proyecto.

- **Filabot EX2 Filamento Extruder**

La filabot (Figura 1) es una máquina extrusora diseñada para para fabricar filamento, cuenta con un Husillo de extrusión compactado con tres capas de acero inoxidable y tiene las siguientes características: una potencia de 500 Watts, su temperatura máxima de trabajo es de 450 °C. El Husillo de extrusión gira a 35 RPM, genera filamento de 1.75, 2.85 y 3.0 mm, con una producción de 0.1 kg/h, el costo de esta máquina es de \$2,699.00



Figura 1. Máquina extrusora Filbot.

- **Filastruder Kit**

La máquina filastruder (Figura 2) es una extrusora que trabaja más con ABS, pero admite otros polímeros, tiene una potencia de 50 watts, su temperatura de trabajo es hasta los 260 °C, su husillo trabaja con una velocidad de 8 RPM produciendo 06 kg/h, y haciendo filamento de 1.75 y 3.0 mm, su costo es de \$299.00.



Figura 2. Máquina extrusora Filastruder.

- **Máquina extrusora HYPET ZS65 / 132**

Esta máquina extrusora cuenta con dos Husillos de extrusión y es capaz de generar de 280 a 320 kg/h de plástico extruido ya sea PVC, UPVC o WPC, trabaja de manera automatizada y cuenta con calentadores cerámicos y un enfriamiento del plástico extruido por aire acondicionado trabajando con una potencia de 37 KW. (Figura 3)



Figura 3. Máquina extrusora ZS65.

4.2.4. Aplicaciones de los Filamentos PET

El PET es uno de los materiales más utilizados en el mundo, su gran durabilidad, resistencia al impacto y lo compacto de su composición, permiten que las aplicaciones del filamento PET sean amplias y dispares [7].

- **Envases y botellas de plástico reciclable:**

Dicho termoplástico es muy usado en la producción de envases o bebidas, como los refrescos y botellas de agua. Se convierte así, en un material de uso diario en el sector industrial, gracias a su rigidez y dureza. Aunque, también, influye el hecho de poder ser reciclado en su totalidad, hecho que ayuda a fabricar otras muchas botellas y envases de plástico a medida.

- **Textiles:**

El *PET* es un tipo de plástico que se utiliza en la industria textil para la fabricación de distintas prendas de ropa. De hecho, se convierte en un excelente sustituto al lino e incluso al algodón.

- **Film o películas fotográficas:**

Este polímero también se usa para la creación de distintas películas fotográficas. Aunque, también es muy útil para crear el papel básico de impresión en rayos X.

- **Fabricación de maquinaria:**

En la actualidad, el tereftalato de polietileno se utiliza para la fabricación de distintas máquinas expendedoras y recreativas.

- **Artículos de iluminación:**

Para la fabricación de distintas lámparas de diseño. De hecho, el PET resulta ser uno de los materiales más atractivos en el diseño de iluminación, tanto exterior como interior.

4.3. Manufactura aditiva

Los orígenes de la manufactura aditiva se remontan a la década de 1980, cuando se utilizaba principalmente con fines de prototipado. Sin embargo, estos prototipos generalmente no eran funcionales. Este proceso se conocía como prototipado rápido, ya que permitía a las personas crear rápidamente un modelo a escala del objeto final, evitando el proceso típico de configuración y los costos asociados con la creación de un prototipo tradicional.

A medida que la manufactura aditiva mejoró, sus aplicaciones se expandieron para incluir la fabricación de herramientas rápidas, que implicaba la creación de moldes para productos finales. A principios de la década de 2000, la manufactura aditiva había avanzado lo suficiente como para producir productos funcionales para uso final. En los últimos años, grandes empresas como Boeing y General Electric han incorporado la fabricación aditiva como parte integral de sus procesos comerciales.

Así mismo, la manufactura aditiva ofrece varias ventajas. Permite geometrías complejas y diseños intrincados que serían difíciles o imposibles de lograr con métodos de fabricación tradicionales. Además, posibilita la producción bajo demanda, lo que reduce los costos de inventario y permite una respuesta más rápida a las demandas del mercado. Además, la fabricación aditiva permite la personalización, ya que puede producir fácilmente variaciones únicas de un producto sin incurrir en costos significativos adicionales [8].

4.3.1. Técnica FDM

La técnica de modelado por deposición fundida (FDM) [9], es un sistema de fabricación aditiva donde un cabezal de extrusión controlado por ordenador extruye un hilo de material plástico. En las máquinas industriales, este proceso se produce en una cámara con temperatura y ambiente

controlados. En las impresoras 3D más económicas, por el contrario, ese control no puede ser realizado de forma tan exhaustiva.

Este tipo de modelado construye las piezas tridimensionalmente haciendo avanzar un hilo de plástico fundido por un cabezal de extrusión controlado por ordenador.

El cabezal automatizado produce dos movimientos planos X e Y en una plataforma con movimiento vertical. El cabezal realiza la función de extrusor, calentando el filamento de material termoplástico, del que es alimentado, hasta fundirlo. La deposición del material sobre la base realiza la construcción de cada sección o capa de la pieza. Cada vez que se completa una capa, la mesa desciende o el extrusor asciende para poder continuar con la siguiente. Según la forma del objeto o pieza a fabricar, hay que plantearse la necesidad de construir soportes a la vez que se construye la pieza. Estos deben realizarse de forma que permitan ser retirados sin excesivas complicaciones una vez finalizado el proceso de creación.

El modelado por deposición fundida (FDM) realizado en máquinas profesionales facilita la obtención de piezas de calidad con materiales finales y homologados. Esta tecnología aditiva se aplica en sectores como la industria, medicina y aeronáutica. Estas son algunas de sus aplicaciones:

- Maquetas para validación dimensional y funcional de producto
- Piezas con material homologado para aeronáutica
- Posibilidad de cromar piezas de ABS
- Fabricación de series cortas de piezas
- Fabricación de piezas de menor coste

4.4. Extrusión de plásticos

La extrusión[10] de plásticos es un proceso industrial que ha revolucionado la fabricación en la industria del plástico. Este método permite la producción continua de elementos con un perfil de sección transversal fija, siendo fundamental en la creación de productos como películas, láminas, tuberías, perfiles y tubos. En esencia, el material plástico es alimentado a una extrusora a través de una tolva. Una vez dentro de la extrusora, que se compone de un tornillo giratorio rodeado por un barril calentado, el material se mezcla, se funde y es impulsado a través de una matriz, que es responsable de dar la forma final al producto.

Los principios básicos de la extrusión se centran en la transformación térmica y mecánica del plástico. El calor y la presión dentro de la extrusora funden el material, mientras que el tornillo

giratorio lo impulsa hacia la matriz, determinando su forma final. El proceso de extrusión se desarrolló por primera vez en el siglo XIX para la producción de vidrio. En 1904, se utilizó por primera vez para la producción de plástico y esto marcó un punto de inflexión, permitiendo la producción masiva de productos plásticos de diversas formas y aplicaciones. Hoy en día, la extrusión de plásticos es fundamental en sectores como el embalaje, la construcción, la industria automotriz y la medicina, entre otros. Su versatilidad y capacidad para producir componentes con precisión y en grandes volúmenes la convierten en una herramienta indispensable para ingenieros y profesionales de la industria del plástico.

Una extrusora es un equipo utilizado para el proceso de extrusión, que implica la transformación de materiales, generalmente plásticos, en un producto continuo de sección transversal definida. El material es empujado o extraído a través de una matriz, que le da la forma deseada.

4.4.1. Componentes de una máquina de extrusión

- **Tolva:** es el punto de partida, donde el material se alimenta a la extrusora.
- **Barril:** un cilindro calentado que contiene el tornillo y el material en proceso.
- **Tornillo / Husillo:** elemento giratorio que transporta y comprime el material a través del barril.
- **Matriz:** pieza de metal que moldea el material fundido en la forma deseada.
- **Cooler:** dispositivo que enfría y solidifica el producto después de la extrusión.

4.4.2. Tipos de máquinas extrusoras y sus aplicaciones

La industria del plástico utiliza diversas máquinas de extrusión para procesar y dar forma a diferentes materiales. Estas máquinas varían en función de su diseño y aplicaciones específicas.

4.4.2.1. Extrusoras de tornillo sencillo

- **Aplicaciones:** producción de láminas, tubos, perfiles, películas y cables.
- **Materiales procesados:** polímeros termoplásticos como polietileno, polipropileno, PVC y nylon.

-
- Características: las extrusoras de tornillo simple o sencillo son las más comunes y económicas, emplean un solo tornillo para empujar el material a través de un dado.

4.4.2.2. Extrusoras de tornillo doble

- Aplicaciones: producción de productos que requieren alta calidad de mezcla, como PVC para tuberías y cables.
- Materiales procesados: materiales con aditivos o colorantes.
- Características: dos tornillos de extrusión, uno interno y uno externo, que giran en sentido contrario, permitiendo una mezcla más uniforme y eficiente. Existen dos tipos principales de sistemas de tornillo doble en función de su rotación:
- Tornillos dobles contrarrotantes: en este sistema, los tornillos giran en sentido contrario uno del otro. Esta contra rotación crea un efecto de cizallamiento y compresión muy fuerte, lo que permite obtener mezclas altamente homogéneas y una alimentación más estable del material. Son especialmente útiles para procesar materiales con una alta viscosidad o que requieren una mezcla intensa, como el PVC rígido, o para la extrusión de madera plástica.
- Tornillos dobles cortantes: aquí, ambos tornillos giran en la misma dirección. Este diseño es más adecuado para procesos que requieren menos cizallamiento y es ideal para la coextrusión, donde diferentes materiales se combinan en una única extrusión. Permiten una buena distribución y dispersión de los componentes, aunque con un grado de cizallamiento menor que las contrarrotantes.

4.4.2.3. Extrusoras giratorias sin tornillo

- Aplicaciones: producción de perfiles, tubos y películas.
- Materiales procesados: polímeros termoestables o con alta viscosidad como poliuretano, acrílico y caucho.
- Características: estas extrusoras no emplean tornillos, sino un mecanismo giratorio para impulsar el material.

4.4.2.4. Extrusoras ram

- Aplicaciones: producción de pelotas, mangueras y juntas.
- Materiales procesados: materiales con baja fluidez o alta elasticidad como poli isopreno, caucho natural y sintético.
- Características: utilizan un pistón o émbolo para empujar el material.

4.4.2.5. Otros tipos de máquinas de extrusión

- Extrusoras de tornillo helicoidal: son el tipo más común de extrusora utilizadas en la industria. Están diseñadas específicamente para transportar, mezclar y fundir materiales termoplásticos. El tornillo helicoidal, que es el componente principal de la extrusora, gira dentro de un cilindro. A medida que este tornillo rota, transporta el material hacia adelante y hacia abajo, donde se calienta y funde. Posteriormente, el material fundido se empuja a través de una boquilla para darle la forma deseada.

Estas extrusoras son esenciales para la producción de diversos productos de plástico, tales como tubos, perfiles, láminas, películas, cables y alambres.
- Extrusoras de tornillo con alimentación lateral: estas extrusoras incorporan un tornillo con una alimentación lateral de material. Esta característica permite una introducción y mezcla uniforme de componentes adicionales en el proceso. Son especialmente útiles para productos que necesitan una distribución homogénea, como láminas y películas de plástico.
- Extrusoras de tornillo con alimentación superior: presentan una característica distintiva: el material se introduce al tornillo a través de una abertura ubicada en la parte superior del barril. Esto otorga un control y precisión superior en la alimentación del material, lo cual es crucial para productos que demandan precisión en su composición, como ciertos perfiles y tuberías.

4.4.3. Características térmicas en el proceso de extrusión

4.4.3.1. Temperatura de fusión en procesamiento de polímeros:

Se refiere a aquel valor de temperatura requerido para lograr características de procesamiento estable. En la Tabla 1 el extremo superior de temperatura representa el calor usado comúnmente en los procesos de inyección y el límite inferior es el calor utilizado en los procesos de extrusión y moldeo por compresión [11, p. 37].

Tabla 1: Temperaturas de fusión para diferentes plásticos

Temperatura de materiales plásticos reciclables	
Plástico	Melt Point
PET	250-280 °C
HDPE	177-274 °C
PP	208-251 °C
PS	177-260 °C

4.5. Control de temperatura

Hay tres tipos de control de temperatura básicos: controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), ON/OFF y proporcional. Dependiendo del sistema a ser controlado, el operador será capaz de utilizar uno u otro tipo para controlar la temperatura del proceso [12].

4.5.1. Controlador de temperatura On / Off

Un controlador ON/OFF es la forma más simple de control de temperatura. La salida del regulador está encendida o apagada, sin un estado medio. Un controlador de temperatura ON/OFF cambia la salida sólo cuando la temperatura atraviesa el punto de ajuste. Para el calentamiento, la salida se activa cuando la temperatura está por debajo del punto de ajuste, y se apaga cuando está por encima del mismo. Cada vez que la temperatura cruza el punto de ajuste, el estado de la salida cambia, la temperatura del proceso oscila continuamente, entre el punto de ajuste.

En los casos en que este ciclo se produce rápidamente, y para evitar daños a los contactores y válvulas, se añade un diferencial de encendido y apagado, o "histéresis", a las operaciones del controlador de temperatura. Este diferencial requiere que la temperatura exceda del punto de ajuste por una cierta cantidad antes de que se active o desactive de nuevo. Un diferencial ON/OFF impide

que se produzcan cambios rápidos de conmutación en la salida, si los ajustes se producen rápidamente. El control ON/OFF se utiliza generalmente cuando no es necesario un control preciso, en los sistemas que no pueden soportar cambios frecuentes de encendido/apagado, donde la masa del sistema es tan grande que las temperaturas cambian muy lentamente, o para una alarma de temperatura.

4.5.2. Controlador de temperatura proporcional

El control de temperatura proporcional elimina el ciclo asociado del control on-off. Un controlador proporcional disminuye la potencia media suministrada al calentador cuando la temperatura se aproxima al punto de ajuste. Esto tiene el efecto de disminuir la energía del calentador al aproximarse al punto de ajuste sin que lo sobrepase, manteniendo una temperatura estable. Esta dosificación se puede realizar girando el encendido y apagado de salida para intervalos cortos de tiempo. La "proporcionalización de tiempo" varía la relación de tiempo "on" y tiempo "off" para controlar la temperatura. La acción proporcional se produce dentro de una "banda proporcional" en torno a la temperatura objetivo. Fuera de esta banda, el controlador de temperatura se comporta como una unidad ON/OFF normal, con la salida, ya sea totalmente ON (por debajo de la banda) o totalmente OFF (por encima de la banda).

Sin embargo, dentro de la banda, la salida del regulador se enciende y se apaga en la relación a la diferencia de la medición del punto de consigna. En el punto de referencia (que es el punto medio de la banda), la salida en: relación de apagado es de 1:1, es decir, el tiempo de encendido y tiempo de apagado son iguales. Si la temperatura está lejos del punto de ajuste, el cierre y el corte variarán en proporción a la diferencia de temperatura. Si la temperatura está por debajo del punto de ajuste, la salida estará ON más tiempo, si la temperatura es demasiado alta, la salida estará OFF predominantemente.

