INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Los filamentos de polímeros son materiales sintéticos comúnmente utilizado en el mercado de las impresiones 3D, siendo la industria medica junto con la dental las principales contribuyentes a su uso, ocupando de un 30 a 35% de todas las aplicaciones que tienen los filamentos para impresión 3D, tales son los usos que se pueden tener del mismo que para esas industrias se pueden nombrar algunos ejemplos como la impresión de prótesis hechas a medida, implantes ortopédicos e instrumentos quirúrgicos (Mordor Intelligence, 2024)

Las variedades de filamentos para impresión 3D más usadas son el Poliácido Láctico (PLA), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Teraftalato de polietileno modificado con glicol (PETG).

En cuanto al tamaño del mercado mundial de filamentos de impresión 3D de todos los tipos se tiene que fue de 760 millones de dólares en 2023 y se espera que aumente anualmente un 19,48% llegando a los 2,21 mil millones de dólares en 2029. Por otra parte, los principales fabricantes de estos filamentos son de Estados Unidos, con fábricas como Stratasys Ltd, que se especializan en la fabricación de impresoras 3D y materiales para la fabricación aditiva de polímeros, también se tiene a países como Alemania con fábricas como BASF SE y Evonik Industries AG siendo la segunda empresa de químicos más grande de Alemania, finalmente otros productores de filamento son provenientes de Arabia Saudita y Japón con industrias como la Mitsubishi Chemical Corporation. (Mordor Intelligence, 2024)

En general el mercado de los filamentos 3D en todas sus variedades es ocupado en un 45% por Norte América y por un 35% en Europa, esto principalmente ocupado por la fabricación de productos de personalización masiva. (Ambiente Plastico, 2023)

Con respecto a los mercados de filamentos reciclados de polipropileno estos se ubican en países como España o Canadá con proyectos como Recyppowder, que utiliza residuos industriales para fabricar polvos de PP reciclado, y empresas como 3D Fils y

SmartMaterials 3D, que exploran opciones sostenibles con materiales reciclados para aplicaciones de impresión 3D. (Barba, 2024)

En américa latina también se vio un crecimiento en el uso y conocimiento de la impresión 3D, teniendo un mercado con un valor de 419,75 millones en los materiales para la impresión en 2023, entre los cuales están los filamentos de plásticos, cerámicos y también otros materiales utilizados para el proceso que pueden ser líquidos como resinas. (Mordor Intelligence, 2024)

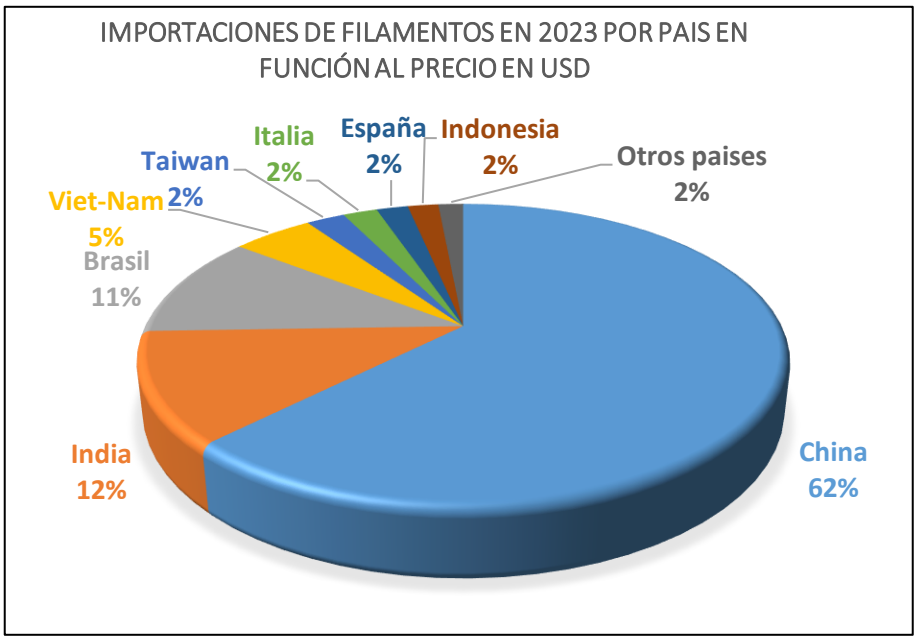
En Bolivia según datos del INE se tiene que las importaciones desde enero a diciembre de 2023 de monofilamentos sintéticos, donde están incluidos los filamentos para impresión 3D excluyendo el hilo de coser, son de 2,1 millones de dólares con un peso neto de 1034 toneladas, siendo China el principal país del cual se importa. Los datos históricos de los valores de precios y cantidad en toneladas importados son los siguientes:

Tabla 0-1. Importaciones de Filamentos sintéticos de Bolivia (incluidos monofilamentos)

Año	Valor en Millones de dólares USD	Peso en toneladas	Variación	
			Valor%	Volumen%
2017	2,028	1340	-	-
2018	2,070	1422	2,11	6,14
2019	1,858	1045	-10,24	-26,51
2020	1,345	838	-27,62	-19,78
2021	1,103	648	-17,99	-22,66
2022	2,155	844	95,40	30,11
2023	2,106	1034	-2,3	22,58

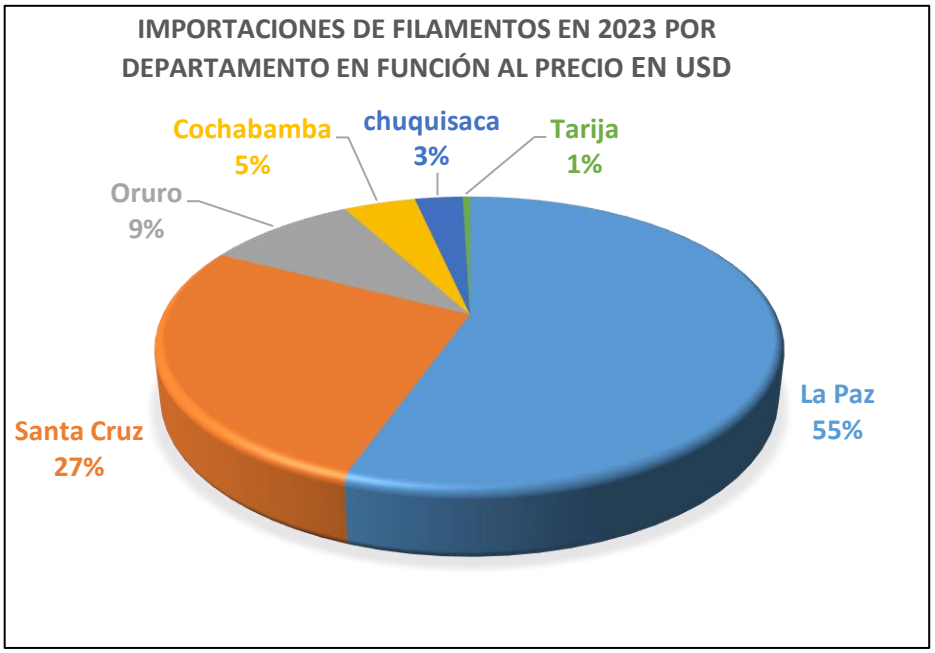
Fuente: (Sistema Integrado de Información Productiva (SIIP), 2023)

Figura 1-1. Importaciones de filamentos en 2023 por país en función al precio en USD



Fuente: (Sistema Integrado de Información Productiva (SIIP), 2023)

Figura 1-2. Importaciones de filamentos en 2023 por DEPARTAMENTO en función al precio en USD



Fuente: (Sistema Integrado de Información Productiva (SIIP), 2023)

En Tarija las importaciones en 2023 llegaron a los 9435 dólares y 4 toneladas de filamentos sintéticos o artificiales. (Sistema Integrado de Información Productiva (SIIP), 2023)

Con respecto al polipropileno se lo puede caracterizar como unos de los polímeros termoplásticos más utilizados con diversas aplicaciones dadas por sus propiedades como su alta resistencias, flexibilidad y su ligereza, además presenta beneficios con respecto a otros polímeros por su bajo costo. Es debido a estos beneficios que se lo puede ver en envases y botellas reciclables o también en piezas destinadas a la industria automotriz y médica.

A nivel mundial el polipropileno ocupó, en 2022, el puesto número 108 como el producto más comercializado del mundo de un total de 4648, siendo sus principales exportadores arabia saudita, corea del sur y estados unidos (OEC, 2022), por otra parte, es un plástico 100% reciclable por lo que también se lo conoce como rPP.

También es importante mencionar a (Quispe & Ovidio Mamani, 2022) del Instituto Tecnológico Nuevo Amanecer, ubicado en el departamento de Potosí, donde presentaron una “Máquina Extrusora de Plástico” en la feria de proyectos realiza el año 2022 en su propio instituto, dicho proyecto permitió la obtención de bloques a partir de pedazos de botellas recicladas y sometidas mediante procesos de prensado, empuje, fusión y moldeado. Por otra parte, también hicieron uso de sensores, controladores de temperatura, cables, dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos, que puestos en acción se acoplan para permitir el funcionamiento óptimo de la máquina.

OBJETIVOS

Objetivo General

Obtener filamento de polipropileno a partir de material plástico reciclado para impresión 3D.

Objetivos específicos

- ✓ Describir el proceso productivo de obtención de filamento
- ✓ Determinar la capacidad de la máquina extrusora
- ✓ Desarrollar los cálculos para la extrusora
- ✓ Elaborar los planos a detalle de la extrusora
- ✓ Construir el equipo de extrusión
- ✓ Poner en marcha la extrusora y realizar la fase experimental para la obtención de filamento PP
- ✓ Presentar un manual de operación de la maquina extrusora

Tabla 0-2. Acciones correspondientes a objetivos específicos

OBJETIVOS ESPECIFICOS	ACCIONES
Describir el proceso productivo de obtención de filamento PP	Realizar un diagrama de flujo de las etapas para la extrusión y explicar a detalle cada una
Determinar la capacidad de la maquina extrusora	Conocer la cantidad de filamento producido y la cantidad de materia prima utilizada en kg.
Desarrollar los cálculos para la extrusora	Determinar los rangos de temperatura para la fundición de plásticos mediante tablas
Elaborar los planos a detalle de la extrusora	Dimensionar las partes de la extrusora
Construir el equipo de extrusión	Evaluar los materiales, tamaño y costos del prototipo de extrusora
Poner en marcha la extrusora y realizar la fase experimental para la obtención de filamento PP	Obtener el filamento a partir de plástico PP triturado mediante el funcionamiento de la extrusora
Presentar un manual de operación de la maquina extrusora	Detallar las condiciones operativas como el tiempo de calentamiento y la temperatura

Fuente: Elaboración Propia (2024).