4.5.3. Controlador de temperatura PID

El tercer tipo de control de temperatura es el PID, que ofrece una combinación del proporcional con control integral y derivativo. De hecho, las siglas PID hacen referencia a un control Proporcional Integral Derivativo. Un controlador de temperatura PID combina el control proporcional con dos ajustes adicionales, que ayuda a la unidad automáticamente a compensar los cambios en el sistema.

Estos ajustes, integral y derivativo, se expresan en unidades basadas en el tiempo, también se les nombra por sus recíprocos, RATE y RESET, respectivamente. Los términos proporcional, integral

y derivativo se deben ajustar de manera individual mediante el método prueba y error. El regulador proporcional ofrece el control más preciso y estable de los tres tipos de controladores, y se utiliza comúnmente en sistemas que tienen una masa relativamente pequeña, que son aquellos que reaccionan rápidamente a cambios en la energía añadida al proceso.

Se recomienda en sistemas en los que la carga cambia a menudo y no se espera que el controlador lo compense automáticamente, debido a los frecuentes cambios en el punto de referencia, la cantidad de energía disponible, o la masa a controlar. OMEGA ofrece un número de controladores de temperatura que calculan y ajustan automáticamente sus valores del controlador PID para que coincida con el proceso. Estos son conocidos como controladores autoajustables o autotune.

4.6. Controlador y características

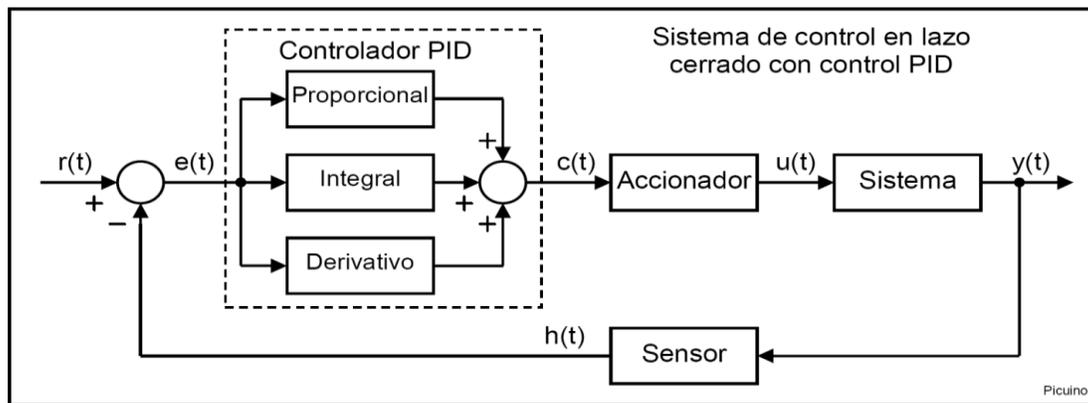


Figura 4. Diagrama de control continuo.

La señal $r(t)$ se denomina **referencia** e indica el estado que se desea conseguir en la salida del sistema $y(t)$. En un sistema de control de temperatura, la referencia $r(t)$ será la temperatura deseada y la salida $y(t)$ será la temperatura real del sistema controlado. Como puede verse en el esquema anterior, la entrada al controlador PID es la señal de **error** $e(t)$. Esta señal indica al controlador la diferencia que existe entre el estado que se quiere conseguir o referenciar $r(t)$ y el estado real del sistema medido por el sensor, señal $h(t)$. Si la señal de error es grande, significa que el estado del sistema se encuentra lejos del estado de referencia deseado. Si por el contrario el error es pequeño, significa que el sistema ha alcanzado el estado deseado [13]. La ecuación que rige el sistema para manejar el controlador es la salida $u(t)$ y realizando el diagrama de bloques se obtiene la salida característica de este tipo de controladores:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt + K_p t_d \frac{de(t)}{dt}$$

ecuación [1]

$K_p =$ Costante proporcional

$t_i =$ Tiempo integral o constante integral

$t_d =$ Tiempo derivativo o constante derivativa

4.6.1. Control Discreto

Para los modelos discretos se obtiene una representación del sistema de control por muestras como se muestra en Figura 5, las variables en esta son las mismas del modelo continuo solo que discretizado. Para implementar la ecuación de la ley de control en tiempo discreto se utiliza la transformada Z, a las muestras de cada uno de los bloques [14].

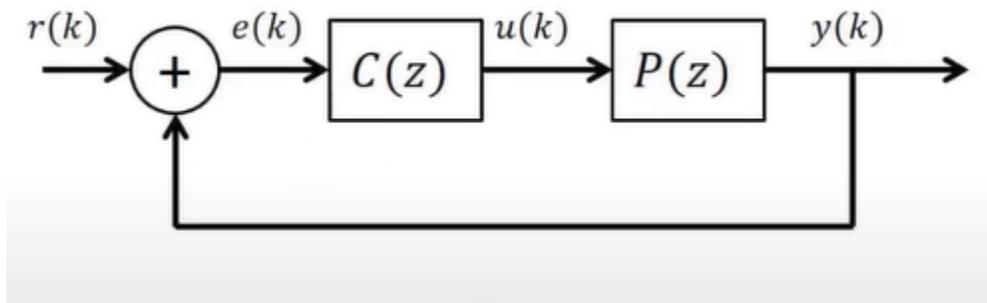


Figura 5 Diagrama de control discreto.

El control discreto PID se obtiene discretizando la ecuación continua [1], aproximando el término integral mediante la sumatoria trapezoidal y el término derivativo mediante la diferencia de dos puntos como se muestra en la ecuación 2 y 3. Donde T_s es el periodo de muestreo que debe ser encontrado para el controlador, $e(k)$ es la muestra del error en un instante k y $e(k-1)$ es la muestra anterior.

$$\int e(t)dt = \sum \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{2} \right] T_s \quad \text{ecuación [2]}$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad \text{ecuación [3]}$$

Se sustituye las aproximaciones discretas de las ecuaciones [2],[3] en [1] y se discretizan las muestras obteniendo la siguiente representación:

$$C(z^{-1}) = \frac{u(k)}{e(k)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad \text{ecuación [4]}$$

donde:

$$1. \quad q_0 = K_p \left[1 + \frac{T}{2t_i} + \frac{t_d}{T_s} \right] \quad \text{ecuación [5]}$$

$$2. \quad q_1 = -K_p \left[1 - \frac{T}{2t_i} + \frac{2t_d}{T_s} \right] \quad \text{ecuación [6]}$$

$$3. \quad q_2 = \frac{K_p t_d}{T_s} \quad \text{ecuación [7]}$$

Distribuyendo la ecuación 4 para despejar la función de u(k) se tiene:

$$u(k)(1 - z^{-1}) = q_0 e(k) + q_1 z^{-1} e(k) + q_2 z^{-2} e(k)$$

$$u(k) - u(k)z^{-1} = q_0 e(k) + q_1 z^{-1} e(k) + q_2 z^{-2} e(k)$$

$$u(k) = u(k)z^{-1} + q_0 e(k) + q_1 z^{-1} e(k) + q_2 z^{-2} e(k)$$

Por último, se le aplica la transformada inversa Z y obtenemos la ecuación en diferencias, que es la ecuación de control aplicable en el microcontrolador:

$$u(k) = u(k - 1) + q_0 e(k) + q_1 e(k - 1) + q_2 e(k - 2)$$

ecuación [8]

4.6.2. Función de transferencia:

Es una expresión matemática que caracteriza las relaciones de “Entrada – Salida” de sistemas lineales invariantes en el tiempo. Se define como la relación de la transformada de Laplace de la salida (función respuesta), a la transformada de Laplace de la entrada (función excitada), bajo la suposición de condiciones iniciales cero.

Se obtiene una expresión que relaciona la salida y la entrada de un sistema lineal invariante en el tiempo, en términos de los parámetros del sistema y constituye una propiedad del mismo, independiente de la función excitadora [15].

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1} \text{ ecuación [9]}$$

K = Ganancia estática del sistema

L = Tiempo de retardo del sistema

τ = Constante de tiempo del sistema

4.7. Microcontrolador.

Un microcontrolador es un circuito integrado que en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida y periféricos. Estas partes están interconectadas dentro del microcontrolador, y en conjunto forman lo que se le conoce como microcomputadora. Se puede decir con toda propiedad que un microcontrolador es una microcomputadora completa encapsulada en un circuito integrado. El controlador usado para el proyecto fue la Raspberry Pi Pico board con microcontrolador basada en el chip Raspberry Pi RP2040, diseñado para ser una plataforma de desarrollo flexible, pero de bajo costo. (Ver Figura 6)

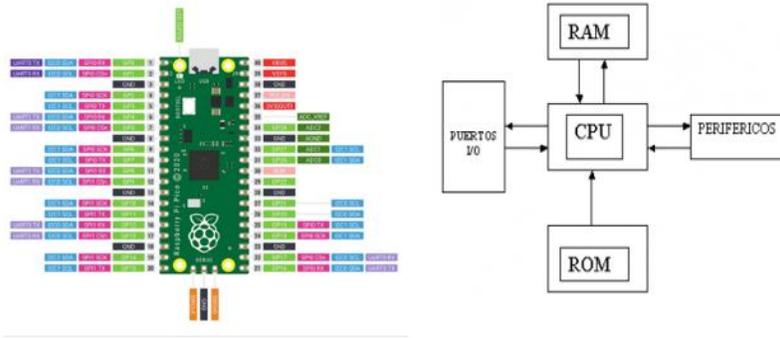


Figura 6 Microcontrolador,

4.8. Optoacoplador.

Un optoacoplador también llamado optoaislador, es un circuito electrónico que funciona como un interruptor *aislado* ópticamente. Es decir, que permite una conexión eléctricamente aislada entre dos circuitos que operan a distintos voltajes. Esta construido por un led y un circuito de control activado por luz infrarroja. Entre otras cosas, una de las ventajas principales de los optoacopladores es su aislación eléctrica entre la carga y la electrónica de control. La única conexión entre ambos elementos es la luz del led que activa al fototransistor. salida a fototransistor. (Ver Figura 7)

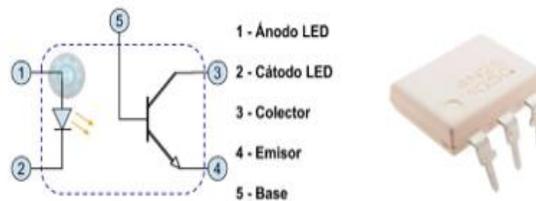


Figura 7 Optoacoplador,

4.9. Triac.

El Triac de las siglas del inglés Trío do para Alternating Current. Se define como un interruptor de CA (corriente alterna) de 3 terminales que es diferente de los otros rectificadores controlados por silicio en el sentido de que puede conducir en ambas direcciones (semiconductor bidireccional). Si la señal de puerta (Gate) aplicada es positiva (+) o negativa (-), permite el flujo de corriente. Por lo tanto, este dispositivo se puede utilizar para sistemas de CA como un interruptor.

Este componente de 3 terminales y 4 capas que controla la energía de CA (corriente alterna) se utilizan para conmutar y controlar la alimentación de CC (corriente continua). (Ver Figura 8)



Figura 8 Triac,

V. METODOLOGÍA

La metodología del trabajo se dividió en tres etapas: (i) Definición de los criterios y selección de dispositivos y mecanismos (ii) construcción del dispositivo de extrusión de filamento para impresión 3D y (iii) uso del dispositivo. En la Figura 9 se detalla cada una de las etapas.

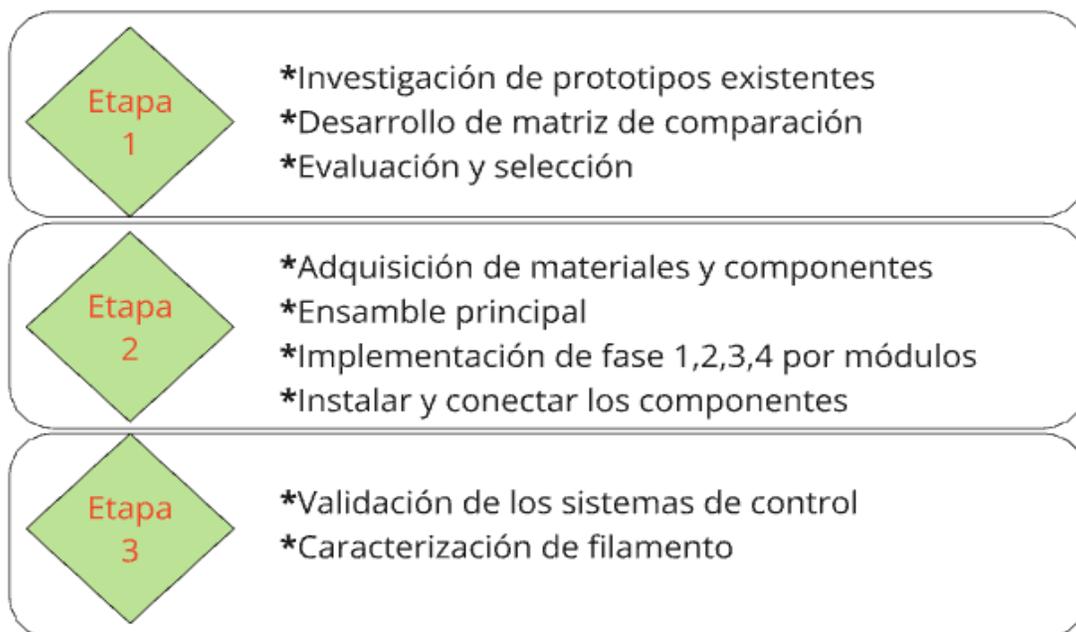


Figura 9. Metodología aplicada para el desarrollo del proyecto.

5.1. Identificación y selección de componentes.

Para la identificar y seleccionar los componentes del prototipo, se realizó una extracción de las características de prototipos que se encontraran en el mercado, así como algunos prototipos realizados por universidades y grupos de investigación con resultados similares a los planteados en este proyecto. En la Figura 10 se muestran el esquema para la realización de las matrices de selección.

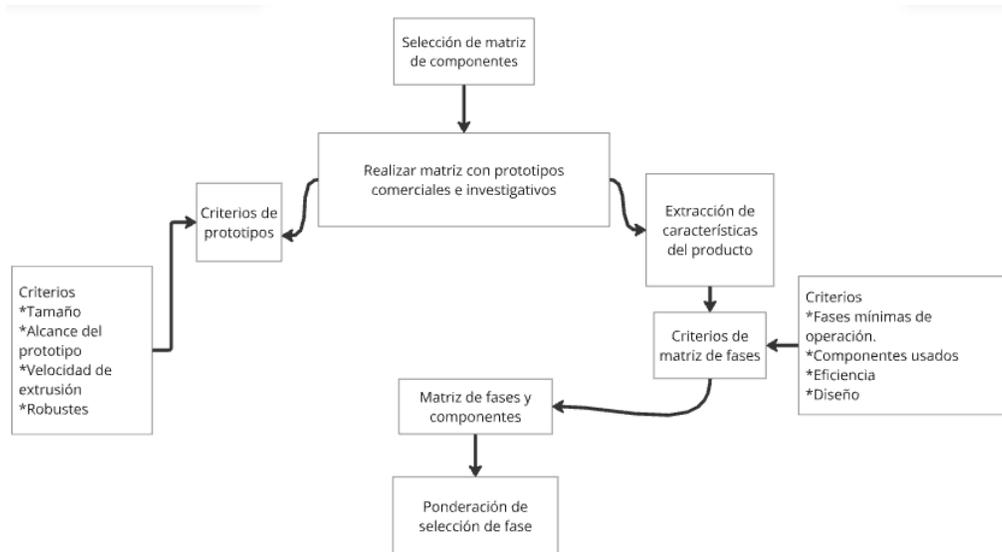


Figura 10 Selección de componentes.