JUSTIFICACIÓN

Justificación tecnológica

La obtención de filamento de polipropileno permitirá emplear las tecnologías de extrusión al involucrar el desarrollo y construcción de una extrusora de plásticos, por lo cual se aportarán conocimientos tecnológicos sobre el funcionamiento y manejo de dicho equipo.

Justificación económica

La finalidad del proyecto es darle un valor agregado a un residuo plástico a través de su transformación en filamentos para impresión 3D mediante el uso de una extrusora de plástico.

Justificación social

La obtención de filamento a partir de plásticos de polipropileno permitirá aportar conocimientos sobre las aplicaciones y ventajas de utilizar materiales reciclados y contribuirá al desarrollo de una conducta social más responsable que valore el reciclado de los residuos plásticos coadyuvando al mejoramiento de la calidad de vida de la población.

Justificación ambiental

El proceso de obtención de filamento de polipropileno permitirá contribuir al reciclado de residuos plásticos PP y, considerando que estos no son biodegradables, reducir la contaminación al medio ambiente al no ser disgregados de forma irracional.

Justificación personal

Debido a que el polipropileno es uno de los polímeros más utilizados en el mundo, se percibió la necesidad de realizar una investigación que pueda contribuir al reciclaje de este plástico. Así mismo, se desarrolló el proyecto con la finalidad de obtener mi titulación como Ingeniero Químico y aportar en el equipamiento del LOU.

CAPÍTULO I
MARCO TEORICO

1.1. Procesos de obtención de filamentos para impresión 3D

Para la obtención de filamentos destinados a la impresión 3D a partir de material plástico reciclado se suelen emplear 2 procedimientos que involucran el uso de una extrusora, para el primer caso, y el de un dispositivo generalmente llamado PullStruder, para el segundo.

1.1.2. Obtención de filamentos para impresión 3D mediante una Extrusora

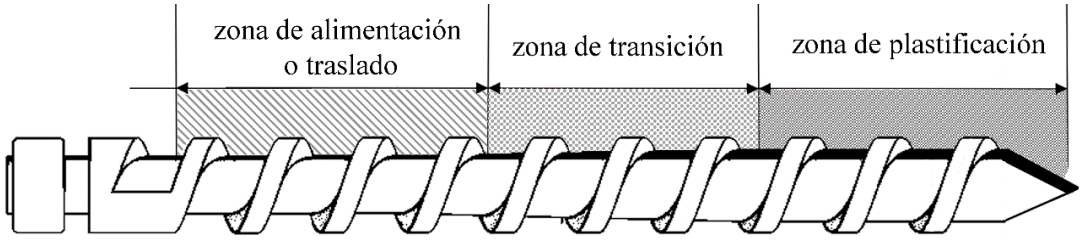
Los filamentos obtenidos mediante una extrusora siguen el proceso básico de extrusión que, según menciona (Morales Salgueiro, 2014), es una operación o procedimiento donde se aplica una fuerza para generar el movimiento de un material fundido, entonces por medio de presión se hace pasar dicho material por una boquilla. Por ello se puede decir que el proceso consiste básicamente en la fusión y transporte por presión de un material, sin embargo, inicialmente se debe picar el plástico para que ingrese a la extrusora en forma de partículas cuadradas de 5mm de lado.

Proceso en la extrusora

En el libro de "La Tecnología De Polímeros" (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012) se describe el funcionamiento de la extrusora mediante los siguientes puntos:

- Transporte de solidos
- Transición del material
- Plastificación o mezclado
- Conformado del filamento

Figura 1-1. Identificación de zonas del husillo



Fuente: Elaboración Propia (2024).

1.1.2.1. Transporte de solidos (Zona de alimentación)

En el transporte de los sólidos existen 2 zonas, la tolva y el interior de la extrusora, en la tolva el movimiento se da por gravedad, es decir, las partículas ingresan por su propio peso, mientras que en el cilindro el movimiento de las partículas se da por la acción mecánica del husillo y el cilindro, esto se puede lograr gracias a los coeficientes de fricción que tiene ambos al estar presente el contacto del polímero con la pared del cilindro y el husillo.

1.1.2.2. Transición del material

La zona de transición del material, es donde se produce una disminución del volumen, esto por la compresión que sufre el material al comenzar a moldearse debido a la elevación de la temperatura, de esto resulta en que los materiales solidos se fundan y se vuelvan fluidos.

1.1.2.3. Plastificación y homogenización

La zona de plastificación, también llamada zona de dosificación, inicia luego del fundido del material y es la que se encarga de homogenizar la mezcla fundida y eliminar los restos de aire en ella.

1.1.2.4. Conformado

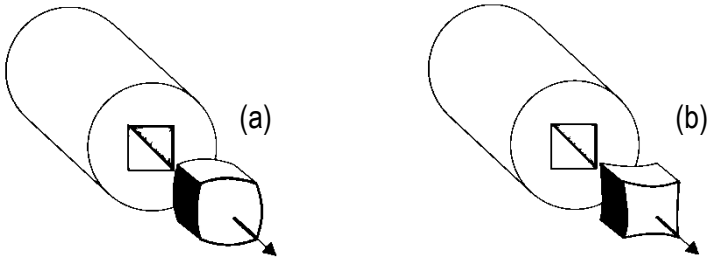
Para finalizar con la formación del filamento, el polímero fundido sale por la boquilla de la extrusora, debido a la presión generada, y es tensionado mediante un rodillo donde se embobina el filamento, adicionalmente se añade un sistema de enfriamiento mediante ventiladores para acelerar la solidificación del material.

Según el material que se esté tratando y la forma que se desea obtener ya sea en filamento o laminas, las condiciones de salida por la boquilla pueden resultar afectadas y presentar formas irregulares, parte de la solución a este problema involucra un diseño adecuado de la boquilla que prevea los cambios a la salida para ajustar el producto según lo que se espera del mismo. Para lograr el diseño adecuado de la boquilla se debe tomar en cuenta algunos problemas de la extrusión a la salida que pueden explicarse

mediante 3 tipos de factores que provocan cambios en el tamaño y forma, los cuales son el tensionado, relajación y enfriamiento.

- **Tensionado:** La mayoría de sistemas de extrusión involucran el uso de sistemas de recolección del material extruido, los cuales, por ejemplo, para filamentos son rodillos para el embobinado, dichos sistemas mantienen tensos el producto a la salida y hacen que el diámetro del filamento se reduzca según la fuerza aplicada sobre el mismo.
- **Relajación:** Debido a que el material se somete a esfuerzos mecánicos y térmicos dentro de la extrusora, al salir debido a su naturaleza se relaja, es decir que se produce un reordenamiento de las tensiones internas y con resultado el material puede llegar a expandirse y como consecuencia salir con un diámetro mayor al que tiene en la boquilla.
- **Enfriamiento:** El enfriamiento del material fundido provoca una contracción, es decir, se reduce el tamaño y aumenta la densidad, esto se puede regular mediante un enfriamiento uniforme a una determinada velocidad y con un método adecuado, de no ser así el material puede contraerse de forma uniforme donde las partes externas e internas se enfrían a diferentes velocidades, provocando la aparición de áreas hundidas.

Figura 1-2. Relajación y enfriamiento en un material de sección cuadrada



(a)Hinchamiento debido a la relajación; (b)Contracción debida al enfriamiento

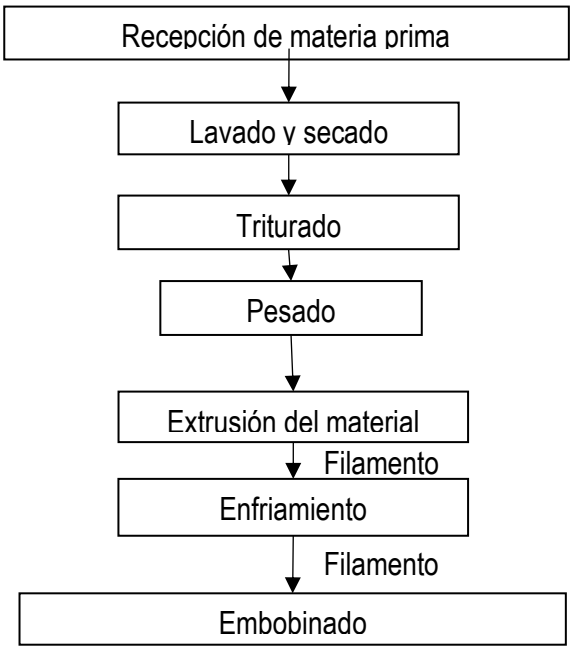
Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012)

Un ejemplo de la obtención de filamentos es el propuesto por (Lyman, 2012), donde por medio del sitio web Thingiverse, comparte de forma libre el software y diseño de una extrusora de plásticos, donde los pasos para su uso consisten en encender el sistema de calentamiento y esperar un tiempo determinado para accionar el motor, una vez cumplido se deposita el plástico triturado en la tolva para que por acción del husillo y por la fricción se mueva a través del cilindro y se caliente por resistencias. A la salida se ubica un ventilador para enfriar el filamento que sale por la boquilla, el cual es embobinado luego por unos rodillos.

Figura 1-3. Extrusora

Fuente: (Lyman, 2012)

Figura 1-4. Diagrama de flujo de proceso con una extrusora



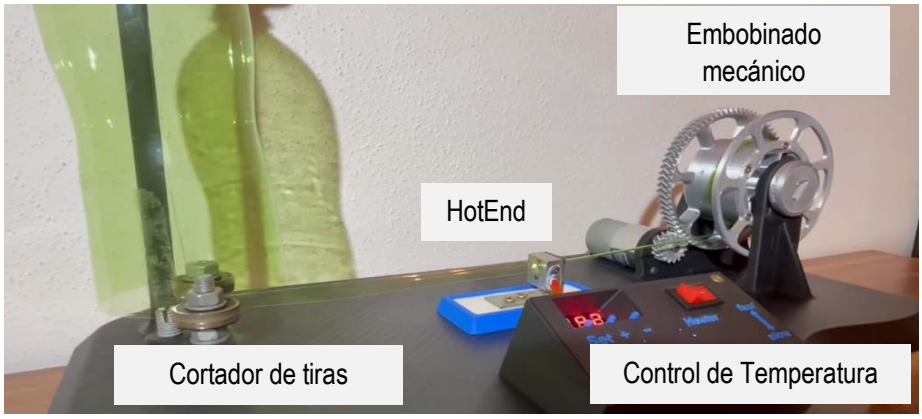
Fuente: Elaboración Propia (2024).

1.1.3. Obtención de filamentos para impresión 3D mediante un PullStruder

Este método de obtención se suele atribuir a la mayoría de proyectos caseros para reciclaje de plásticos en forma de filamentos, el nombre PullStruder proviene de la palabra “pulling” que significa tirar o halarse, lo cual es una parte importante para el proceso ya que utiliza la tracción mecánica para extruir el filamento a partir de tiras de plástico, las cuales deben tener un ancho igual en toda su longitud.

Las partes básicas que tiene este proceso son:

Figura 1-5. PullStruder



Fuente: (WIESAG, 2023)

El proceso suele explicarse con 3 pasos:

- Cortar botellas plásticas en una cinta larga
- Forzar esta cinta a pasar por un HotEnd a la temperatura de moldeo
- Tensionar del filamento lenta y regularmente

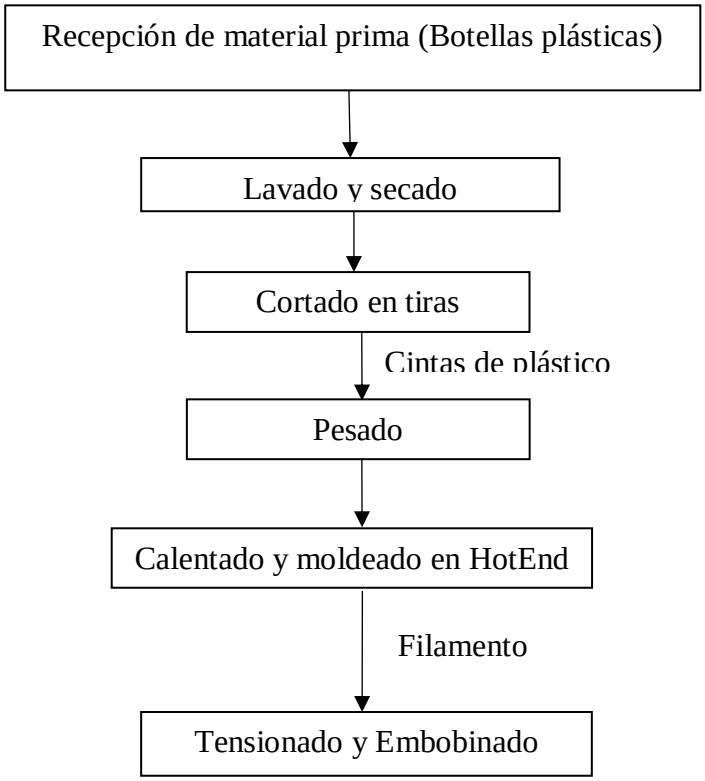
En cada etapa pueden añadirse equipos extra, aun así, el funcionamiento de estos pasos consiste inicialmente en el acondicionamiento de las botellas, donde se cortan en forma de cinta, esto se puede hacer de forma directa como en la Figura 1-5 donde utiliza un cortador de tiras o también de forma indirecta cortando las cintas por separado y embobinándolas en otro rodillo. Posteriormente la cinta debe ingresar por el HotEnd, el cual es una pieza metálica con buena conducción de calor a la cual se acoplan resistencias para calentarla hasta alcanzar la temperatura optima de moldeo.

El moldeo o la forma con la cual se espera la salida del filamento está en función de una boquilla que es parte del HotEnd, por lo tanto, el diámetro de esta influirá en el del filamento obtenido.

Para iniciar el proceso se suele cortar un extremo de la cinta en forma de punta, lo cual permite que ingrese por la boquilla, una vez que empiece a calentar el HotEnd y se tenga una temperatura adecuada se tensiona de la punta para que comience el formado del filamento, esta acción mecánica debe ser constante para tener un producto uniforme y por lo general se usa un rodillo mecánico para hacerlo.

El proceso se muestra mediante el siguiente diagrama:

Figura 1-6. Diagrama de proceso mediante PullStruder



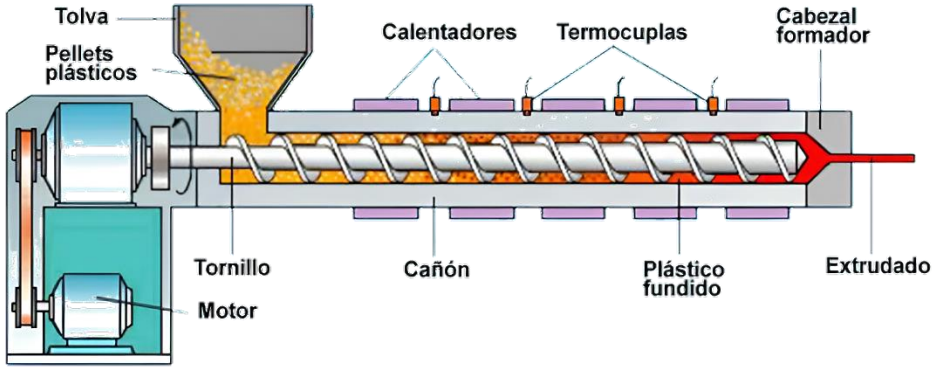
Fuente: Elaboración Propia (2024).

1.2. Extrusora

La extrusora es una maquina mediante la cual se realiza el proceso de extrusión, donde, en el caso de los polímeros, realiza funciones de acción de prensado, fusión, moldeado y empuje de los materiales, aun así, también se suele aplicar en trabajos relacionados con los metales.

En cuanto a las partes de una extrusora estas pueden identificarse en el siguiente diagrama de una extrusora básica:

Figura 1-7. Partes Generales de una extrusora



Fuente: (Ojeda, 2011)

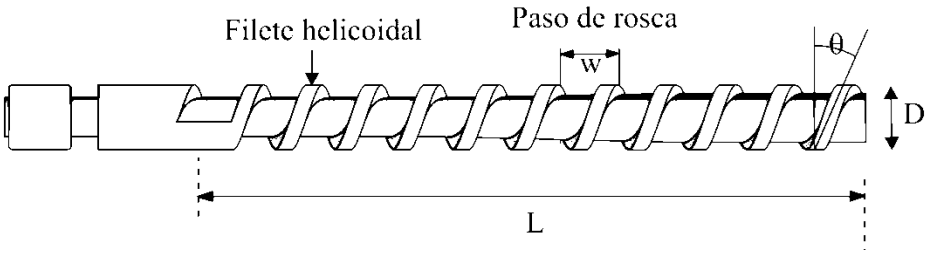
1.3. Partes de una extrusora

Las partes de una extrusora definidas por M. Beltrán en "La Tecnología De Polímeros" son las siguientes:

1.3.1. Tornillo o Husillo

El husillo o también conocido como tornillo de extrusión es básicamente un tornillo largo de acero inoxidable el cual tiene una rosca a su alrededor que es conocida como filete helicoidal la cual tiene una determinada longitud de separación conocida como paso de rosca (w) y un ángulo de filete (θ). También para caracterizar el husillo se define su longitud (L) y su diámetro (D).

Figura 1-8. Partes del Husillo

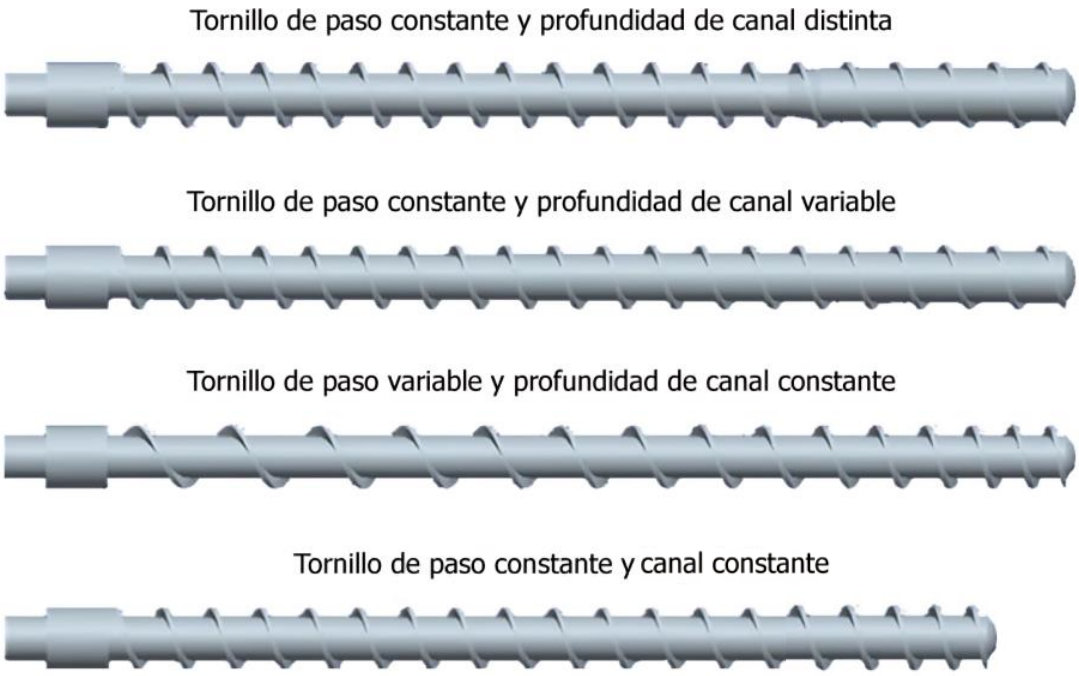


Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012)

Algunos tipos de husillo están huecos por dentro para incorporar sistemas de calefacción, por ejemplo, haciendo circular un fluido caliente por dentro.

Los tipos de husillo pueden estar en función del tipo de polímero o del fin para el cual será empleado, por ejemplo:

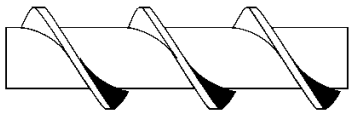
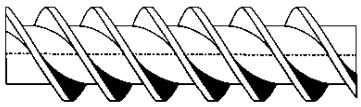
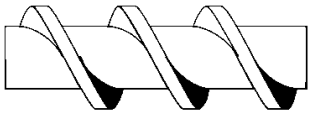
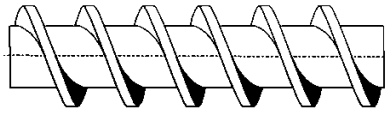
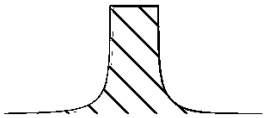
Figura 1-9. Tipos de Husillo según función



Fuente: (Universidad Politécnica de Valencia, 2018)

Si se modifica el tornillo sin fin para reducir su fricción se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros que están en función del número de filetes, el ángulo en el que se encuentra y el radio del flanco de cada uno.

Figura 1-10. Tipos de husillo según características modificables

Característica modificable	Diseño adecuado para una menor fricción	Diseño que genera una elevada fricción
Numero de filetes	Sencillo 	Doble 
Angulo del filete	Grande 	Pequeño 
Radio del flanco del filete	Grande	Pequeño 

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012)

1.3.2. Cilindro

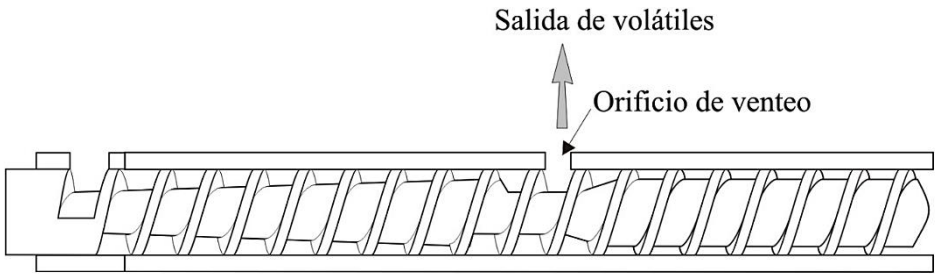
El cilindro o barril es un tubo metálico de acero inoxidable que envuelve el husillo, debido a que soporta un desgaste mecánico elevado es por lo general de acero resistente, también es importante mencionar que mediante el cilindro se da la trasferencia de calor, donde se suelen ubicar resistencias a lo largo de su longitud permitiendo disponer un gradiente de temperatura hasta la boquilla.