Para la selección de los componentes se realiza una matriz con los prototipos que se consideren pertinentes, en nuestro caso se escogieron 5 prototipos de carácter comercial y 5 prototipos similares, realizados en desarrollos investigativos y proyectos.

Caracterizados los prototipos, se seleccionan los criterios de fases que conforman a los prototipos, se procede a corroborar los componentes usados en cada fase para cada uno de los prototipos seleccionados y se le da un valor de ponderación a la fase de cada una de las muestras.

5.1.1. Criterios de selección de elementos y dispositivos

• Almacenamiento

La selección de almacenamiento se realizó a través del siguiente diagrama de bloques (Ver Figura 10) en donde se evalúan los criterios para escoger y fabricar la fase de almacenamiento.

Para la selección de la fase de enfriamiento se realizó de igual manera un diagrama de bloques similar al de almacenamiento, solo se modificaron los criterios para la fase con geometría, posición, material y método. Las características fueron cambiadas también por diseño, eficiencia, acoplamiento y posicionamiento.

La ponderación para la fase de enfriamiento tuvo como valores 0 y 10 como referentes de puntuación para los prototipos. Los criterios que más tuvieron peso en esta fase fueron el método con el que se realiza el enfriamiento y la geometría del sistema para que conecte de una manera más eficiente las fases. Esto ayuda a que el material conserve la forma y adquiera las características finales del producto. Un buen sistema de enfriamiento ayudara a moldear mejor el material.

- **Transporte**

Por último, a la selección de la etapa de transporte se le elaboró un diagrama de bloques como los anteriores, donde los criterios de esta fase fueron geometría, material, posición, eficiencia y diseño. Para las características se tuvieron condiciones similares con diferencia de la velocidad.

En la ponderación de la última fase se siguieron los mismos sistemas de puntuación de las fases anteriores, 0 como mínimo y 10 como máxima puntuación. Los criterios que tuvieron mayor relevancia en esta fase fueron la eficiencia con que funciona el mecanismo y el diseño de cómo iba a encajar con las demás fases

5.2. Ensamble de máquina

El ensamble de la máquina fue realizado por módulos que separaron las 4 fases del proyecto del prototipo, tanto la parte electrónica como la parte física y mecánica fueron realizadas con materiales conseguidos dentro del laboratorio. El prototipo fue pensado para hacerse por módulos de fases que fueran fácilmente compatibles y replicables.

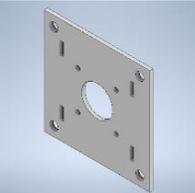
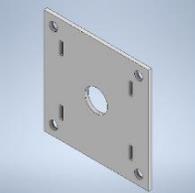
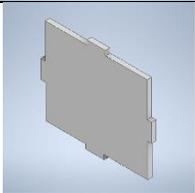
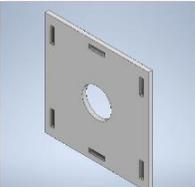
5.2.1. Diseño asistido por computador

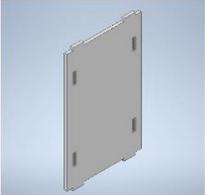
En este apartado se muestran los diseños de las piezas que fueron realizadas por medio de software o encontradas en plataformas de open source, para cada una de las fases del prototipo de extrusión

- **Módulo de Almacenamiento**

Se elabora una caja para posicionar el motor del prototipo, de tal manera que quede inamovible y que conecte con la fase siguiente de manera sencilla y eficiente, el módulo de almacenamiento está compuesto por una tolva para depositar la materia prima, la adecuación del motor con la broca para replicar el tornillo sin fin y una cabina que conecta la tolva y la adecuación del motor en el giro del tornillo sin fin. En la Tabla 2 se muestran las piezas usadas para la construcción de la fase.

Tabla 2. Elementos para el ensamble del módulo del almacenamiento.

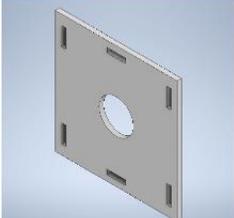
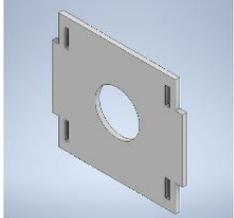
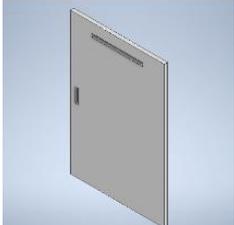
Nombre	Pieza
Soporte de motor 1	
Soporte de motor 2	
Lateral trasero del motor	
Tolva de Almacenamiento	
Tornillo sin fin (Broca 7/8)	
Soporte de compartimiento salida motor	

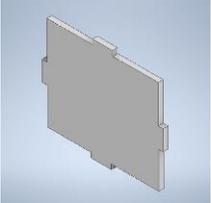
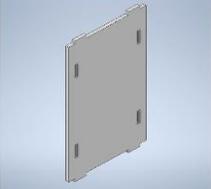
Laterales de almacenamiento	
-----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

- **Módulo de Moldeo**

Para elaborar la fase de moldeo en donde el material es deformado y convertido en filamento de impresión 3D, se elaboró un chasis que pudiera soportar y aislar el sistema de la pieza de calentamiento, así como la adecuación para que conecte con las demás fases del prototipo. En la Tabla 3 se muestran las piezas de la fase.

Tabla 3. Ensamble del módulo de moldeo.

Nombre	Pieza
Soporte de compartimiento salida calefactor	
Soporte conexión de altura	
Laterales de altura	
Pieza de calentamiento	

Lateral trasero de calentamiento	
Laterales de calentamiento	

- **Módulo de Enfriamiento**

Para la elaboración del módulo de enfriamiento, se realizó un sistema de bombeo con agua que circula el líquido constantemente para que al momento de reducir la temperatura del filamento no conserve el calor. En la Tabla 4 se muestran las piezas utilizadas para la fase.

Tabla 4. Ensamble del módulo de enfriamiento.

Nombre	Pieza
Compartimiento de agua	
Bomba de agua	
Tubo plástico	

- **Módulo de Transporte**

El módulo de transporte fue realizado por medio de un sistema mecánico capaz de transportar y enrollar el filamento final de la máquina. Para esto se replicaron modelos de carácter open source

con el sistema de movilidad establecido. En la Tabla 5 de la parte de abajo se aprecian las piezas usadas en la fase.

Tabla 5. Ensamble del módulo de transporte

Nombre	Pieza
45mm Axis driveless	
Adapter hexagon for electric drill Heavy Load	
Heavy Load plate	
Winder Spool holder main body	
Winder and Donor Right Hand Spool Axle Nut	
Spooler Centering Disc for Bambu Lab Spools 55 mm	
Gear linear for filament carriage	
Gear 25 teeth	
Gear 60 teeth Filament Guide	
Gear Worm	

Adapter hexagon for electric drill	
Rotary handle - twist grip	
Rotary handle - twist grip - knob	
Filament Guide Carriage	
Filament Guide Sled	
Filament Guide	
Axis 20mm	
Axis 39 mm	
Axis 45mm	
Axis 47 mm	
Axis 88 mm	

5.2.2. Fabricación de componentes

Se realizó la adecuación del motor y para esto se usó material MDF reciclado del laboratorio de prototipado, el chasis este compuesto por 6 piezas, dos tapas inferior y superior con un círculo en

el medio, dos tapas una frontal que fue marcada con la laser y una trasera, por último, tiene dos laterales que encajan a la perfección. En la Figura 12 se observa la cabina para el motor con las piezas mencionadas.

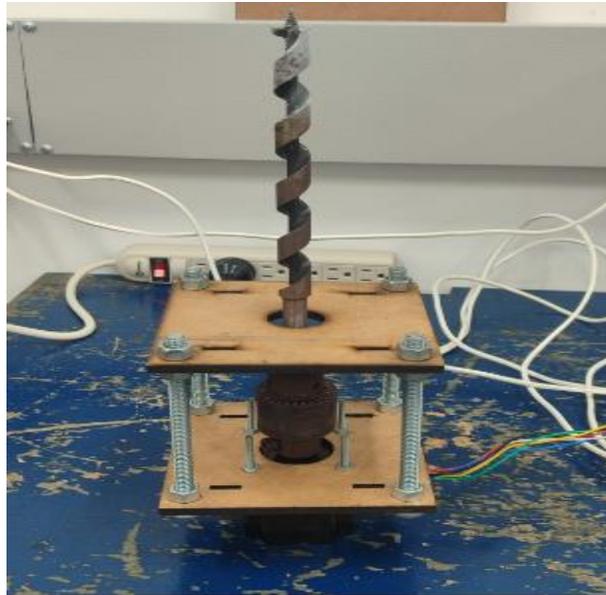


Figura 12 Chasis de motor.

Se elabora un chasis similar para la parte de la cabina que recibe el material, este consta de 4 piezas, dos laterales de aproximadamente la longitud de la cabina de almacenamiento que encajan con el chasis del motor, un soporte trasero para dar rigidez a el prototipo y una tapa que aísla el calor de la etapa de moldeado. En la Figura 13 se observa la cabina de almacenamiento con las piezas realizadas, el diseño de cada una de estas se realizó con la finalidad de que encajara con la fase anterior.



Figura 13 Chasis de Almacenamiento.

Luego de crear el depósito del motor y adecuarlo con el chasis de la cabina de almacenamiento, se procede a realizar una adecuación en el mismo material para la fase de moldeado del material. Se realizan dos niveles de chasis uno en donde queda posicionado el efector final de calentamiento y un chasis que le da altura a el prototipo para que caiga el material extruido. En la Figura 14 se observa las piezas para la fase de moldeado del material.

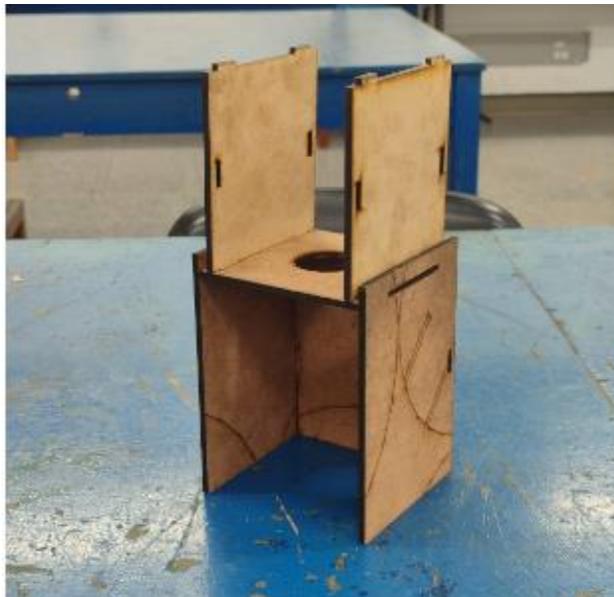


Figura 14 Chasis de zona de moldeado.

El diseño de la fase de transporte fue obtenido en internet de carácter libre, en donde posteriormente fue replicado y armado en el laboratorio. Este sistema cuenta varias piezas impresas en 3D, entre

estas están la base, soportes, tornillos, adecuaciones y rodamientos. En la Figura 15 de abajo se puede observar el mecanismo desarrollado.

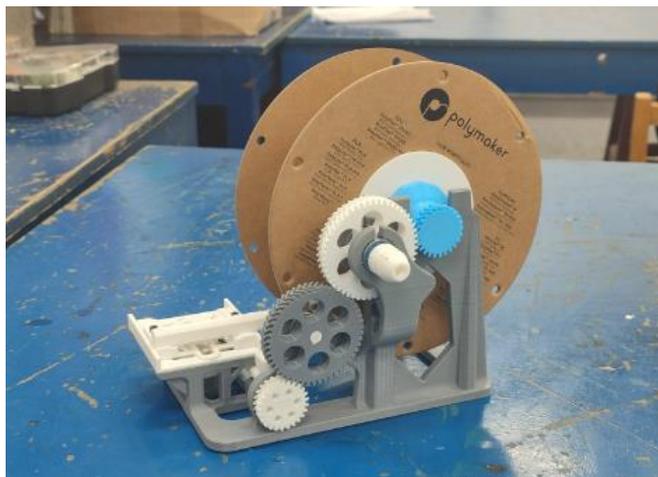


Figura 15 Chasis de transporte.

5.3. Implementación del sistema electrónico y mecánico de la extrusora

Con las piezas diseñadas, se procede a realizar el montaje electrónico para cada una de las fases, así como su respectivo sistema mecánico, si así lo requiere.

5.3.1. Control de motor

Para la construcción del controlador del motor, se decidió realizarlo por medio de un motor paso a paso NEMA23 por sus características de potencia y torque, se acoplo a un driver de potencia T6600 que se encarga de determinar cuanta corriente llega y los comandos de funcionamiento del motor.

En la Figura 16, se muestra el esquema electrónico realizado, para esto fue requerido de un motor NEMA23, una raspberry Pi Pico como controlador, una fuente de alimentación de 24V a 4.5 A, un controlador T6600 y tres pulsadores.

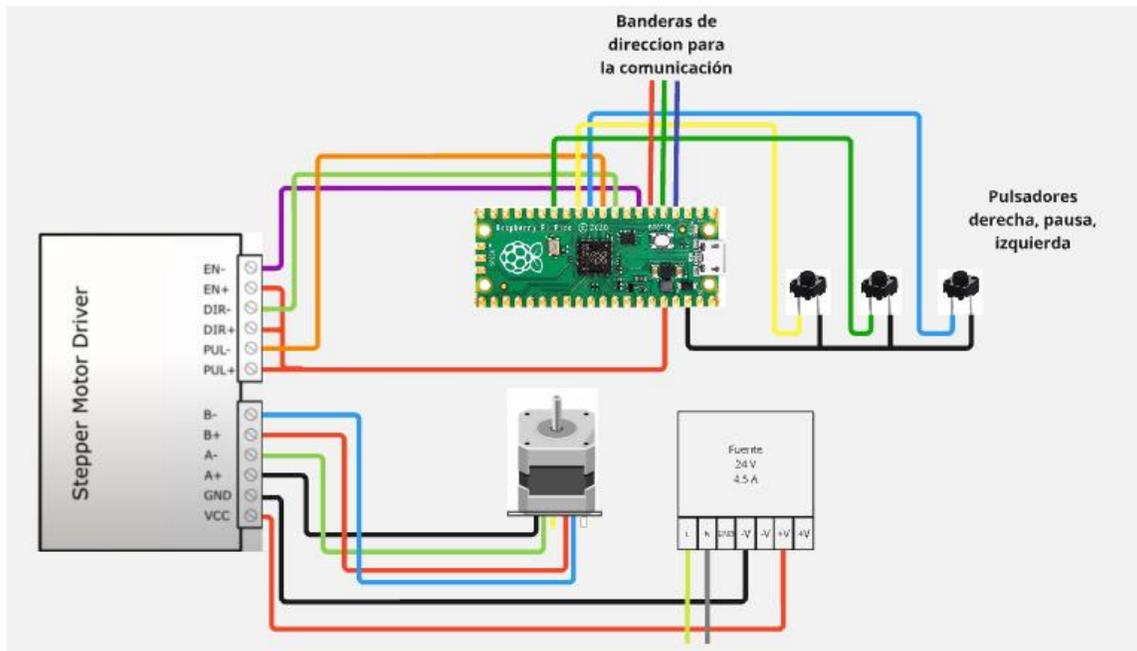


Figura 16 Control de motor.