Figura 1-11. Cilindro de acero

Fuente: (Osdallstar, 2022)

Cuando el proceso de extrusión involucra plásticos que retienen componentes volátiles o plásticos que retienen una gran cantidad de humedad como por ejemplo las poliamidas, se realiza un proceso de desgasificado. Este proceso consiste en un orificio que atraviesa el cilindro, por ello la extrusora debe ser diseñada para que la presión interior sea igual a la exterior y de esta forma no se provoque una fuga del material fundido por dicho orificio. Este agujero de venteo se ubica después de la zona de fusión, cuando el material ya está fundido, por lo tanto, se suele definir una nueva zona de descompresión donde los productos volátiles son evacuados por el orificio, luego de esto se continua con la etapa final de plastificación o dosificación.

Figura 1-12. Orificio de venteo



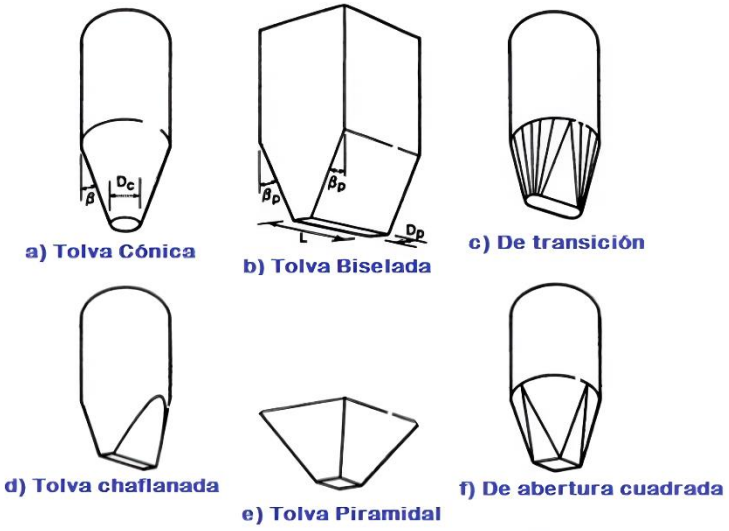
Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012)

1.3.3. Tolva y apertura de alimentación

La tolva es la parte que permite la alimentación del material para la extrusión, su diseño está orientado a facilitar la entrada mediante una forma de embudo, garantizando un flujo constante de material prima. Su construcción puede ser de sección circular y

rectangular siendo esta última una opción más económica. Para facilitar la entrada de material se suelen aplicar sistemas de vibración o agitadores que se ubican en el interior de la tolva.

Figura 1-13. Tipos de Tolva

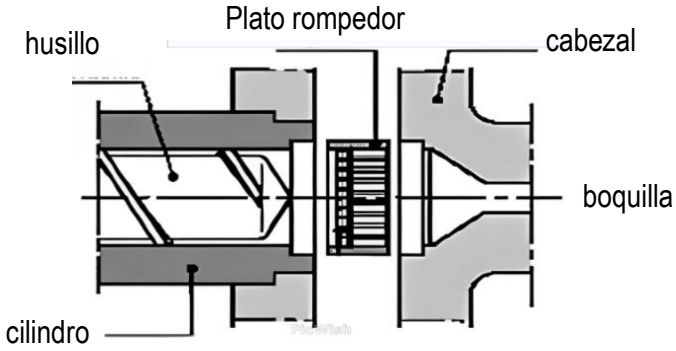


Fuente: (Aznar, 2022)

1.3.4. Boquilla

Es la parte del extrusor que se ubica en el extremo final del cilindro y su función es la de darle forma al producto, por ejemplo, de una forma circular como la de un filamento con un diámetro determinado o también en forma rectangular para planchas o laminas.

Figura 1-14. Partes de la punta de extrusión



Fuente: (Aguilar, 2016)

1.3.5. Sistema de calentamiento

Los extrusores presentan un sistema de calentamiento que consta de 2 elementos, que son los calefactores, como por ejemplos las resistencias espirales, y sensores de temperatura. De la energía total que se aporta para la producción de filamentos la mayor parte es ocupada por los calentadores mientras que en menor medida se tiene la energía para el motor. (Trapero, 2014)

1.3.6. Motor

Es el que permite el movimiento mecánico del husillo en rotaciones constantes, los motores eléctricos son los más usados y dependiendo de los diseños pueden involucrar rodamientos y reductores.

1.3.7. Control

Los sistemas de control generales en las extrusoras son los sensores de temperatura en el cilindro, los sensores de diámetro a la salida de la boquilla, como por ejemplo un vernier, y también se considera parte del control el uso de un tacómetro para medir las revoluciones por minuto que tiene el husillo. (Trapero, 2014)

1.4. Características de los plásticos

Se denomina plástico a una sustancia orgánica polimérica, es decir, que está formada por la unión en cadena de monómeros que en su conjunto forman macromoléculas, estas, dependiendo del plástico, están formadas principalmente por carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno o cloro.

1.4.1. Clasificación de plásticos

Los plásticos se clasifican en 7 grupos que se identifican con su respectivo número del 1 al 7, el cual está dentro de un triángulo formado por flechas. Estos plásticos son:

1 -PET (Tereftalato de Polietileno)

El polietileno tereftalato es el plástico más común en envases como botellas de refrescos, agua y aceite, su fórmula es $(C_{10}H_9O_4)$ n y se caracteriza por ser reciclable para fabricar fibras o mezclarlo con PET virgen.

2 - HDPE (Polietileno de alta densidad)

Este plástico se caracteriza por su grosor y rigidez, lo que le da mayor resistencia al calor y al frío. Está formado por cadenas de monómeros de etileno cuya estructura es $(C_2H_4)n$, además se usa para fabricar envases como botellas de lácteos, detergentes y bolsas. Es reciclable y puede transformarse en macetas o contenedores de basura.

3 - PVC (Policloruro de vinilo)

El PVC es un polímero termoplástico derivado del cloruro de vinilo. Su estructura lineal incorpora átomos de cloro, (C_2H_3Cl) n, lo que le aporta rigidez y resistencia química. Por sus propiedades, es ideal para fabricar tuberías, siendo esta una de sus mayores aplicaciones, así mismo también se utiliza para la fabricación de botellas de champú, detergentes, juguetes y mangueras.

4 - LDPE (Polietileno de baja densidad)

El LDPE está formado por unidades de etileno. Presenta muchas ramificaciones, lo que le confiere flexibilidad y baja densidad, debido a esto se encuentra en envases como botellas de agua, bolsas de supermercado, envoltorios y guantes. Es reciclable, especialmente para fabricar nuevas bolsas de plástico.

5 - PP (Polipropileno)

El PP (C_3H_6) n es un polímero termoplástico compuesto por unidades de propileno las cuales le proporciona resistencia al calor, humedad y productos químicos, es usado especialmente en envases para alimentos.

6 - PS (Poliestireno)

El poliestireno es un polímero derivado del estireno. Sus grupos aromáticos le da rigidez y fragilidad. Se usa en envases de comida rápida, vasos desechables, cubiertos y tarrinas de helado.

7 - Otros plásticos y materiales compuestos

Esta categoría incluye polímeros como el policarbonato (PC) y bioplásticos como el PLA.

1.5. Filamentos para impresión 3d

Un filamento es un material que se puede describir como una fibra larga y continua de diámetro constante que puede ser de una gran variedad de materiales termoplásticos, por lo tanto, un filamento para impresión 3D es aquel que se utiliza en las impresoras 3D para ser fundido y posicionado en capas para crear o imprimir un objeto en tres dimensiones. Estos filamentos son comercializados en rollos y pueden estar presentes en una gran variedad de colores y tamaños.

Figura 1-15. Filamentos para impresión 3D

Fuente: (Barba, 2024)

1.5.1. Características generales de un filamento para impresión 3D

Un filamento Debe tener las siguientes características para que sea adecuado en el proceso de impresión 3D:

Diámetro constante: El material debe ser uniforme en toda su extensión para garantizar una extrusión suave y sin atascos en la boquilla de la impresora, de esta forma se evita la distribución desigual entre capas.

Tolerancia de diámetros: Los filamentos deben tener los diámetros adecuados para impresión 3D que comercialmente se presentan de 1,75mm, por lo tanto, los filamentos que busquen este diámetro pueden tener una tolerancia de +/- 0,05 mm, sin embargo, dependiendo de la impresora 3D se puede variar la tolerancia hasta +/- 0,2mm.

Capacidad de adhesión entre capas: El filamento debe tener una gran adhesión al momento que la impresora 3D forme las capaz del objeto que se realice, de esta forma se garantiza la integridad estructural y la resistencia.

También debe considerar las características técnicas de la impresora donde se utilice.

1.6. Tipos de plásticos para filamentos de impresión 3D

Algunos de los polímeros más usados para la fabricación de filamentos 3D son los siguientes:

1.6.1. PLA

El Poliácido Láctico (PLA) es un polímero biodegradable resultante de la polimerización del ácido láctico que es altamente versátil. Al ser biodegradable se puede hacer 100% a partir de recursos renovables, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón.

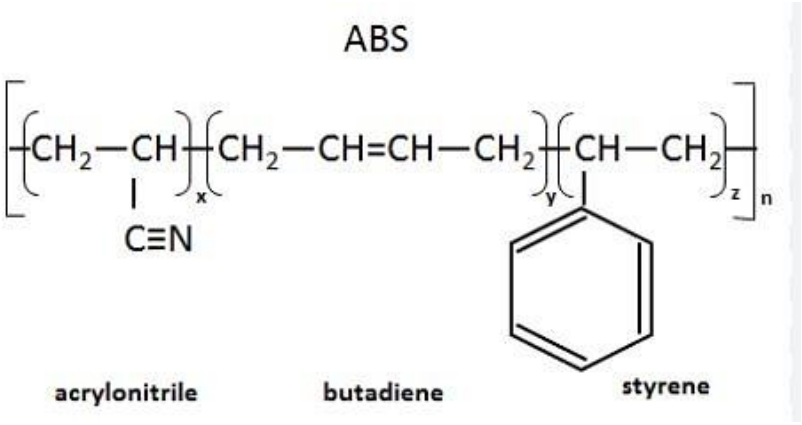
Algunas características de este plástico son que tiene una gran claridad y brillo, es resistente a la grasa, tiene propiedades de barrera ante olores y es estable frente a la luz U.V. haciendo que su uso en textiles sea viable porque no se decolora, por otra parte, también es común verlo en cubiertos desechables.

Con respecto a los filamentos de este material son los más ecológicos que se encuentran en el mercado, pero se encuentran orientados a la creación de objetos que no requieran una gran resistencia mecánica.

1.6.2. ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) es un polímero resultante de la polimerización del acrilonitrilo y estireno junto con polibutadieno, dando como resultado un plástico amorfo cuyas características principales son su resistencia ante impactos, esto dado por las propiedades del butadieno mientras que el acrilonitrilo le proporciona resistencia química y al calor. También es importante el estireno ya que le da una buena procesabilidad al momento de someterse a procesos de moldeado por extrusión y por inyección.

Figura 1-16. Estructuras químicas de los monómeros del ABS



Fuente: (Deng, 2022)

En cuanto a sus aplicaciones se usa comúnmente para la elaboración de juguetes, cascos de seguridad, materiales para electrodomésticos como carcasas, en partes de automóviles, entre otros.

1.6.3. PET

Tanto el PET como el RPET son usados en la impresión 3D ya que cumplen con las características necesarias para un filamento destinado a ese propósito, tienen un precio bajo, pueden ser reciclables, son ligeros y estéticos. Además, considerando su gran disponibilidad y producción a nivel mundial son ideales para procesos de reciclado y formación de filamentos donde no se requieran altos parámetros de calidad en las piezas que se realicen.

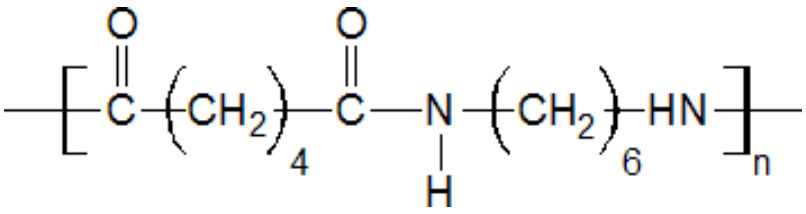
1.6.4. PETG

El filamento PETG es un tipo de material termoplástico que combina las propiedades del PET y el glicol para obtener una mayor flexibilidad y resistencia a la deformación en los objetos 3D.

1.6.5. Nylon

El nylon es una poliamida sintética de la que se producen una gran variedad de filamentos elásticos y muy resistentes, los cuales son empleados principalmente en la fabricación de tejidos diversos.

Figura 1-17. Estructuras químicas del Nylon-6,6



Fuente: (Mendez, 2011)

En cuanto a sus características, existen varias versiones del nylon, pero el más conocido es el nylon 6,6, el cual tiene una alta tenacidad, rigidez, resistencia a la abrasión y al calor, sus aplicaciones están por lo general en el sector de la ingeniería con la construcción de piezas como válvulas o engranajes, además presenta la ventaja de que puede funcionar sin lubricación y son silenciosas, aun así es importante mencionar que sus costos de producción son mucho más elevados que otros polímeros como el polietileno o el poli estireno, donde por ejemplo, el costo del nylon es tres veces más alto que el del polietileno. (Mendez, 2011)

En cuanto a los filamentos para impresión 3D de nylon, el tipo de este polímero más usado para su producción es el nylon PA6 (poliamida producida por la polimerización de una molécula con seis átomos de carbono), el cual tiene buenas características como la flexibilidad y resistencia al impacto, sin embargo, se debe tomar en cuenta que es altamente higroscópico, lo que significa que absorbe rápidamente la humedad del ambiente.

1.6.6. HIPS

El poliestireno resistente al impacto (HIPS), es un polímero termoplástico compuesto por una combinación entre el poliestireno y un caucho elastomérico, lo cual confiere al material una mayor resistencia a los impactos en comparación con el poliestireno común, esta propiedad hace que sea empleado en la fabricación de envases, componentes mecánicos, automotrices, entre otros, que requieran soportar golpes y caídas.

Los filamentos para impresión 3D de este material son adecuados para realizar piezas técnicas ligeras y de alta calidad, además son resistentes a los aceites, grasas y álcalis, pero no al combustible, otra desventaja es que no son buenos contra los rayos U.V. por lo cual si se pintan con el tiempo se decoloran y se vuelven quebradizos, por último, estos filamentos presentan una baja conductividad eléctrica, por lo que son aislantes.

1.6.7. Filamento de fibra de carbono

La fibra de carbono es un material sintético que como su nombre lo indica están formado en su gran mayoría por carbono, estos están dispuestos en forma de finos filamentos que tienen diámetros de entre 5 a 10 micrómetros y que no están ordenados sino más bien están en forma aleatoria siguiendo una tendencia a estar en paralelo al eje longitudinal de la fibra. De esta manera se brinda una alta resistencia lo cual hace ideal su uso en la industria espacial, aeronáutica y automovilística, principalmente en la fabricación de piezas ligeras y resistentes.

En el campo de los filamentos para impresión, la fibra de carbono se suele mezclar en distintas proporciones con otros materiales como el ABS, PETG o nylon, un ejemplo son los filamentos de PLA con un 15% de fibra de carbono, de esta manera se ofrece una mayor rigidez, además de una capacidad estructural y adherencia de la capa muy superior a la de otros filamentos.

Figura 1-18. Piezas mecánicas impresas a partir de fibra de carbono con Nylon

Fuente: (Colorplus, 2024)

1.6.8. PP

El polipropileno (PP) es un plástico derivado del propileno que debido a su versatilidad tiene una gran aplicación en diversos campos como lo son el de los envases y embalajes, en la industria automotriz para fabricar piezas de automóviles, en la industria textil para fibras de alfombras o cuerdas, en componentes de electrodomésticos y en tuberías.

Al igual que el PET el polipropileno es 100% reciclable por lo que sus productos reutilizados son conocidos como rPP. Los filamentos de polipropileno a lo largo del tiempo fueron unos de los más precisados por los acabados y texturas que generan en las piezas, sin embargo, presentan problemas de warping en la impresión, es decir que la primera capa impresa son se adhiere o se levanta de la cama de la impresora, esto a lo largo de los años fue motivo por el cual no llego a un nivel comercial como lo son el ABS o el PLA, aun así se encontraron soluciones al problemas del warping que involucran el usos de cinta adhesiva sobre la cama de impresión.

Figura 1-19. Accesorio de PP impreso para tuberías en forma de E

Fuente: (Impresoras3D, s.f.)

1.6.9. TPE

El TPE es un nombre general atribuido a un elastómero plástico. Los filamentos de este material se caracterizan por tener un acabado superficial suave y un alto coeficiente de fricción lo cual permite la fabricación de piezas que combinan partes rígidas y partes elásticas en una sola impresión 3D

Tabla I-1. Tabla Comparativa de los tipos de filamentos para impresión 3D

Tipo de Filamento	Características	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas	Concejos para impresión
PLA (Poliácido Láctico)	Es un polímero biodegradable resultante de la polimerización del ácido láctico Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 198ºC	▪ Elementos decorativos ▪ Maquetas ▪ Prototipos ▪ Figuras	▪ Material reciclable ▪ No necesita cama caliente ▪ Elevada estabilidad ▪ Velocidad de impresión más rápida que con otros filamentos ▪ Se obtiene de recursos renovables	▪ Baja resistencia térmica (endeble a partir de los 60ªc) ▪ Es un material frágil y de poca resistencia mecánica ▪ Sensible a la humedad	▪ Usar adhesivos en la base para evitar que la pieza se despegue de la base ▪ utilizar ventiladores de capa para piezas pequeñas y finas evitando que se deformen ▪ Para filamentos con colores oscuros, aumentar la temperatura 3 ºC ó 5 ºC respecto a la temperatura óptima.
ABS Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Es un polímero resultante de la polimerización del acrilonitrilo y estireno junto con polibutadieno Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 235ºC	▪ Piezas de automatización ▪ Piezas industriales ▪ Elementos decorativos	▪ Estables a altas temperaturas (80-90ºC) ▪ Conserva la tenacidad a temperaturas extremas(-40ºC) ▪ Se pueden lijar y perforar ▪ Resistente a impactos y a químicos	▪ Tiene una contracción entre capas más rápida por lo cual puede resquebrajarse la pieza si las condiciones del entorno son demasiadas frías	▪ La impresión se debe hacer en ambientes con calefacción ▪ No deben usarse ventiladores de capa ▪ Requiere una temperatura de cama de 60ºC para piezas pequeñas y de 80ºC para piezas grandes
PET Polietileno tereftalato	Es un polímero termoplástico lineal de uso general Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 215-250°C (Optimo a 235ºC)	▪ Fabricación de envases ▪ Piezas decorativas ▪ Utensilios que están en contacto humano	▪ Tiene alta transparencia, incluso siendo el filamento de color ▪ Alta resistencia al desgaste y corrosión ▪ Es impermeable ▪ Baja absorción de humedad	▪ Levemente tóxico ▪ No es biodegradable ▪ Se vuelve endeble a partir de 70 ºC aproximadamente	▪ Para la impresión no necesita cama caliente ▪ Para filamentos con colores oscuros, aumentar la temperatura 3 ºC ó 5 ºC respecto a la temperatura óptima.

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Cont-1. Tabla I-1.

PETG PET modificado con glicoles	Es un copolimero resultante del proceso de glicolizado del PET Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 220-250ºC	▪ Elementos decorativos ▪ Piezas que requieran translucidez ▪ Piezas que requieran de buena resistencia a los impactos y un poco de flexibilidad	▪ Excelente adhesión entre capa ▪ No emite olores durante la impresión ▪ Es fácil de imprimir ▪ Mayor durabilidad y dureza ▪ Más flexible que el ABS	▪ Se reblandece a partir de 80ºC ▪ Es más denso, lo que no complica la impresión ▪ Puede llegar a soltar más hilo en la extrusión	▪ Se recomienda el uso de adhesivos ▪ Si se usa ventilador de capa al máximo, puede que no se adhieren bien las capas ▪ El ventilador de capa debe estar a revoluciones baja-media ▪ Requiere cama caliente a 65ºC aproximadamente
Nylon	Es un polímero que contiene enlaces de tipo amida, lo que se conoce como poliamidas, el más usado es el PA6 Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 240-260ºC	▪ piezas que estén en contacto con ejes ▪ piezas con mucha fricción	▪ La calidad de impresión brinda un acabado suave ▪ Buena adherencia entre capas ▪ Alta resistencia ▪ Coeficiente de fricción bajo, por lo que se usan para piezas como engranajes	▪ absorbe la humedad con mucha facilidad ▪ Ante cambios bruscos de temperatura el material se puede deformar	▪ Necesita cama caliente de aproximadamente 80º C ▪ Se recomienda usar secadoras de filamento para evitar la absorción de humedad durante la impresión ▪ No necesita ventilador de capa
HIPS poliestireno resistente al impacto	Es un polímero mezclado con estructuras repetitivas de estireno y butadieno, Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 180-260ºC (Optimo a 238ºC)	▪ Fabricación de juguetes ▪ separadores de frutas ▪ envases alimenticios	▪ Material reciclable ▪ Tiene excelente estabilidad térmica por lo que sirve como aislante ▪ Alta capacidad de mecanizado ▪ No desprende gases nocivos	▪ No se puede utilizar para fabricar piezas destinadas a estar a la intemperie ▪ Empieza a deformarse a los 80 ºC	▪ No necesita cama caliente ▪ En caso de usar cama caliente se recomienda utilizar a bajas temperaturas para mayor adhesión en la cama y en las primeras capas

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Cont-2. Tabla I-1.