Para controlar el motor se usó un controlador de potencia por medio de un microcontrolador, este le indicará las señales correctas para que el motor gire correctamente. Para generar las señales de dirección se utilizan tres pulsadores, uno para la dirección derecha, otro para la dirección izquierda y uno para poder pausar el motor. Del controlador salen tres señales usadas como banderas que determinan el estado de dirección del motor, esto se hace para comunicar a la pantalla OLED.

5.3.2. Control de temperatura y pantalla

Para el manejo del control de temperatura se utilizó un microcontrolador como sistema de control, un OLED de 128*64 pixeles para mostrar la información, un driver de temperatura MAX6675 con una termocupla tipo K para el censado de la temperatura, dos pulsadores para el cambio de setpoint de la temperatura, 3 señales de bandera que reciben la comunicación de las señales del controlador del motor para ser mostradas en pantalla, una pin para la señal de cruce por cero y un pin para la señal de apertura de la pieza de calentamiento. En la Figura 17 se muestra el esquema del circuito con sus respectivas conexiones.

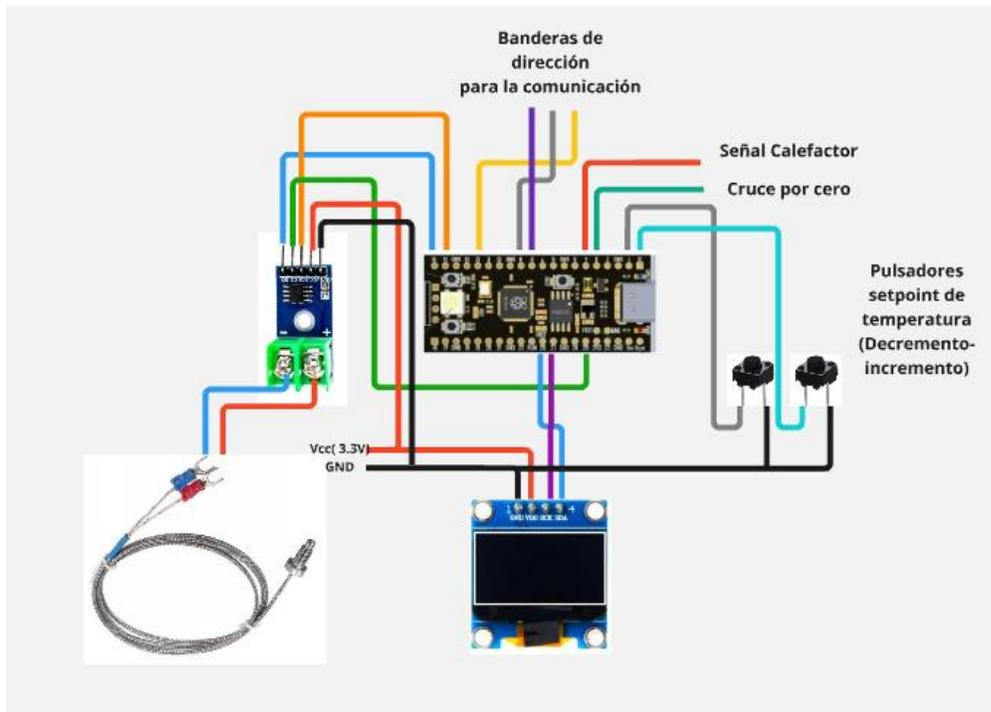


Figura 17 Control de temperatura.

Este circuito es el controlador principal del sistema, no se encarga de los movimientos del motor, pero valida sus movimientos a través de comunicaciones entre sus pines. El sistema está constantemente en monitoreo de la variable de temperatura y de las señales mandadas por el motor para imprimirlas en pantalla. Cada que la señal de cruce por cero es activada, el circuito le indica al controlador cuando debe ser encendida la señal que controla la pieza calefactora, este circuito se realizó con un triac que controla el ángulo de disparo de la onda sinusoidal. El disparo del ángulo lo realiza el PID desarrollado en el microcontrolador gracias a los valores de temperatura leídos y al error con respecto a el setpoint requerido.

5.3.3. Cruce por cero

Para el funcionamiento correcto de temperatura fue necesario realizar un cruce por cero para sincronizar las señales, para esto se utilizó dos resistencias de 47 k, un puente rectificador de onda completa de 6 A, una resistencia de base de 8.2 k, un optoacoplador 4N26 y otra resistencia de salida de 8.2k para la señal final que detecta el cruce por cero. En la Figura 18 se muestra el circuito realizado para la detección del cruce por cero.

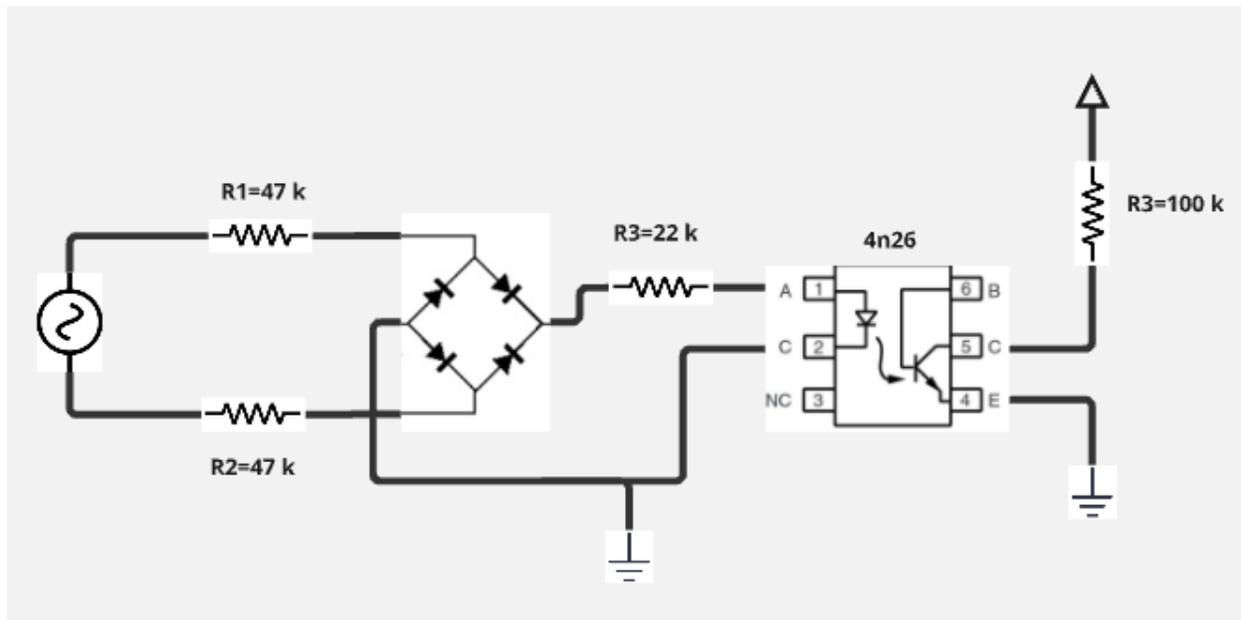


Figura 18 Cruce por cero.

5.3.4. Disparo por triac

Se incluye en el control de temperatura un disparo por triac para poder separar la parte de control de la parte de potencia. Para la implementación se utilizó un optotriac para cuidar el microcontrolador, una resistencia de base de 330, una resistencia de 2.8 k y un triac bta16 encargado de hacer los disparos en los ángulos que le indique el controlador PID [7]. En la Figura 19 se aprecia el circuito montado para el disparo de la parte de potencia, este solo será activo cuando el controlador determine el tiempo de cruce por cero y de un tiempo de apertura a la señal antes de otro cruce por cero.

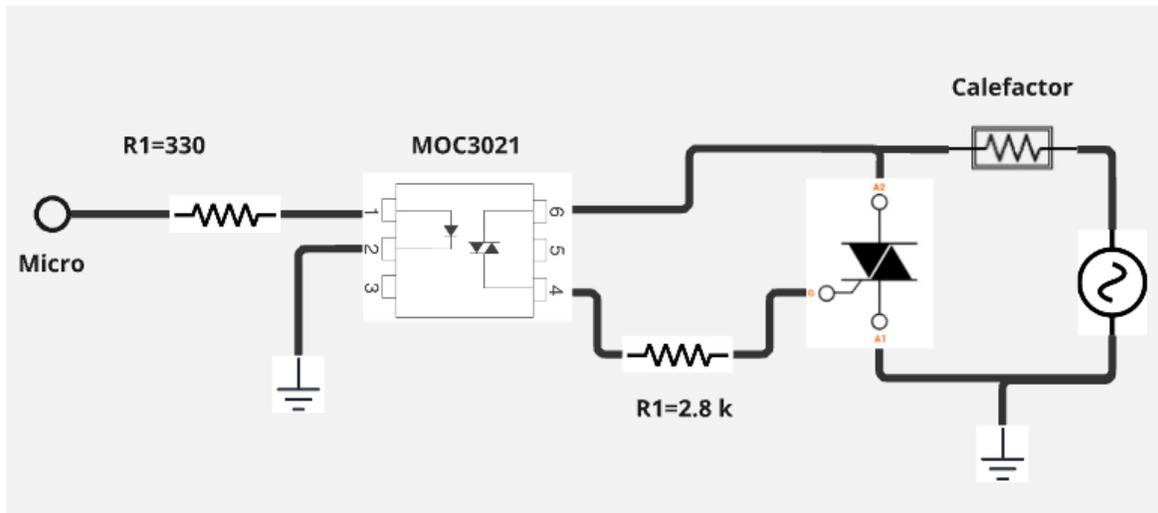


Figura 19 Disparo de Triac.

5.4. Determinación de herramientas para la operación de la extrusora

Para la creación de la extrusora fue necesario el conocimiento de varios tipos softwares que complementaban y validaban los sistemas del prototipo. Se necesitaron programas para el diseño de las piezas que no fueron encontradas en internet para ser cortadas o impresas, así como el conocimiento en programas de programación para controlar el microcontrolador.

5.4.1. Software de diseño

Las piezas realizadas fueron diseñadas en el programa de Inventor, en donde la universidad cuenta con el convenio del software. También se realizó el mismo diseño en programas de open source como Onshape para tener los mismos diseños en programas de carácter libre. Estos dos programas sirven para generar los formatos de los archivos de las piezas en 3D y en 2D que son las que reciben las máquinas del laboratorio de prototipado.

5.4.2. Software de programación

Fue requerido de conocimientos en programación, más específicamente en softwares de microcontroladores. Existen varias tarjetas que tienen sus propios programas en donde es codificado como Arduino, pero por mejoras de costo y mejoras de capacidad se escogió el microcontrolador Raspberry Pi Pico. Este puede ser programado en C y micro Python, donde se escogió la segunda opción para tener un programa más portable y pueda ser usado en otro tipo de

microcontroladores que tengan como controlador micro Python. Este tipo de código puede ser programado en varios programas IDE y para el proyecto se escogió el software Thonny por ser el programa con mayor documentación en micro Python.

5.4.3. Software de las máquinas

Los programas de diseños solo generan las piezas en un tipo de formato específico, pero son los softwares de la máquina quien cambia el diseño al lenguaje máquina para que el equipo funcione correctamente. Las piezas de corte y de diseño en 2D creada por los programas anteriores generan un formato dxf que recibe el programa RDwords mostrado en la figura 28. En este se configura las variables de la máquina y la programación de la pieza para que funcione correctamente. Una vez configurado esto el programa exporta el archivo rd que es el formato leído por la cortadora laser. Para las piezas realizadas en 3D se necesita hacer un proceso similar al de la cortadora laser, para esto es necesario un laminador que cambie el formato de la pieza a el lenguaje recibido por la máquina. El formato de las piezas exportadas por los softwares de diseño son de tipo STL y se suben al laminador de preferencia para generar el archivo gcode que es el leído por la impresora 3D. En la figura 29 se muestra el laminador usado para generar los gcode de las piezas.

5.4.4. Software electrónico

Por último, se hizo uso del programa DEMO de Proteus para corroborar valores de resistencias y de simulaciones de los módulos electrónicos. En este programa se pueden seleccionar los componentes electrónicos, así como observar el comportamiento de las señales de circuitos antes de ser montados. En la figura 30 se muestra la interfaz principal del programa.

5.5. Pruebas de validación

En el siguiente apartado se presentarán las pruebas de validación de los sistemas de control que fueron requeridos, así como sus representaciones gráficas que dieron validez a el sistema en conjunto del prototipo de extrusora. Se validan las pruebas mediante los módulos realizados en el proyecto

5.5.1. Validación del control

Las validaciones de los sistemas de control fueron realizadas por los módulos en cada fase, cada una de estas tienen diferentes características de validación que corroboran los resultados finales de funcionamiento de la máquina.

5.5.1.1. Fase de almacenamiento

La fase de almacenamiento está implementada por la adaptación del motor paso a paso, con la cabina de almacenamiento y la tolva por donde van a ser ingresados los pellets. Las pruebas de validación de esta fase correspondieron al método de control para el motor y el posicionamiento entre el motor y la cabina.

- Validación del funcionamiento del motor
- Validación de los tiempos de respuesta de los pulsadores con el microcontrolador
- Validación de los torques de fuerza del motor con el controlador T6600
- Validación del movimiento de los pellets con el motor y la cabina
- Validación de las banderas de comunicación con la pantalla

5.5.1.2. Fase de moldeo

La fase de moldeo está compuesta por la pieza de calentamiento que se compone de la resistencia, la chaqueta de aluminio y la pieza final, también el circuito electrónico que da las señales de control para que funcione correctamente la máquina.

- Validación del funcionamiento de la resistencia
- Validación de la forma de la pieza final
- Validación de la potencia de los componentes electrónicos
- Validación del módulo de cruce por cero
- Validación del funcionamiento del módulo de disparo del triac
- Validación de los límites de funcionamiento del suich de la onda sinusoidal
- Validación del sistema de control PID
- Validación del acoplamiento del control PID con los módulos de cruce y disparo
- Validación del funcionamiento del PID con la resistencia
- Validación de la curva de reacción, con un porcentaje de apertura para encontrar variables

5.5.1.3. Fase de Enfriamiento

La fase de enfriamiento se compone de un recipiente con agua como fuente y un sistema de bombeo que circule el agua por una superficie en donde hace contacto con el filamento para enfriarlo y pasarlo a la siguiente fase.