Fibra de carbono	Material sintéticos formado por filamentos finos de carbono Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 230-265°C	▪ Fabricación de piezas de bicicletas y motocicletas ▪ Piezas de vehículos ▪ Industria aeronáutica y aeroespacial	▪ Gran resistencia mecánica y gran ligereza. ▪ Buen aislante térmico ▪ estable a altas temperaturas ▪ Grandes acabados con aspecto fibroso	▪ Temperaturas de impresión elevadas ▪ Material muy abrasivo	▪ No necesita cama caliente ▪ Usar boquillas de extrusión de acero inoxidable para evitar abrasión debido a las fibras del material ▪ Se recomiendan boquillas que sean igual o superiores a 0,4 mm
PP Polipropileno	Es un plástico derivado del propileno Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 220-260°C	▪ Recipientes que tengan que contener líquido ▪ Tuberias ▪ Piezas aislantes de electricidad ▪ Herramientas o piezas industriales	▪ No es tóxico ▪ Alta resistencia química ▪ Tiene buena resistencia a la fatiga ▪ Es aislante eléctrico debido a su baja conductividad ▪ Ligero	▪ Tiene problemas de adhesión a la cama caliente	▪ Debe tener cama con calefacción de entre 85 a 100°C ▪ Su velocidad de impresión debe ser a 40 mm/s ▪ El ventilador de capa debe funcionar entre el 50 al 100%
TPE	Es una combinación de plástico (termoplástico) y caucho (elastómero) Temperatura de extrusor para impresión 3D ºC 150°C	▪ Accesorios como pulseras y collares ▪ Elementos decorativos ▪ Juguetes flexibles	▪ Buena amortiguación a los impactos ▪ Buena resistencia a la rotura por fatiga ▪ Reciclable ▪ Material suave ▪ Capacidad de estiramiento moderada	▪ Poca resistencia a agentes químicos y al calor. ▪ Pérdida de elasticidad si se funden a una temperatura elevada ▪ Perdida de elasticidad con el tiempo	▪ Usar velocidades bajas de impresión (10 – 20) mm/s. ▪ Constante inspección para evitar atascos por trabajar a bajas velocidades ▪ se recomienda utilizar boquillas con orificios de salida de 0,4 mm en adelante

Fuente: Elaboración Propia, 2024

1.7. Datos experimentales de filamentos obtenidos mediante una maquina extrusora casera

(Trapero, 2014) indicaba que existe una variación en el diámetro y mediante pruebas tomadas cada 30 segundos llegó a registrar 10 diámetros siendo estos:

Tabla I-2. Variación de diámetro

Muestra	Diámetro (mm)
1	2,52
2	2,51
3	2,67
4	2,71
5	2,88
6	2,57
7	3,24
8	2,75
9	3,04
10	2,83

Fuente: (Trapero, 2014)

De esto se llegó a que el diámetro promedio es de 2,772mm con un valor máximo de 3,24 y un mínimo de 2,51m, su delta de diámetro es entonces de 0,73mm.

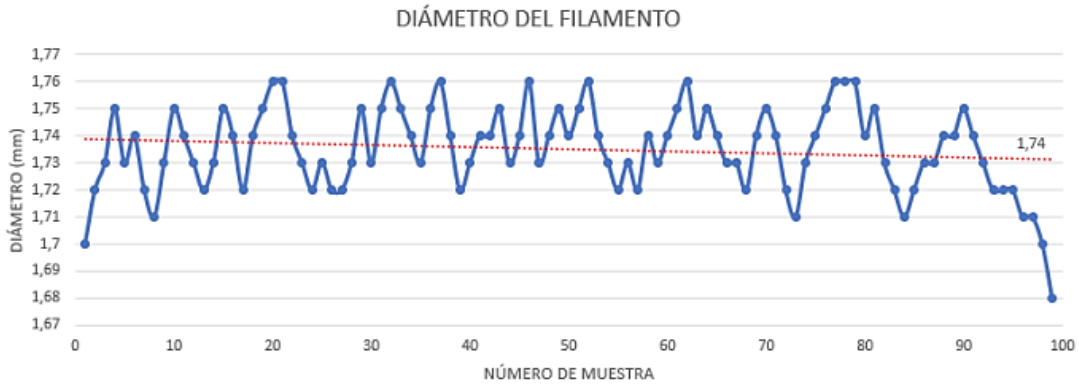
Figura 1-20. Variación de diámetro

Fuente: (Trapero, 2014)

Esta variación puede darse por los ajustes de temperatura y velocidad del motor, así mismo a la salida se debe controlar la ventilación para evitar la contracción por enfriamiento.

En el trabajo de (HERRARTE LOPEZ & MARMOLEJO VILLAMIL, 2024) se planteó la obtención de filamentos reciclados con los cuales se hicieron pruebas de diámetro e impresión 3D, esto para diferentes revoluciones por minuto del motor, donde para 33RPM se obtuvo:

Figura 1-21. Variación del diámetro a 33RPM



Fuente: (HERRARTE LOPEZ & MARMOLEJO VILLAMIL, 2024)

Junto con esto también realizó pruebas de impresión con el filamento, donde las imperfecciones vistas en dicho trabajo se deben al grosor irregular del filamento, ya que, al variar el diámetro ideal de 1,75mm se producen obstrucciones en la boquilla de la impresora 3D y esto afecta a la distribución en capas que realiza la impresora, para solucionar esto en el trabajo se cambió el diámetro de la boquilla y por lo tanto del filamento a 1,5mm para que el flujo de filamento sea más consistente y se mejore la calidad del objeto 3D impreso.

1.8. Características generales del Polipropileno

El polipropileno (PP) es un plástico derivado del petróleo que pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliolefinas. Este se caracteriza por su gran resistencia mecánica, flexibilidad y por ser un plástico totalmente reciclable.

El polipropileno fue sintetizado por primera vez en el año 1950 por los científicos Giulio Natta y Karl Ziegler en Italia, con el objetivo principal de sustituir al polietileno como materia de uso en la empresa donde trabajaban, llamada Montecatini. De esta forma se encontraron con un polímero cuya densidad era menor a la de otros plásticos y que tenía mejores propiedades mecánicas que el polietileno, fue así que a partir de 1954 se comenzó a producir a nivel industrial y en 1954 se utilizó para producir utensilios domésticos en todo Europa y Norteamérica.

En años posteriores, como en 1960, se utilizó el polipropileno por primera vez para la elaboración de envases y se empezó a profundizar en métodos para contrarrestar las desventajas que tenía, que eran la sensibilidad al frio y a la luz UV, llegando a utilizar agentes estabilizantes que reducían estos problemas.

El polipropileno es un polímero termoplástico, esto quiere decir que a elevadas temperaturas puede llegar a fundirse y de esta forma permitir su moldeo, esta característica se debe a que, como otros polímetros termoplásticos, tiene moléculas lineales largas las cuales al calentarse se deslizan unas sobre otras y producen un comportamiento maleable en el plástico, esto generado ya que tienen fuerza intermoleculares débiles. Por ello al poder derretir y moldear el polipropileno por calentamiento y enfriamiento se ve reforzada su alta capacidad de reciclaje ya que con esto permite la creación de varios productos personalizados con mayor facilidad y eficiencia, convirtiéndolo en uno de los materiales plásticos más sostenibles en el mundo.

Por otra parte, el proceso para la obtención de polipropileno parte de la producción de propileno o propeno el cual es sometido a una polimerización para obtener una cadena de monómeros propileno por apertura de sus dobles enlaces.

Como en todos los procesos de polimerización se tienen 3 etapas reconocibles, la primera es una reacción de iniciación que consiste en la activación del doble enlace del propeno mediante luz, ultrasonidos, formadores radicales, calor o catalizadores de Ziegler, luego se continua con la etapa de crecimiento y propagación donde se forman

la cadena de monómeros y finalmente la reacción de ruptura para detener el crecimiento de la cadena polimérica.

1.8.1. Tipos de polipropileno

El polipropileno puede estar dispuesto en 3 tipos, los cuales a su vez también están divididos según formas y organización molecular. Estos 3 grupos de polipropileno son los siguientes:

- Polipropileno de homopolímero (PPH)
- Polipropileno de copolímero (PPC)
- Polipropileno de copolímero random (PPR)

1.8.1.1. Polipropileno de homopolímero (PPH)

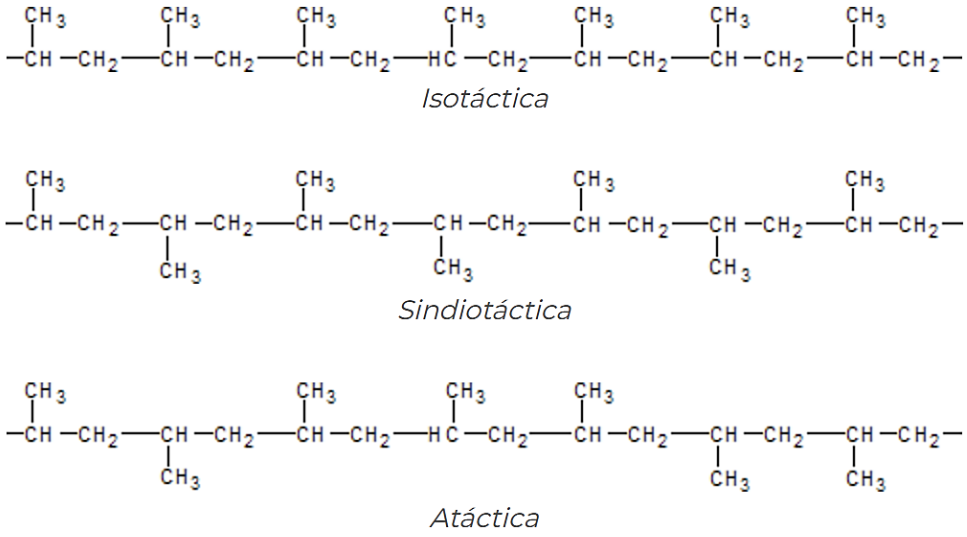
El polipropileno homopolímero es aquel que forma una cadena de igual composición química, es decir que presenta el mismo tipo de monómero propileno a lo largo de toda su extensión.