- Validación de bombeo
- Validación de salida de control
- Validación de superficie de enfriamiento
- Validación de circulación del agua

5.5.1.4. Fase de Transporte

La fase de transporte se constituye por un sistema de rodamientos impresos en 3D, el cual tiene un mecanismo mecánico que recibe la parte inicial del filamento y con un movimiento de un motor, se le da un enrollado característico de este tipo de filamentos.

- Validación de piezas
- Validación de rodamiento y encaje de piezas
- Validación de método de movimiento
- Validación de acoplamiento

5.5.2. Validación por medio de calificación del filamento extruido.

Para la validación y caracterizar el filamento, se realizan las pruebas del filamento extruido y al filamento procesado en las impresoras 3D. Para el filamento se tuvieron las siguientes validaciones:

- Validación de uniformidad del material
- Validación de diámetro del filamento
- Validación de la cualificación de la resistencia del filamento

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este segmento se muestran todos los resultados obtenidos tanto para la selección e identificación de componentes, así como las implementaciones realizadas tanto en la parte electrónica como en la parte mecánica del prototipo de extrusora.

5.6. Selección de los elementos por medio de ponderaciones

5.6.1. Matriz de caracterización

Para la matriz de selección, se realizó una búsqueda exhaustiva de las máquinas del mercado, así como proyectos de investigación que realizaran el mismo tipo de mecanismo. En primer lugar, se recopiló información de los prototipos, para observar las características técnicas de cada dispositivo. En las Tabla 6 y Tabla 7 se muestran los 10 prototipos seleccionados para tener como referencia. Los primeros 5 prototipos son las máquinas que se encuentran fácilmente en el mercado a través de plataformas de compras en línea o de empresas que realizan estos prototipos. Mientras que los 5 prototipos restantes son las máquinas realizadas a través de grupos de investigación o grupos de trabajo que realizan la misma funcionalidad.

Tabla 6 Prototipos del mercado.

Máquina	Creador	Foto
FILABOT EX2	FILAMENT MAKER	
FULLEXTRUDER	FILAMENTCYCLE	
EXTRUSORA FELFIL	FELFIL	
WELLZOOM	Shenzhen Mistar Technology	
EXTROSORA S25	ACC MACHINE	

Tabla 7 Prototipos de investigación.

EXTRUSORA		INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANISC	
3DP products	Ans Al Rashid, Muammer Koc		
Akabot	Santa Clara University		
Akabot 2.0	Santa Clara University		
RepRable Recyclebot	Michigan technological University		

En las tablas no se muestra toda la información de la matriz de selección, solo se muestra el nombre de la máquina, el nombre de su creador y una imagen del prototipo para no extender la información. En esta matriz se tuvieron en cuenta características como: costo de la máquina, peso de la máquina, velocidad de extrusión, tipo de materia prima entre otros.

5.6.2. Matriz de ponderación

La numeración de los prototipos de la Tabla 8 muestra el orden de las imágenes anteriores de la matriz de caracterización. Luego de determinar las características de las máquinas se realizó una matriz con los componentes notorios o que se pudieran encontrar en las referencias de los equipos. Se determinó el diseño mecánico y los componentes electrónicos de cada fase, así como una fase extra en donde se determinaban las características propias de cada equipo. Determinados los componentes y sistemas de cada fase, se procede a otorgarle un puntaje de 0 a 10 a cada prototipo con los criterios seleccionados para cada una de las fases en la metodología planteada.

Tabla 8 Ponderación de prototipos,

Prototipos	PONDERADO	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Otros
PROTOTIPO 1	23	8	5	3	0	7
PROTOTIPO 2	34	5	8	3	9	9
PROTOTIPO 3	39	8	8	7	7	9
PROTOTIPO 4	44	8	10	10	9	7
PROTOTIPO 5	25	8	7	3	0	7
PROTOTIPO 6	40	8	10	8	7	7
PROTOTIPO 7	28	4	5	5	7	7
PROTOTIPO 8	28	8	10	3	0	7
PROTOTIPO 9	31	8	9	5	2	7
PROTOTIPO 10	37	7	5	7	9	9

Se seleccionaron los 3 prototipos con más puntuación que sirvieron como base para la elaboración del prototipo de extrusora. Estos fueron el prototipo 4, 6 y 3 en su orden respectivo. De los demás prototipos solo se tuvieron en cuenta ciertas recomendaciones de posicionamiento de la máquina.

La mayoría de los prototipos de extrusora que se encuentran en el mercado, son empresas consolidadas en la elaboración de máquinas para extrusión. La documentación de los procesos fue muy limitada ya que se reservan los derechos de autor, así como los códigos o implementaciones electrónicas dentro del prototipo.

5.7. Controladores

Los controladores de todo el sistema fueron desarrollados por módulos de control, que en conjunto realizan funcionamiento del prototipo. Se implementa un control con un diagrama de flujo para cada uno de estos, con el fin de entender su funcionamiento y lograr un código expandible de fácil compenetración con los demás módulos.

5.7.1. Control de Motor

Para realizar el controlador del motor fue necesario de los componentes mencionados en la metodología y del diagrama del circuito. El motor nema 23 [16], cuenta con 6 cables de conexión para la configuración del motor, este tiene dos formatos de configuración según sus cables. En la Figura 20, se muestran los dos tipos de configuración que puede implementar en el motor, la primera corresponde al método de alto Torque y la segunda al método de alta velocidad.

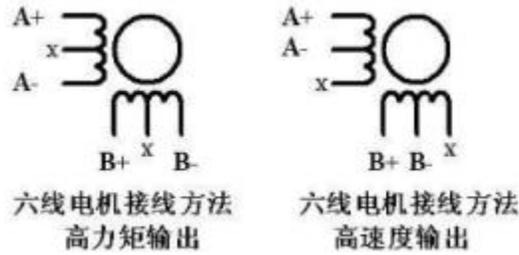


Figura 20 Modos de operación del motor.

Se escoge la conexión de alto torque ya que permite un menor funcionamiento alas hora de la extrusión del filamento, por otro lado, el controlador del motor de la máquina puede ser configurado con las conexiones de Ánodo común y Cátodo común. En la Figura 21 se muestra el montaje del esquema del ánodo común montado en el prototipo sacado del datasheet [16] del proveedor.

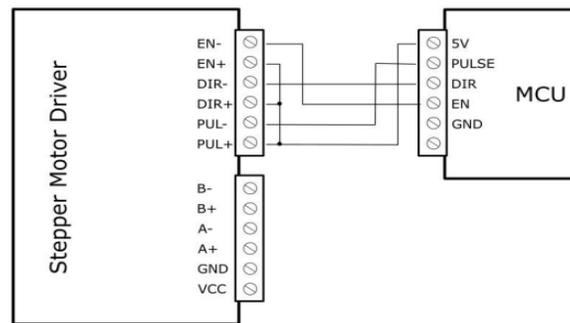


Figura 21 Ánodo común.

El controlador del motor tiene tres señales que son activadas dentro del microcontrolador para hacer funcionar correctamente el motor. El pin EN habilita el paso de corriente del motor, el pin DIR determina el sentido de giro del motor según sea 1 o 0 la señal, por último, tenemos el pin PUL encargado de mandar los ciclos de trabajo a las bobinas en el motor. Para este tipo de motores es necesario de un ciclo infinito dentro del controlador que constantemente este realizando los pulsos para que el motor funcione de manera cíclica y eficientemente. En la Figura 22 se muestra el diagrama de flujo del programa dentro del microcontrolador, con las señales que garantizaron los funcionamientos correctos del prototipo.

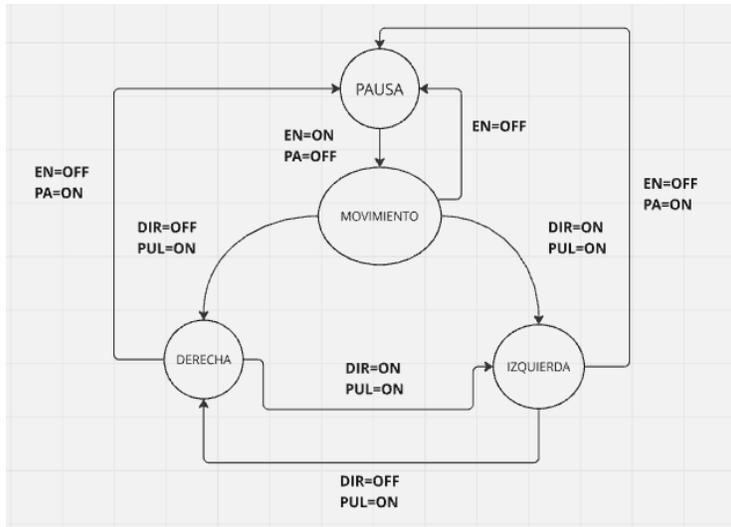


Figura 22 Flujo de control de motor.

El microcontrolador solo controla las señales de comando del T6600 para determinar la dirección de giro y los tiempos de sincronización de las señales, pero es el controlador quien determina la cantidad de potencia o la velocidad de giro del motor a través de un sistema de suiches con el que viene capacitado el controlador. En la Tabla 9 y Tabla 10 se observan los métodos de trabajo del controlador.

Tabla 9 Suiches de configuración de paso.

Micro Step	Pulse/Rev	S1	S2	S3
NC	NC	ON	ON	ON
1	200	ON	ON	OFF
2/A	400	ON	OFF	ON
2/B	400	OFF	ON	ON
4	800	ON	OFF	OFF
8	1600	OFF	ON	OFF
16	3200	OFF	OFF	ON
32	6400	OFF	OFF	OFF

Los primeros 3 suiches corresponden a la velocidad del motor, si todos están en off el tamaño de paso del motor será de 32, si el tercer suiche es prendido y los otros dos están en off, el tamaño de paso será configurado a 16 y así de forma parecida con las demás adecuaciones del controlador.

Tabla 10 Suiches de configuración de corriente.

Current (A)	S4	S5	S6
0.5	ON	ON	ON
1.0	ON	OFF	ON
1.5	ON	ON	OFF
2.0	ON	OFF	OFF
2.5	OFF	ON	ON
2.8	OFF	OFF	ON
3.0	OFF	ON	OFF
3.5	OFF	OFF	OFF

Los 3 últimos suiches del controlador corresponden a la potencia suministrada al motor, donde todos los suiches en off configuran el controlador para que tenga la máxima salida de corriente de 3.5 A, mientras que todos los suiches en on corresponde a la menor cantidad de corriente suministrada al motor 0.5 A. Por último, en la Figura 23 se muestra el módulo realizado para el control del motor.

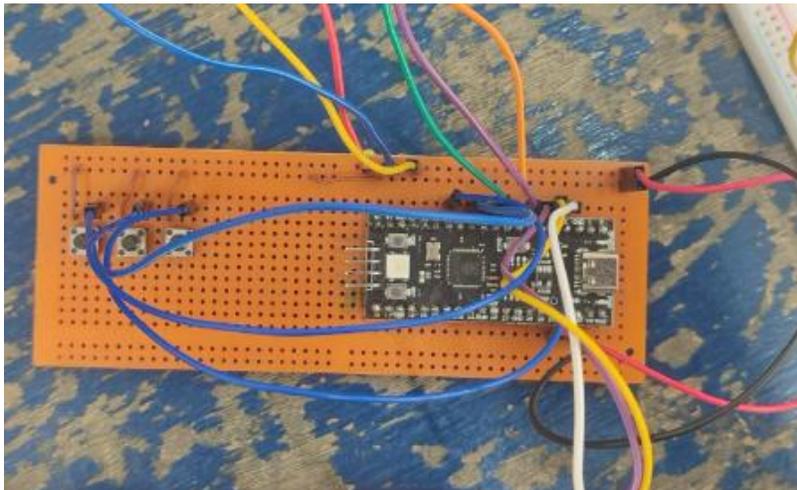


Figura 23 Circuito de control de motor.

Este tipo de controladores comerciales facilitan la creación de prototipos a través de módulos electrónicos fácilmente replicables, lo que agiliza la construcción y materialización de productos sin la necesidad realizar el controlador desde cero.

5.7.2. Control Temperatura

Para la implementación de control de temperatura se realizó el desarrollo de un controlador digital PID discreto que ayudó con el control de suministro de potencia necesaria para controlar la temperatura. En el manejo de temperatura se necesitó de un sistema de variación de potencia que fuera fácilmente controlado por la Raspberry Pi Pico. Para esto fue necesario de dos módulos electrónicos que en conjunto realizan la acción de control, el primero módulo corresponde a el

cruce por cero y el segundo módulo corresponde a un disparo de triac que puede tener control de la variable de potencia de la temperatura entre un rango de 0 a 100% por medio del microcontrolador. En la Figura 24 se muestra el esquema del circuito realizado en el programa de proteus para la validación del cruce por cero.

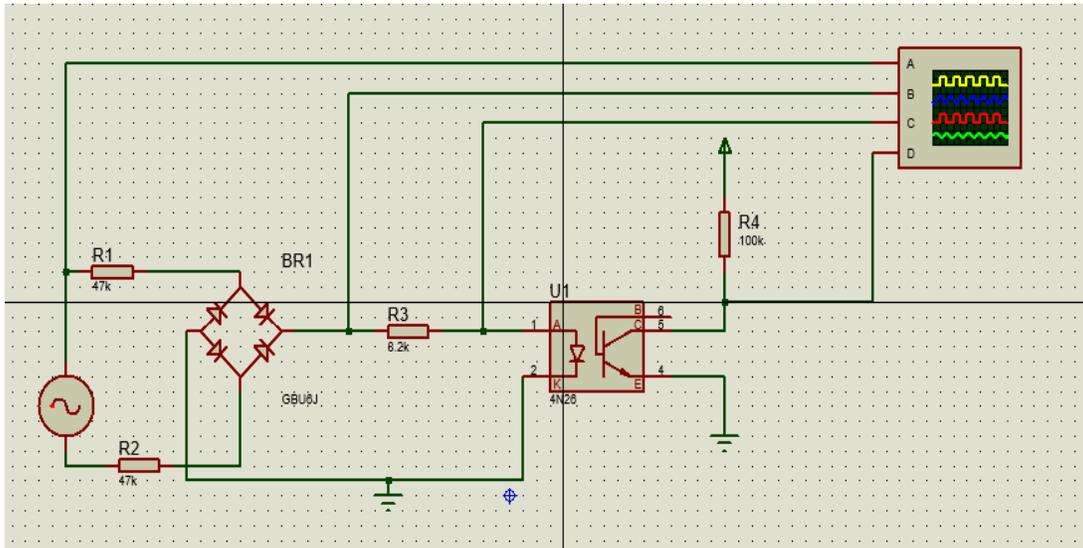


Figura 24 Cruce por cero en Proteus.

En el software se revisan las señales por medio del osciloscopio donde se observan las formas de onda de las señales más importantes. En la Figura 25, en color amarillo se observa la señal domiciliar de 110 v de nuestras casas, en color azul se observa la señal rectificada a la salida del puente y por último se observa en verde los pulsos del optoacoplador en cada cruce por cero de la señal original.

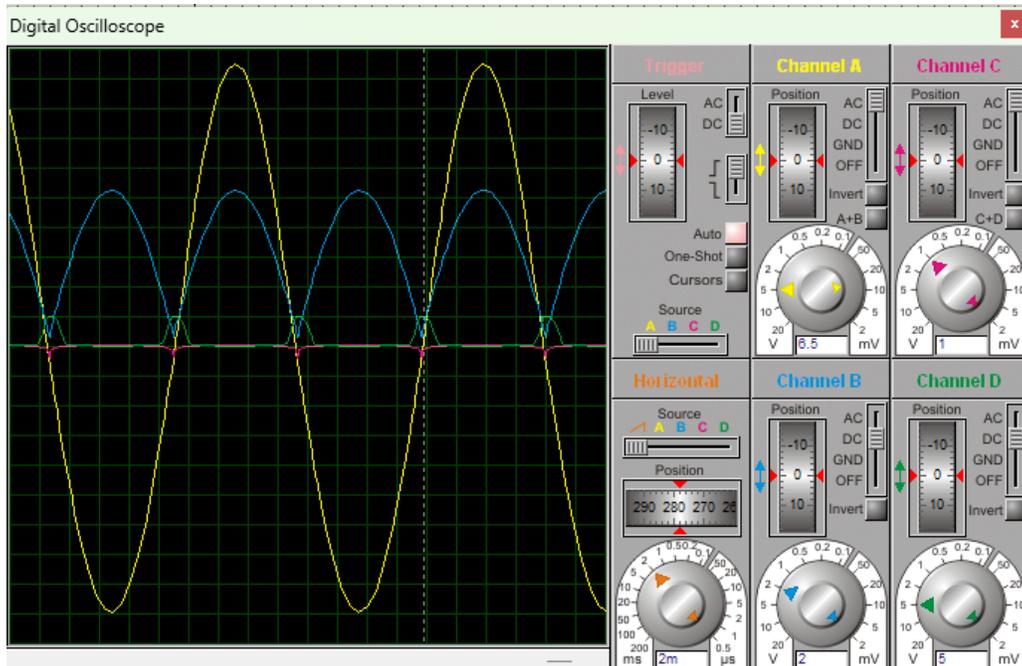


Figura 25 Señales del osciloscopio.

La salida del cruce por cero es conectada al microcontrolador para que en el momento del cruce por cero se toma una variable de tiempo que es finalizada al siguiente cruce por cero, esta variable es guardada para determinar el límite de tiempo apertura de potencia. En la Figura 26 se muestra el periodo completo de una onda sinusoidal.

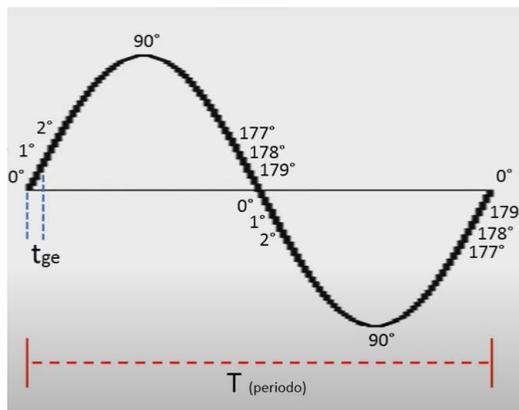


Figura 26 Señal sinusoidal.

Donde t_{ge} es el tiempo de disparo para cada grado y T es el periodo completo de un ciclo de la señal sinusoidal, también se observa que los grados de la onda van de 0° a 179° hasta el cruce por cero y luego vuelve y se repite la onda para un total de 360° . El disparo del triac lo que ajusta es el ángulo de disparo de la onda sinusoidal. En la Figura 27 se muestra un ejemplo más práctico del

disparo, el circuito del disparo por triac mostrado en la metodología implementa el disparo, pero es el microcontrolador quien decide cuando activar o desactivar ese disparo para dar paso de potencia a la pieza calefactora.

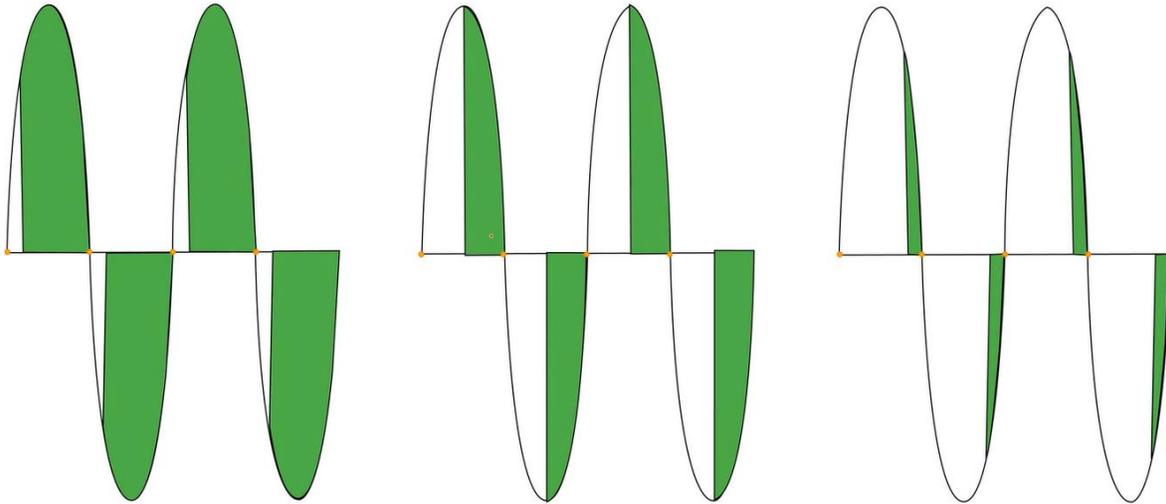


Figura 27 Diagrama de diferentes disparos de onda.

Para el cálculo del tiempo por cada grado y el periodo se sabe que la señal sinusoidal de la red domiciliaria tiene los valores de $127V_{rms}/60$ hz.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0.016666 \text{ s} = 16.666 \text{ ms}$$

$$t_{ge} = \frac{0.016666}{360} = 46.297 \text{ us}$$

Por lo tanto, si tomamos los límites de los grados entre dos cruces por cero ($0,180^\circ$) y lo transformamos a tiempo de disparo del triac, obtenemos (0, 8333 us), aproximadamente. El controlador PID constantemente está chequeando la temperatura del sensor y en base a esos valores la acción de control $u(k)$ va a ir variando su salida de acuerdo a qué tan cerca este de la temperatura deseada. Por medio del microcontrolador se adecua la señal del disparo del triac a la salida de la señal $u(k)$ para que cuando el valor sea cercano a 0 el triac dispare de tal forma que la pieza calefactora no reciba potencia de la onda sinusoidal, caso contrario a si la temperatura deseada está por encima de la lectura obtenida y la señal $u(k)$ toma valores grandes, el microcontrolador transforma esta información a un disparo de triac que entregue la mayor cantidad de potencia para

que la pieza calefactora alcance los valores de temperatura deseados. A continuación, en la Figura 28 se presenta el diagrama de flujo realizado en el microcontrolador para realizar el control de temperatura.

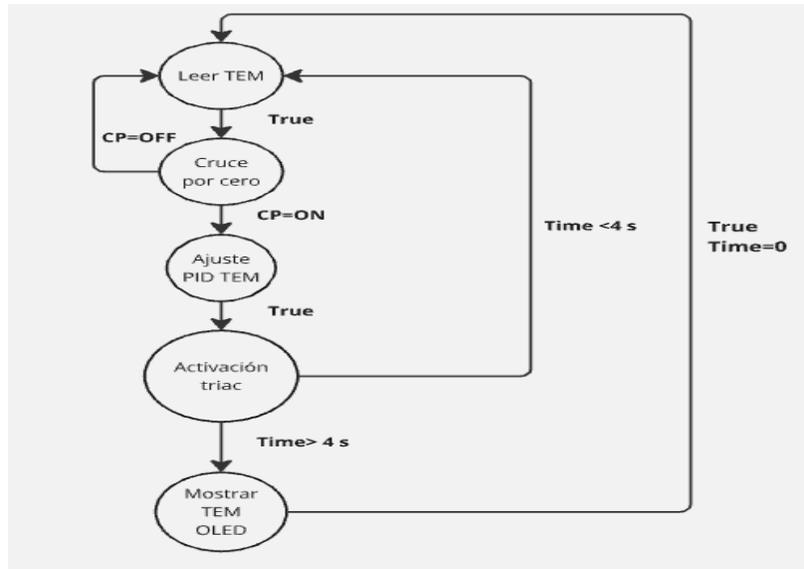


Figura 28 Flujo de control de temperatura.

Se muestra en la Figura 29 el montaje realizado para el prototipo de la extrusora del control de temperatura.

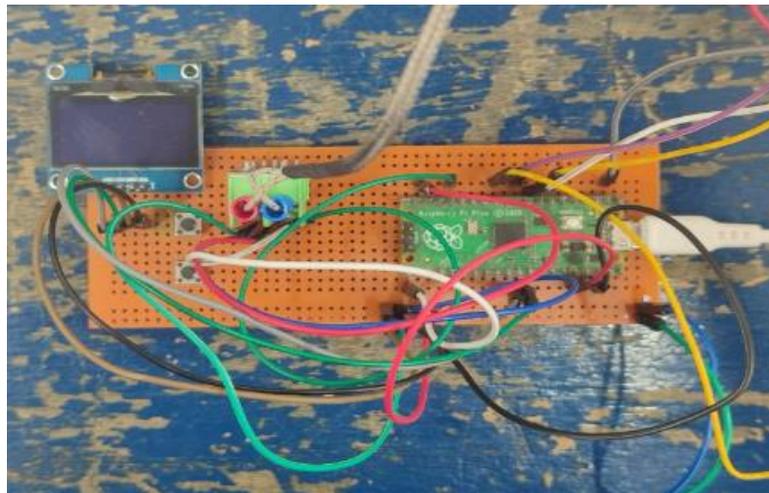


Figura 29 Circuito de control de temperatura.

Para el cálculo de las variables necesarias del controlador PID, se desarrolla la metodología propuesta por Ziegler and Nichols de [14], para encontrar las variables proporcional, integral y derivativa. Se procede a realizar una curva de reacción del sistema con los límites previamente establecidos. Se da un porcentaje de apertura al sistema y se muestrean los datos de temperatura

para observar el comportamiento natural del sistema. En la Figura 30 se muestra un ejemplo del proceso a realizar a el prototipo de la máquina de extrusión.

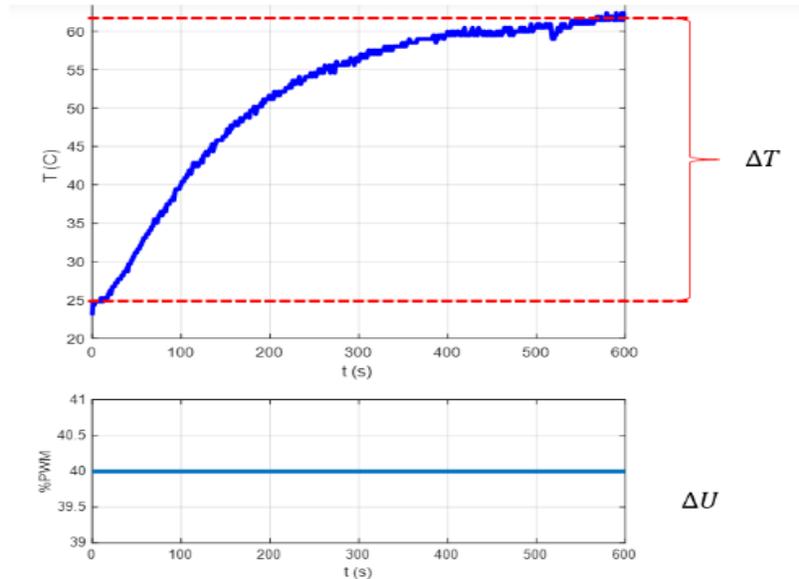


Figura 30 Graficas de método por curva de reacción.

Se da un porcentaje de apertura del 30% al sistema, para eso se multiplica el límite del cruce por cero por 0.3, lo que equivale a un valor de tiempo de 2499 us. Este fue el tiempo del ángulo de disparo del triac lo que equivale a un valor de voltaje de la onda sinusoidal de 83.8Vrms de 127Vrms. En la Figura 31 se muestra la curva de reacción obtenida por medio del programa Matlab, donde se aprecia que la temperatura a un 30% de apertura da un total de 1100 muestras aproximadamente, donde fueron tomadas cada 2 s hasta que el sistema se estabilice.

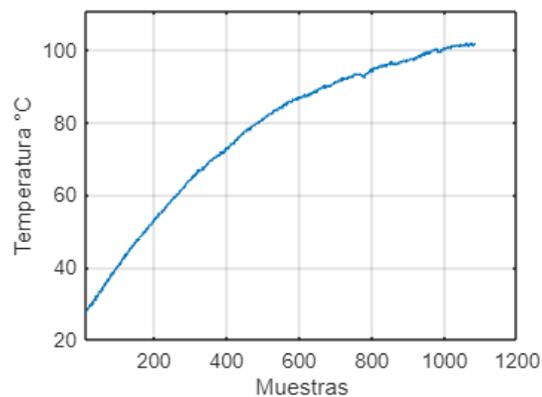


Figura 31 Temperatura del sistema.

Con la curva de reacción obtenida se procede a extraer los valores de las variables para configurar el controlador PID del microcontrolador. Para esto se utiliza el segundo método de los dos métodos propuestos por Ziegler-Nichols:

$$1. T_s < \frac{\theta}{4}$$

$$2. \frac{\tau}{10} < T_s < \frac{\tau}{20}$$

Para encontrar la constante de tiempo τ se debe de conocer el T_{ss} que es el tiempo de establecimiento en donde la temperatura se quedó estable en el sistema de prueba, en nuestro caso la prueba le tomo un valor de 1083 muestras hasta ser estable:

$$\tau = \frac{T_{ss}}{4} = \frac{1083}{4} = 270$$

Tomamos el valor más alto que puede tomar el tiempo de muestreo para controlador PID y se obtiene que:

$$T_s = \frac{270}{20} = 13.5 \text{ s}$$

Con el valor de τ y de tiempo de muestreo encontrados, se procede a completar los valores que son sacados de la curva de reacción para encontrar la función de transferencia que mejor se adapta al sistema.

$$K = \frac{T_f - T_i}{U_f - U_i} = \frac{101 - 26}{30 - 0} = 2.5$$

Luego se halla el retardo L desde la gráfica de reacción con un ZOOM para encontrar los tiempos en que el sistema reacciona completamente. En la Figura 32 se muestra el zoom realizado a la curva de reacción, ahí se puede apreciar que el sistema presenta un retardo de alrededor de 8 a 10 muestras para que reaccione y la temperatura empiece a crecer.

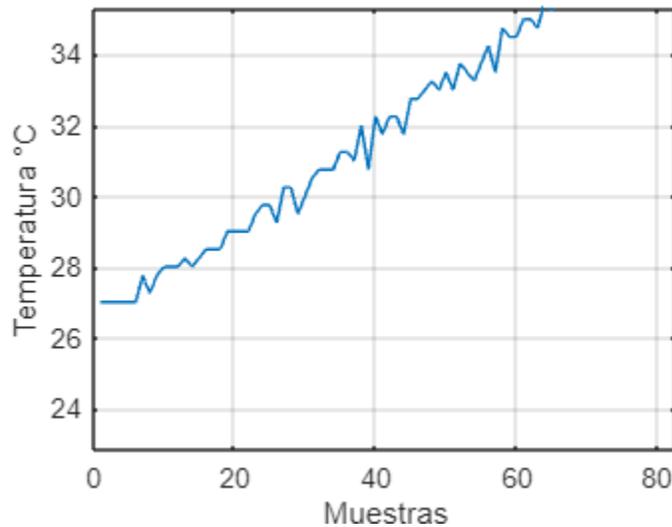


Figura 32 ZOOM a temperatura del sistema.

Hallados los valores de K , τ y L del sistema, se procede a elaborar la ecuación de la función de transferencia para observar cual sería el comportamiento de nuestro sistema por medio de una función de transferencia aplicando un sistema de primero orden. En la Figura 33 se observa la curva obtenida a la función de transferencia.

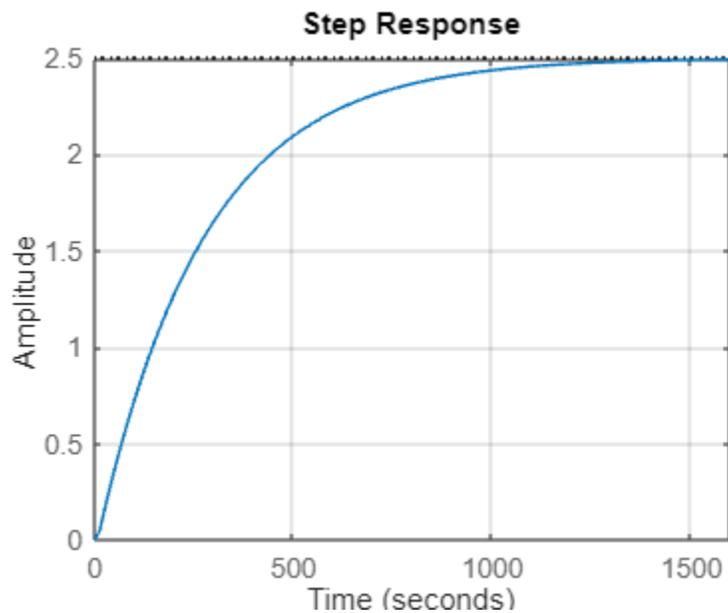


Figura 33 Función de transferencia.

La función de transferencia de primer orden adecuada al sistema con los valores encontrados es:

$$G = \frac{K * e^{-L*s}}{\tau * s + 1} = \frac{2.5 * e^{-9*s}}{270 * s + 1}$$

Como podemos observar de la Figura 33, a este tipo de sistemas le toma muchas muestras llegar al tiempo de estabilización lo que indica que son sistemas lentos a las variaciones del sistema. De esto se puede decir que a la curva de reacción le hicieron falta mayores muestras para poder decidir que el sistema se estabilizaba en un valor de temperatura exacto. Se procede a calcular las variables del controlador K_p , T_i y T_d con la Tabla 11 propuesta por Ziegler and Nichols.

Tabla 11 Métodos de Ziegler y Nichols,

Controlador	K_p	τ_i	τ_d
<i>P</i>	$\frac{\tau}{K\theta}$	—	—
<i>PI</i>	$\frac{0,9\tau}{K\theta}$	3.33θ	—
<i>PID</i>	$\frac{1,2\tau}{K\theta}$	2θ	0.5θ

$$K_p = \frac{1.2 * \tau}{K\theta} = \frac{1.2 * 270}{2.5 * 54} = 2.4$$

$$K_i = 2\theta = 2 * 54 = 108$$

$$K_d = 0.5\theta = 0.5 * 54 = 27$$

Como los valores del controlador los tomamos en un rango de 0 a 100, dividimos los valores encontrados por ese valor para que se adecue a el control del sistema planteado. El sistema de temperatura resulto ser un poco demorado, pero los niveles de temperatura y el control obtenidos mediante los procesos de extrusión de filamento resultaron satisfactorios. Las pruebas del controlador fueron realizadas entre alrededor de los 50° y 250° C, aun sin encontrar la temperatura máxima a la que puede llegar la pieza calefactora ya que las pruebas nunca lo requirieron.

5.7.3. Control Enfriamiento

Para la implementación de la fase de control de enfriamiento se realizó un módulo de refrigeración por medio de agua, este módulo se implementa de forma no sincronizada con las demás fases, sino que tiene un flujo constante que no varía. Para la fase se desarrolló un sistema que consta de un depósito con agua donde caerá el filamento, haciéndolo enfriar y que se solidifique más rápido.

Una bomba conectada a el área de enfriamiento con el depósito, lo que hace que el agua circule cuando el material es transportado lo que enfría el material. En la Figura 34 vemos el sistema electrónico implementado para el control.

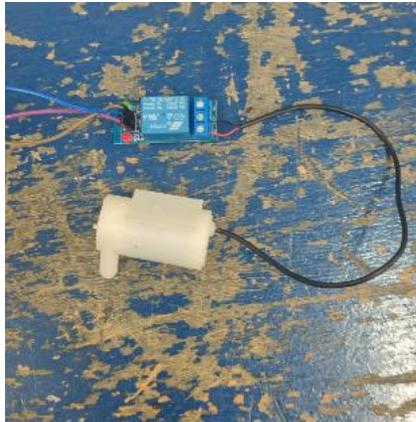


Figura 34 Control de bomba.

5.7.4. Control Transporte

Para la implementación del control del transporte se desarrolló un módulo mecánico y electrónico que obtiene el filamento extruido y lo transporta desde la fase de moldeado, luego a la fase de enfriamiento y por último a la parte final de enrollamiento del material. Este prototipo fue diseñado como un módulo aparte que pudiera ser sincronizado con las salidas de las demás fases para obtener un filamento de buena calidad. Para esto se implementó un movimiento de motor que se adapta a un sistema de engranajes que hace que enrolle el material, el movimiento del motor será controlado por un potenciómetro que hará variar la velocidad de giro del motor, lo cual hará que enrolle el material más rápido o lento. Esto garantizara que la velocidad de giro no afecte el proceso del filamento aplicándole esfuerzos a el material que pueden afectar su calidad. En la Figura 35 vemos el sistema electrónico implementado para el control.

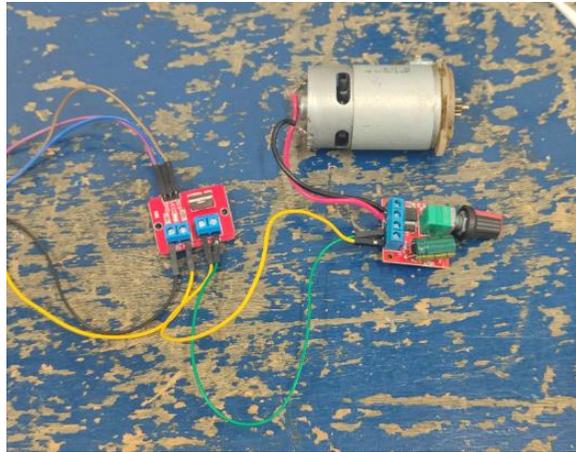


Figura 35 Control de motor de transporte.

5.8. Cualificación de los filamentos extruidos

En este apartado se caracteriza los resultados obtenidos, tanto de la parte mecánica y funcional de la máquina como la caracterización del material conseguido para las impresoras 3D.

5.8.1. Caracterización de la máquina

Para la caracterización de la maquina se realizó una tabla para chequear el funcionamiento de esta a través de pruebas con diferentes tipos de materiales, encontrando si la máquina es apta para que funcione o no. La Tabla 12 se muestran los resultados respecta a el movimiento del motor para que sea capaz de funcionar sin atascos, de esa forma se encuentra la manera óptima para que el material extruya.

Tabla 12 Caracterización de maquina extrusora,

Temperatura(C)	Tipo de material	Paso de motor	Corriente del controlador	Aprobado/No aprobado
160°	PLA	32	0.5 A	Aprobado
150°	PLA	32	0.5 A	No aprobado
135°	PLA	32	1.0 A	Aprobado
125°	PLA	32	1.0 A	No aprobado
130°	PLA	16	0.5 A	Aprobado
120°	PLA	16	0.5 A	No aprobado
120°	PLA	16	1.0 A	Aprobado
110°	PLA	16	1.0 A	No aprobado
110°	PLA	8	0.5 A	Aprobado
105°	PLA	8	0.5 A	No aprobado
105°	PLA	8	1.0 A	Aprobado
95°	PLA	8	1.0 A	No aprobado

90°	PLA	4	0.5 A	Aprobado
85°	PLA	4	0.5 A	No aprobado
90°	PLA	4	1.0 A	Aprobado
80°	PLA	4	1.0 A	No aprobado
230°	PET	32	0.5 A	Aprobado
220°	PET	32	0.5 A	No aprobado
220°	PET	32	1.0 A	Aprobado
205°	PET	32	1.0 A	No aprobado
210°	PET	16	0.5 A	Aprobado
200°	PET	16	0.5A	No aprobado
200°	PET	16	1.0 A	Aprobado
190°	PET	16	1.0 A	No Aprobado
185°	PET	8	0.5 A	Aprobado
180°	PET	8	0.5 A	No aprobado
180°	PET	8	1.0 A	Aprobado
165°	PET	8	1.0 A	No aprobado
170°	PET	4	0.5 A	Aprobado
160°	PET	4	0.5 A	No aprobado
160°	PET	4	1.0 A	Aprobado
145°	PET	4	1.0 A	No aprobado

Durante el análisis de las pruebas realizadas para caracterizar el funcionamiento de la máquina, se observó que el sobrecalentamiento del controlador TB6600 fue un factor determinante en la estabilidad del sistema. Aumentar la corriente por encima de 1 A, con el objetivo de incrementar el torque, resultó en un sobrecalentamiento que desencadenaba el apagado automático del controlador. Esto se debe a las configuraciones internas del TB6600, que están diseñadas para evitar daños por exceso de temperatura. El sobrecalentamiento no solo compromete el funcionamiento inmediato del sistema, sino que podría generar daños a largo plazo en los componentes electrónicos, lo que sugiere la necesidad de considerar mejoras como una mejor ventilación o el uso de disipadores de calor para mitigar este problema.

En cuanto a la relación entre la velocidad del motor y la calidad del producto extruido, se determinó que, a mayor velocidad del motor, se podían realizar mejores pruebas de extrusión. Sin embargo, es necesario profundizar en cómo esta mayor velocidad afecta la uniformidad y calidad del filamento. Si bien la velocidad permite una mayor productividad, es importante identificar si existe un punto de inflexión a partir del cual la calidad del filamento comienza a deteriorarse debido a la falta de control sobre la extrusión.

Las configuraciones de paso del motor también mostraron diferencias significativas. Las pruebas indicaron que los pasos de 4 y 8 fueron los que mejor se adaptaron al proceso de extrusión, mientras

que otras configuraciones presentaron atascos después de cierto tiempo de funcionamiento. Esto puede estar relacionado con la precisión y estabilidad que brindan las configuraciones de menor paso en comparación con aquellas de mayor resolución, que pueden aumentar la fricción interna y dificultar el transporte del polímero. Aunque se observó un aumento de temperatura en las configuraciones que presentaban atascos, este aumento no resultó en una mejora en la calidad del producto final, lo que indica que la temperatura no es el único factor crítico en el proceso.

El impacto de la temperatura en el proceso es evidente, ya que configuraciones que alcanzaron mayores temperaturas no necesariamente generaron mejores resultados. Identificar la temperatura límite a partir de la cual el sistema comienza a fallar resulta fundamental, ya que el comportamiento del polímero y su viscosidad están estrechamente relacionados con este parámetro. Esto sugiere que la optimización del sistema debe considerar tanto las condiciones de temperatura como las características del material extruido.

Finalmente, es importante reflexionar sobre la extrapolación de estos resultados a otros materiales o condiciones operativas. Las conclusiones obtenidas son válidas dentro del marco de las pruebas realizadas, pero es necesario evaluar si estas configuraciones y parámetros pueden ser aplicables a otros escenarios. Además, se sugiere la exploración de mejoras en la refrigeración del controlador y la posibilidad de utilizar un motor de mayor capacidad, que soporte corrientes más altas sin riesgo de sobrecalentamiento, como posibles caminos hacia la optimización del sistema.

5.8.2. Cualificación del filamento

Para la cualificación del material obtenido por la máquina, se tuvieron las consideraciones estándar del filamento 3D. El diámetro conseguido para este tipo de material es de aproximadamente 1.75 mm de diámetro y para conseguir la tabla de caracterización de la materia prima, se realizaron pruebas a dos tipos de material.

1. PLA
2. PET

En la Figura 36 se muestra el material de PLA molido conseguido para sacar material de filamento, este fue obtenido por medio de piezas defectuosas o soporte de piezas de trabajos pasados en el laboratorio.



Figura 36 Muestra de PLA molido

En la Figura 37 se muestra el material molido de PET obtenido para sacar el filamento, este fue conseguido por medio de botellas de refrescos conseguidas por reciclaje.



Figura 37 Muestras de PET molido

Las pruebas para la extracción de filamento de la máquina fueron realizadas con una velocidad de paso de motor de 8 y 4. Con una configuración de paso de 4, un corriente de 1A y una temperatura de extracción de (130°,150°), y se obtuvieron los resultados de Figura 38.



Figura 38 PLA extruido

Para estas pruebas se obtuvieron resultados no satisfactorios en el proceso de extrusión, ya que el material conseguido no conservaba una uniformidad en la salida de la pieza de calentamiento lo que no garantizaba un diámetro idóneo para ser impreso. En la Figura 39 se evidencia de una manera más clara los resultados obtenidos.



Figura 39 ZOOM muestras PLA,

Los cambios de color del material son debido a sobrecalentamientos en el proceso, lo que hace que el material tenga coloraciones más oscuras. Las muestras conseguidas no contaban con la flexibilidad deseada, al contrario, debido al calor las piezas se cristalizaba el material y cuando se enfriaba se endurecía más de lo debido. En las muestras obtenidas encontramos problemas de uniformidad en el diámetro, cristalización del material y sobrecalentamientos.

El problema de uniformidad es debido a dos factores, el primero es por no ingresar el material con la mejor fluidez en la tolva, lo que constituye a problemas de diseño y el segundo problema se debe a la poca estabilidad de la máquina bajo las condiciones de trabajo, ya que generan mucho movimiento al chasis lo que desalinea el sistema del tornillo sin fin con la pieza de calentamiento. Estos movimientos permiten que la extrusión del tornillo no sea de manera uniforme y se tenga poco control del material extruido.

Se realizaron más pruebas al material que mejor presento pruebas de extrusión, en este caso el PLA. En la Figura 40 se muestra el filamento conseguido para una configuración de paso de 8, una corriente de 1ª y una temperatura de extracción de (120°,140°). Como se puede observar los filamentos obtenidos fueron insatisfactorios, pero presentaron mejores propiedades que las pruebas anteriores.

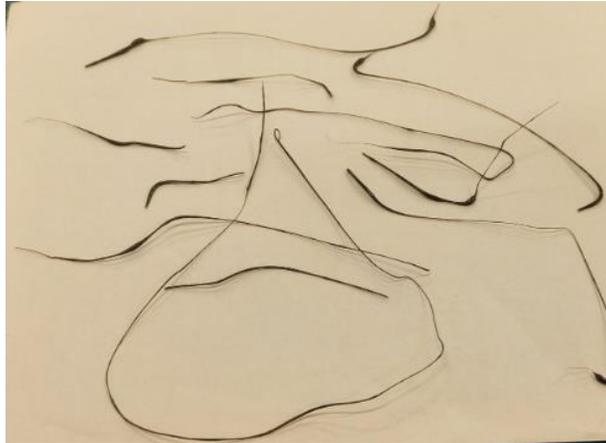


Figura 40 PLA extruido

Para estas configuraciones, el material extruido presentaba mejor flexibilidad, pero continuaba con problemas de uniformidad en la salida de la máquina. En la Figura 41 se hace un acercamiento al filamento para poder evidenciar el problema.

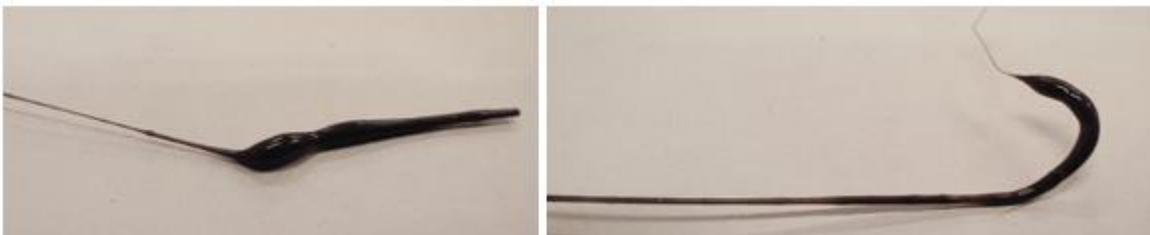


Figura 41 ZOOM muestras PLA

Para estas pruebas que fueron realizadas a una menor velocidad de paso, se pudo conseguir un mayor control sobre el filamento extruido. De igual manera, el filamento obtenido en la prueba no cumple con las características de diámetro estándar de las impresoras 3D, aunque la flexibilidad del material mejoró al reducir la temperatura y los filamentos obtenidos tuvieron mayor longitud los resultados obtenidos, estos siguen sin ser satisfactorios.

Por último, se realizaron las pruebas de extrusión para el material PET reciclado. En la Figura 42 se puede apreciar la materia prima obtenida. Esta extrusión fue realizada con una velocidad de paso de 8, con 1 A de corriente y una temperatura de extracción de (210°,230°).



Figura 42 PET extruido,

Como se puede observar en la imagen, los filamentos obtenidos para este material no son satisfactorios, en la Figura 43 se puede apreciar el material extruido de una mejor manera. Para esta prueba se presentaron mayores problemas tanto en la estabilidad de la máquina, como en las temperaturas. Como el polímero requiere mayores temperaturas para ser moldeado, los cambios pequeños en la temperatura hacían que el material pasara de un estado sólido a líquido muy fácil. Otro problema encontrado en las pruebas fue que la broca en movimiento hace que la temperatura varíe y es mucho más evidente a temperaturas altas. Lo que permitió que fuera difícil encontrar una temperatura adecuada de extrusión en este tipo de material. El material conseguido presentó los mismos problemas antes mencionados de uniformidad y cristalización.



Figura 43 ZOOM muestras PET

Las siguientes recomendaciones buscan mejorar la calidad y la estabilidad del proceso de extrusión, asegurando que el material extruido tenga mejores propiedades físicas y se garantice la continuidad del proceso.

-
1. **Mejora del chasis para mayor estabilidad:** Es fundamental rediseñar las piezas del chasis de la máquina, ya que esto contribuirá a una mayor estabilidad del sistema durante la operación. Actualmente, uno de los problemas observados es que el tornillo sin fin puede quedar descentrado cuando está en movimiento o si el material se acumula y lo desplaza hacia las paredes de la pieza calefactora. Al mejorar la estructura del chasis, se minimizará el riesgo de que el tornillo se desplace, lo que reducirá la fricción no deseada y mejorará la uniformidad del material extruido. Un chasis robusto y bien alineado garantizará un transporte del material más consistente.
 2. **Implementación de un sistema de enfriamiento:** Dado que el controlador del sistema no puede mantener una temperatura estable debido a la falta de un sistema de enfriamiento adecuado, es crucial implementar una solución de refrigeración. Durante las pruebas, se observó que la temperatura tenía una oscilación de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ cuando intentaba estabilizarse, lo que impacta directamente en las propiedades del material extruido. Un sistema de enfriamiento permitirá mantener la temperatura dentro de un rango más estrecho, lo que mejorará la calidad del filamento y reducirá los defectos causados por fluctuaciones térmicas.
 3. **Precisión en las dimensiones del tornillo sin fin y la pieza calefactora:** Es esencial garantizar que tanto el tornillo sin fin como la pieza calefactora tengan dimensiones exactas y una precisión milimétrica. Cualquier desviación en las dimensiones puede crear espacios no deseados por donde el material podría devolverse en lugar de avanzar continuamente hacia la extrusión. Esto interrumpe el flujo del material y compromete la calidad del filamento. Al asegurar una mayor precisión en las dimensiones, se evitarán estos problemas y se promoverá una extrusión más continua y eficiente.
 4. **Mejora del efector final para una mejor uniformidad del filamento:** El diseño del efector final de la máquina también necesita mejoras, ya que su forma actual no mantiene el filamento en su forma adecuada durante suficiente tiempo. Un efector más optimizado permitiría que el material extruido mantuviera mejor su forma mientras se enfría, lo que resultaría en un filamento más uniforme y de mayor calidad. Este ajuste será crucial para garantizar que el filamento conserve las propiedades geométricas necesarias para su posterior uso.

-
5. **Pruebas a menor temperatura para mejorar la cristalización del material:** Otra recomendación es realizar pruebas a temperaturas más bajas para promover una mejor cristalización del material extruido. Las pruebas actuales indican que el aumento de la temperatura no siempre mejora la calidad del material final; al contrario, una temperatura más controlada y baja puede favorecer el proceso de cristalización, mejorando las propiedades mecánicas del filamento.
 6. **Configuraciones de corriente más altas para aumentar el torque:** El aumento de la corriente en el motor permitirá un mayor torque, lo que facilitará la extrusión del material a velocidades más altas o con materiales más densos. Aunque se ha identificado que una corriente superior a 1A genera sobrecalentamiento en el controlador, con las mejoras en el sistema de refrigeración, se podría optimizar esta configuración sin comprometer la integridad del equipo, mejorando la fuerza de extrusión y la capacidad del sistema para manejar materiales más exigentes.
 7. **Uso de aditivos como glicerina para mayor flexibilidad:** Finalmente, la incorporación de aditivos como la glicerina al material extruido puede ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades de flexibilidad del filamento. Dado que algunos materiales tienden a ser demasiado rígidos tras la extrusión, el uso de aditivos permitirá obtener un filamento más flexible, lo que ampliaría las aplicaciones del producto final y mejoraría su durabilidad.

Estas recomendaciones, al implementarse de manera integral, contribuirán a la optimización del proceso de extrusión, mejorando tanto la calidad del material obtenido como la eficiencia operativa del sistema.

VII. CONCLUSIONES

- La sincronización de la señal sinusoidal en corriente alterna en el control de potencia es crucial para garantizar un suministro eficiente de energía a la pieza calefactora en el prototipo. Esta sincronización permite ajustar con precisión la cantidad de potencia suministrada lo que facilita significativamente el control del sistema. Al utilizar detección de cruce por cero, se logra una regulación más eficiente y estable de temperatura, mejorando el rendimiento y la seguridad del dispositivo, lo que resulta en una mayor eficiencia en el proceso de calefacción y una mejor gestión del consumo energético
- Es fundamental lograr una alineación precisa entre las piezas de calentamiento y el eje del motor, ya que cualquier acumulación de material en estado frío puede afectar la estabilidad del motor. Esto provoca que el eje gire de manera irregular, generando impactos contra las paredes de la pieza calefactora y descentrando el tornillo sin fin. Como resultado, se compromete la uniformidad en la extrusión, lo que afecta la calidad del producto final. Una correcta alineación asegura un flujo constante y estable, mejorando el rendimiento general del sistema
- La variable T_s en el controlador PID, que representa el tiempo de muestreo, es clave para garantizar un funcionamiento eficiente del controlador. Aunque otras variables también influyen en el proceso, es T_s quien determina en gran medida el desempeño del sistema. Un tiempo de muestreo adecuado permite que el microcontrolador procese de manera más precisa las variaciones en la temperatura, lo que optimiza la respuesta del controlador PID y mejora la estabilidad y el control sobre el sistema térmico.
- En la integración de los sistemas electrónicos con los componentes mecánicos, fue necesario emplear módulos dentro del microcontrolador que gestionaran de manera precisa los tiempos de retardo y los procesos de seguridad. Estos módulos fueron esenciales para garantizar un control eficiente y seguro de la máquina de extrusión, permitiendo una coordinación efectiva entre los ciclos de calentamiento, el movimiento mecánico y la extrusión del material. La correcta implementación de estos módulos asegura un funcionamiento estable y confiable del sistema.
- Uno de los factores clave en el diseño del sistema es la estabilidad del chasis. Para garantizar esta estabilidad, fue necesario implementar un sistema de nivelación del motor que permitiera alinear y organizar correctamente los ejes de linealidad. Esto no solo asegura un

funcionamiento más preciso y estable, sino que también proporciona una variable de altura ajustable dentro del sistema. La capacidad de modificar esta variable mejora la adaptabilidad y precisión del prototipo, contribuyendo a un control más eficiente y a la durabilidad de los componentes mecánicos.

- En conclusión, el análisis de la caracterización del sistema de extrusión ha revelado varios aspectos clave que deben ser mejorados para optimizar tanto la calidad del material obtenido como la estabilidad del proceso. En primer lugar, la mejora del chasis es fundamental para garantizar que el tornillo sin fin mantenga una alineación precisa, lo que evitará desajustes durante la operación y garantizará un flujo continuo del material. Asimismo, la implementación de un sistema de enfriamiento es crítica para mantener la temperatura del sistema dentro de un rango estable, ya que las oscilaciones observadas afectan directamente la calidad del filamento.
- También se destacó la importancia de la precisión milimétrica en las dimensiones del tornillo sin fin y la pieza calefactora. Esta precisión garantizará que no existan espacios por donde el material pueda retroceder, lo que mejorará la continuidad de la extrusión y evitará bloqueos en el sistema. Además, el rediseño del efector final permitirá que el filamento mantenga su forma durante un tiempo adecuado, mejorando así su uniformidad y calidad final.
- Las pruebas realizadas también sugieren que trabajar a temperaturas más bajas podría mejorar la cristalización del material extruido, lo que fortalecería las propiedades mecánicas del filamento. Asimismo, se debe considerar la posibilidad de aumentar la corriente del motor para obtener un mayor torque, siempre que se implementen soluciones de enfriamiento adecuadas para evitar el sobrecalentamiento del controlador. Finalmente, la adición de aditivos como la glicerina puede ser una estrategia efectiva para mejorar la flexibilidad del filamento, ampliando las aplicaciones del producto final.

VIII. REFERENCIAS

- [1] M. A. Vazquez, V. R. Espinosa, V. Beltran y V. P. M, «El reciclaje de los plasticos,» 2021. [En línea]. Available: <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2021/01/reciclajeplasticosuam.pdf>.
- [2] T. d. p. B. M y M. A, «Extrusión,» [En línea]. Available: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf.
- [3] FYchTEchno, «¿Que plasticos son reciclables?,» [En línea]. Available: <https://www.fychtech.com/que-plasticos-son-reciclables/>.
- [4] Mexpolimeros, «Procesos de reciclaje,» [En línea]. Available: <https://www.mexpolimeros.com/reciclaje.html>.
- [5] RAMETC, «Antecedentes de la extrusión,» [En línea]. Available: <https://ramtec.com.mx/antecedentes-de-la-extrusion/>.
- [6] M. O. Cutipa y R. F. E, «Diseño de extrusora para la fabricacion de filamento a base de polimeros termoplásticos utilizados en el Fab Lab de la universidad Continental Arequipa,» 2020. [En línea]. Available: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9058/4/IV_FIN_111_TI_Cutipa_Rodriguez_2020.pdf.
- [7] T. D. PLÁSTICOS, «Guía sobre el PET: propiedades, producción y aplicaciones,» [En línea]. Available: <https://www.plastico.com/es/noticias/guia-sobre-el-pet-propiedades-produccion-y-aplicaciones>.
- [8] METALMECÁNICA, «La manufactura adictiva,» [En línea]. Available: <https://www.metalmecanica.com/es/noticias/manufactura-aditiva-la-tecnologia-que-esta-transformando-la-produccion>.
- [9] Ineo, «Moldeado por deposición fundida (FDM),» [En línea]. Available: <https://www.ineo.es/es/tecnologias/modelado-deposicion-fundida-fdm#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20modelado%20por,con%20temperatura%20y%20ambiente%20controlados..>
- [10] P. T. México, «Extrusión de plásticos: proceso, maquinas extrusoras y aplicaciones,» [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/articulos/extrusion-de-plasticos-proceso-maquinas-extrusoras-y-aplicaciones>.
- [11] E. G. Ramos y L. G. G, «Diseño e implementacion de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas,» 2019. [En línea]. Available: <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/84b1c038-1399-4fed-8a0a-d6c86cab725e/content>.
- [12] OMEGA, «Controladores de temperatura,» [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura.html>.
- [13] Picuino, «Controlador PID,» [En línea]. Available: <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>.
- [14] C. a. educación, «Controladores PID discretos,» [En línea]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/controladores-pid-discreto/>.
- [15] C. a. educación, «Sistemas dinamicos de primer orden,» [En línea]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/sistemas-dinamicos-de-primer-orden/>.
- [16] FBRobot, «TB6600 Stepper motor driver user guide,» [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1Jk8b9jNrEqzqXWdkZAXq49Rgljci0Gt/view>.
- [17] DFRobot, «TB6600 Stepper motor driver user guide,» [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1Jk8b9jNrEqzqXWdkZAXq49Rgljci0Gt/view>.

IX. ANEXOS

Los códigos y librerías implementados para el desarrollo del proyecto los pueden encontrar en el siguiente enlace:

<https://github.com/mariotabares/Extruder.git>