Debido a que los monómeros son asimétricos estos se pueden ordenar molecularmente según la posición de sus grupos metilos CH3 e hidrógenos H, formando las siguientes estructuras:

- Estructura isotática
- Estructura atáctica
- Estructura sindiotáctica
- Terpolimero

De estos 3 la estructura isotáctica es la que presenta un grado mayor de cristalinidad con respecto a las otras formas y por lo tanto mayor rigidez, así mismo las estructuras de cada uno se pueden aprecias en la siguiente figura.

Figura 1-22. Estructuras isotáctica, atáctica y sindiotáctica del polipropileno



Fuente: (Gutiérrez, 2014)

1.8.1.2. Polipropileno de copolímero (PPC)

También conocido como copolimero de impactos esto son resultado de un proceso de 2 reactores verticales conectados en serie, donde en el primero se produce homopolimero de propileno y en el segundo se copolimeriza con etileno, logrando una mejor resistencia temperaturas más bajas.

1.8.1.3. Polipropileno de copolímero random (PPR)

Este cooplimero está formado por propileno y etileno al igual que el PPC, sin embargo, en este copolimero, se ubican de forma aleatoria los monómeros etilenos a la cadena de monómeros propileno, con ello se reduce la cristalinidad y se logra un acabado más transparente y se reduce la cristalinidad.

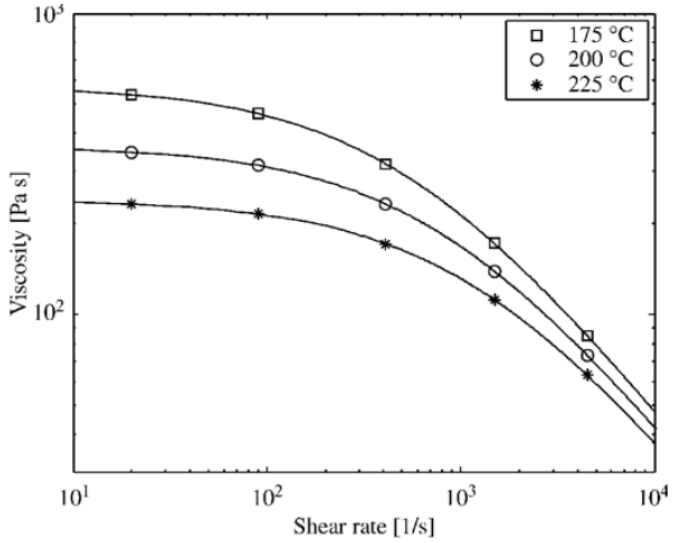
1.8.1.4. Terpolimero

Al igual que el PPR en este polímero se añaden de forma aleatorio monómeros de etileno y 1-buteno para unir cadenas de homopolimero propileno, esto se conoce como terpolimerización y es un proceso empleado para mejorar propiedades de sellado de productos

1.9. Viscosidad del polipropileno

La viscosidad del polipropileno se determina mediante la siguiente grafica de viscosidad vs shear rate (velocidad de cizallamiento), donde la velocidad de cizallamiento es la relación entre la velocidad máxima de los perfiles de flujo y la distancia total entre ellos, dando como resultado unidades de [1/s]

Figura 1-23. Viscosidad vs cizallamiento



Fuente: (Gutiérrez, 2014)

Las altas velocidades de cizalladura resultan en viscosidades más bajas ya que a mayor velocidad de cizallamiento se tiene que la velocidad de los perfiles del flujo son mayores y sus distancias más bajas, por lo tanto esto significa que el husillo debe girar más rápido para generar esas velocidades lo cual ocasiona una elevación de temperatura por la fricción generada, esto como resultado hace que se reduzcan las fuerzas de atracción entre moléculas y por lo tanto que el fluido fluya más fácilmente, reduciendo la viscosidad.

1.10. Aplicaciones del polipropileno

Las aplicaciones del polipropileno están presentes en varios sectores industriales, por ejemplo:

- Es utilizado para la fabricación de contenedores de agentes de limpieza y productos de primeros auxilios debido a su capacidad de ser inertes ante compuestos ácidos y también bases
- Como es fácil de procesar tiene aplicaciones en la producción de fibras y películas por extrusión
- Es utilizado para la elaboración de envases por inyección y termoformado
- Se aplica en la elaboración de envases de alimentos que requieran una alta resistencia térmica, por ejemplo, para envases de microondas.
- Se usa en menor medida en la fabricación de filamentos 3D considerando aspectos como el warping y su mayor contracción térmica

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Descripción y análisis de la materia prima

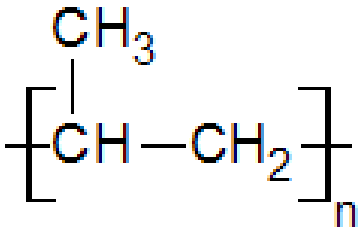
2.1.1. Caracterización del Polipropileno

El polipropileno es un polímero termoplástico de formula (C_3H_6) n conocido por las siglas "PP" que se obtiene mediante la polimerización del propileno que al ser una olefina o un alqueno hace que el polipropileno pertenezca al grupo de las poliolefinas, así mismo este polímero es parcialmente cristalino y tiene una baja densidad.

El polipropileno es un plástico totalmente reciclable, haciendo que su proceso de producción y las tecnologías que emplea sean las de menor impacto ambiental en el campo referido a la producción de plásticos.

Su estructura está conformada por una cadena de monómeros propileno:

Figura 2-1. Estructura molecular del polipropileno



Fuente: (Textos Científicos, 2005)

Para la identificación del material se reciclaron envases de alimentos con la simbología respectiva del polipropileno:

Figura 2-2. Polipropileno PP

Fuente: (PNGWING, s.f.)

2.1.2. Propiedades del Polipropileno

Propiedades físicas

Algunas propiedades físicas del polipropileno homopolimero son:

Tabla II-1. Propiedades físicas del polipropileno

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad PP homopolimero	g/cm^3	0,77 – 0,92
Absorción humedad	%	0,1
Esfuerzo en punto de fluencia	MPa	26
Módulo de elasticidad en tracción	GPa	$1.1 - 1.6$
Alargamiento de rotura en tracción	%	100 - 600
Resistencia al impacto	kJ/m^2	4 - 20
Dureza Brinnel	MPa	50
Temperatura de fusión	ºC	160 - 170
Resistencia a la deformación térmica	ºC	55
Conductividad térmica	W/mK	0,22
Resistencia por deslizamiento		Regular
Desgaste por deslizamiento		Regular

Fuente: (ACPMaterials, 2014)

2.1.3. Propiedades de resistencia química

Tabla II-2. Propiedades de resistencia química del polipropileno

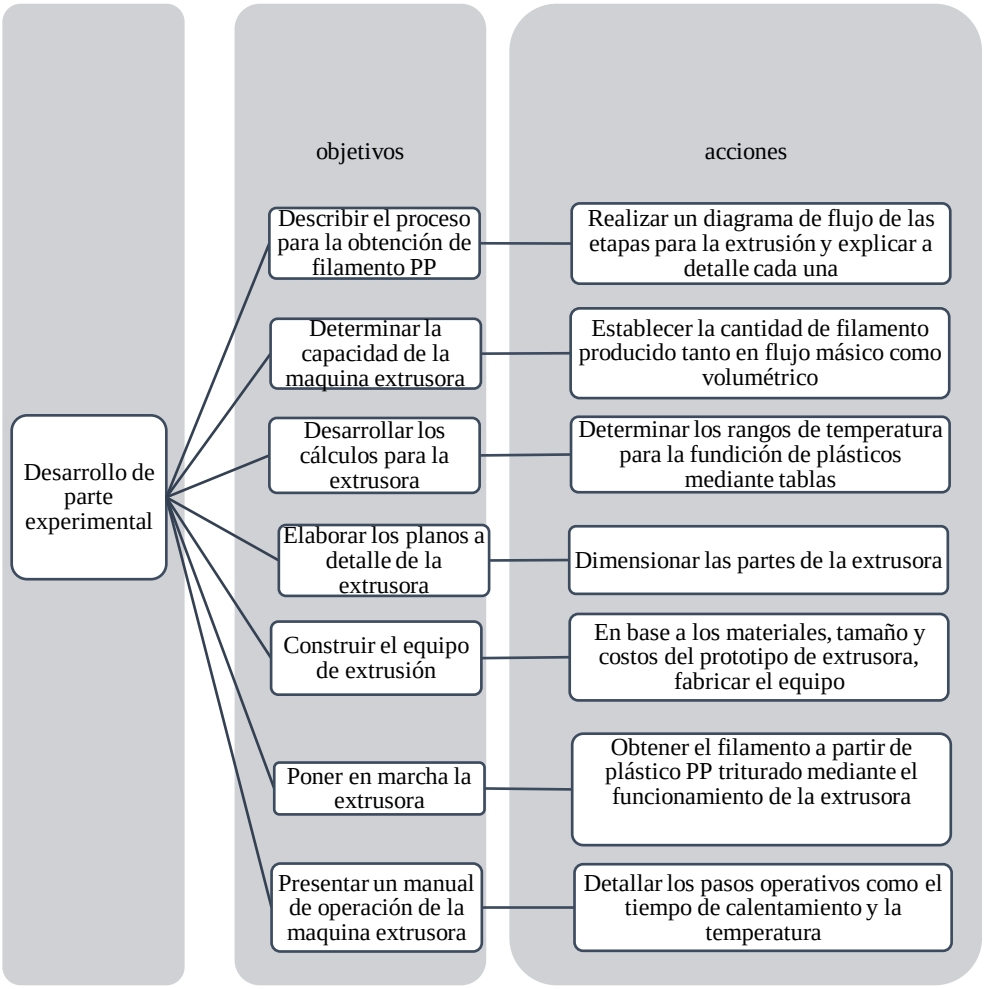
Propiedad	Observación
Resistencia a hidrocarburos halógenos	Buena - Mala
Resistencia a ácidos diluidos-concentrados y álcalis	Buena - Aceptable
Aprobado para contacto con alimentos	Si – Muy Buena
Resistencia a Alcoholes y Cetonas	Buena
Resistencia a grasas y aceites	Buena - Aceptable

Fuente: (Zarate, 2013)

2.2. Objetivos en la parte experimental

En función a los objetivos específicos planteados se tienen las siguientes acciones para la parte experimental:

Figura 2-3. Diagrama de acciones para parte experimental



Fuente: elaboración propia 2024

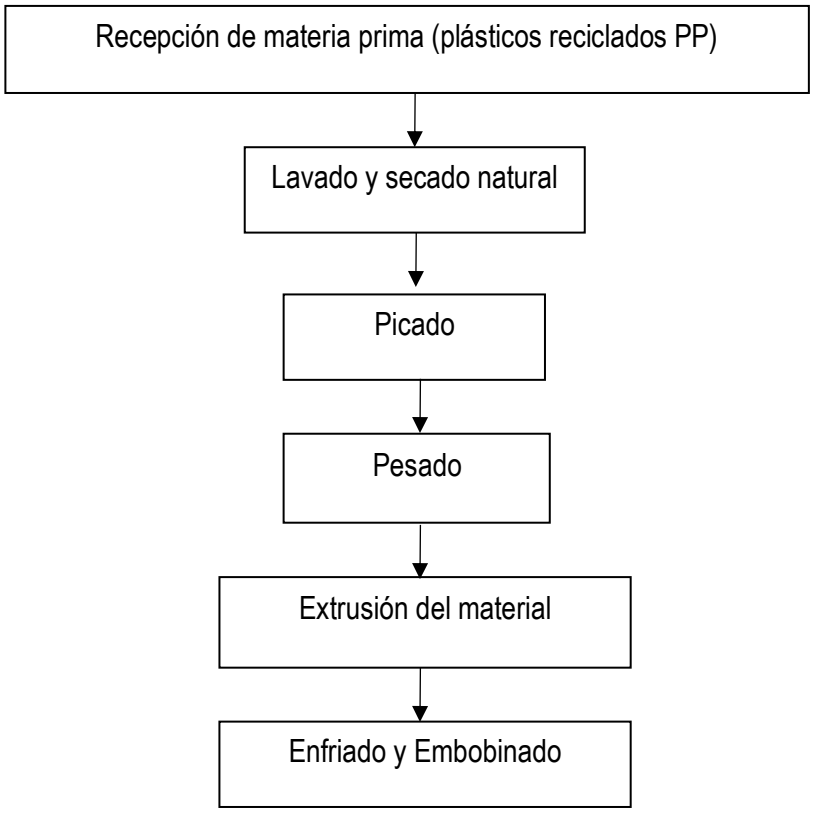
2.3. Descripción del método de investigación

El proceso tecnológico a realizar para la obtención de filamentos 3D es el de la extrusión mediante una extrusora de plástico en partículas, las cuales serán de polipropileno reciclado picado.

A este sistema de extrusión se le añade un sistema de embobinado que consiste en elementos tanto de guía, como lo son los rodamientos y elementos de tensado como lo es el extrusor MK8.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la práctica a realizar:

Figura 2-4. Diagrama de flujo del proceso de obtención de filamentos



Fuente: Elaboración propia, 2024

La materia prima serán envases, por lo tanto, el filamento será a partir de material plásticos reciclado.

Lavado: Los envases por lo general contienen residuos de lo que era su contenido por ejemplo de bebidas carbonatadas o restos de alimentos, por ello se realizará un lavado en un recipiente de plástico para reducir la cantidad de contaminantes y evitar que exista arrastre de partículas en el filamento.

Secado: Debido a que permanecen cantidades de agua procedente del lavado es necesario eliminar la presencia de esta en los envases para que no afecte al peso neto del plástico, esto se realizará mediante el método de secado natural, es decir, poniéndolas al sol al aire libre, así que debe esparcirse correctamente sobre una superficie y evitar que se acumulen uno encima de otro de forma que no se produzca un correcto secado.

Es recomendable almacenar luego de secarlo en un recipiente hermético para evitar la absorción por humedad del ambiente si es que no le sigue un proceso de picado inmediato.

Picado: Consiste en reducir el tamaño del material y obtener partículas, en este caso para que sea posible su ingreso en la extrusora. El picado se realizará de forma manual consiguiendo partículas de un determinado tamaño que por lo general llega a estar entre los 5 mm de largo y ancho en forma de cuadrados.

Pesado: Se realizará el pesado de una determinada cantidad de material picado en una balanza.

Extrusión: El material ingresara en cantidades controladas a la extrusora en funcionamiento de forma que se aprecie una entrada sin obstrucción, luego del proceso de fusión se formarán los filamentos a la salida de la boquilla y serán embobinados y tensionados con los respectivos elementos mencionados previamente para su correcto almacenaje.

Para lograr el proceso se tomaron en cuenta los aspectos fundamentales tanto en partes como en funcionamiento expuestos en el capítulo anterior, con lo cual se diseñó y construyó un prototipo de una extrusora, así mismo se tomaron referencias bibliográficas de modelos de extrusoras como el de Lyman.

2.4. Descripción del proceso de diseño y construcción del prototipo

Para el diseño y construcción del equipo se tomaron referencias de extrusoras realizadas en otros trabajos referidas principalmente al diámetro y largo del tornillo sin

fin, adecuando a este toda la demás estructura, como el cilindro, la resistencia, y la tolva.

Para el diseño de cada componente y parte se hizo uso del software CAD SolidWorks, debido a su facilidad de manejo y accesibilidad para realizar el modelado mecánico de las piezas tanto en 2D como en 3D.

2.4.1. Tornillo sin fin

El tornillo sin fin se dimensionó de acuerdo a relaciones de Longitud-Diámetro (*L/D*), donde según (Triveño, 2020) para la transformación de plásticos en extrusoras se emplean comúnmente relaciones de (*L: D*) = (20;25):1.

Considerando que se trata de un prototipo de extrusora y que su producción no será tan elevada se tomará una relación 20:1 de longitud-diámetro.

De acuerdo a referencias de trabajos similares se tiene que la longitud promedio que se maneja para los tornillos sin fin es cercana a los 40 cm, por lo tanto, el diámetro debe ser de:

$$D = \frac{L}{20} \qquad \text{Ecuación II-1}$$

$$D = \frac{40}{20} = 2cm$$

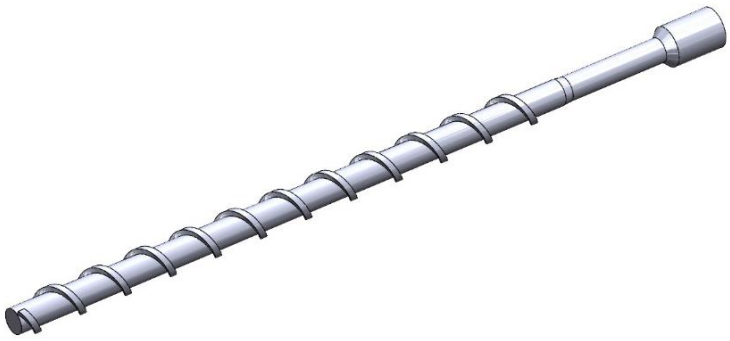
Por otra parte las opciones comerciales de tornillos sin fin disponibles son los tornillos de paso y canal constantes para madera y concreto, sin embargo, los husillos de madera tiene una profundidad de filete más elevada que los de concreto, lo cual hace que sean mejores para la etapa de alimentación pero no para la de dosificación ya que no garantizarían una homogenización correcta, mientras que los de concreto al tener una profundidad de filete más pequeña hace que el plástico se mezcle mejor para una buena homogenización, considerando que la etapa de dosificaciones es más importante que la de alimentación se optó por un tornillo sin fin para concreto de acero inoxidable, de 45 centímetros de largo y de 2,1 cm de diámetro total considerando el filete. Así mismo

la distancia del canal de transporte es de 2,1 cm. Dichas medidas son similares a las determinadas previamente.

Por otra parte, el mantener la profundidad de filete más corta con 3mm de profundidad y de 4 mm de ancho ayuda también a evitar el excesivo ingreso de aire que posteriormente pueda afectar a la calidad del filamento, como por ejemplo con la formación de burbujas de aire.

El tornillo sin fin se observa en la siguiente figura:

Figura 2-5. Tornillo sin fin

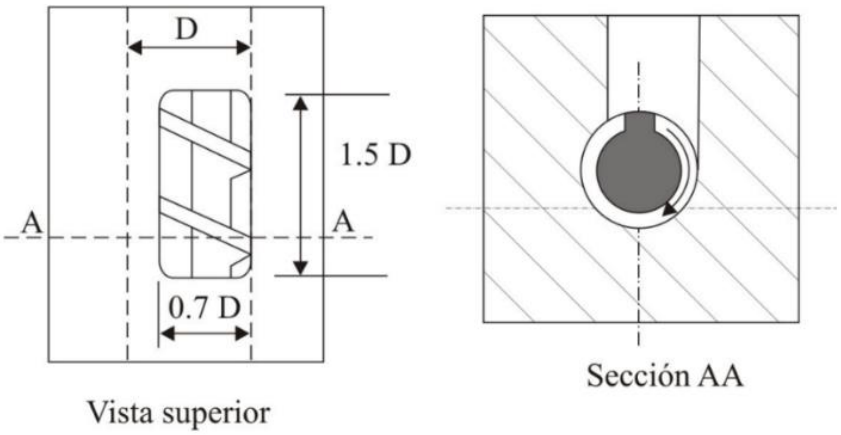


Fuente: Elaboración propia, 2024

2.4.2. Cilindro

El cilindro se diseñó de acuerdo al diámetro del tornillo sin fin debido a que el requisito más importante para este es que se ajuste correctamente al tornillo, por ello debe mantener un espacio máximo de 1 mm entre cilindro y tornillo sin fin, por lo tanto, se tiene un cilindro de acero inoxidable de 2,2 cm de diámetro interno, dejando aproximadamente 0,5 mm de espacio entre ambos. El cilindro consta de 2 partes, una de alimentación y otra de calentamiento, que están acopladas mediante una pieza cilíndrica de acero inoxidable de 2,5cm de largo, esta se ajusta mediante abrazaderas metálicas. Por otra parte, la entrada de alimentación debe tener una longitud de 1,5 veces el diámetro del cilindro y una anchura de 0,7 veces del mismo, de acuerdo a:

Figura 2-6. Relaciones de la entrada de alimentación



Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012)

De acuerdo a los estándares generales el cilindro debe tener una apertura de largo*(La*) y ancho (A) en función del diámetro del tornillo sin fin (*D*) de:

$$La = 1{,}5 \cdot D \qquad \text{Ecuación II-2}$$

$$A = 0{,}7 \cdot D \qquad \text{Ecuación II-3}$$

$$La = 1{,}5 \cdot 2{,}2 = 3{,}3\ cm$$

$$A = 0{,}7 \cdot 2{,}2 = 1{,}54\ cm$$

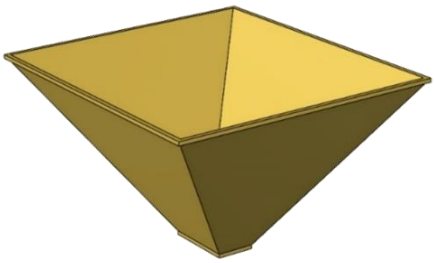
Figura 2-7. Cilindro

Fuente: Elaboración propia, 2024

2.4.3. Tolva

La apertura de la tolva debe coincidir con la entrada de alimentación y considerando que no habrá una alimentación a gran escala se optó por una altura de 10 cm y unas dimensiones de 14x16 cm en la parte superior externa a la alimentación, así mismo esta tolva de acero inoxidable ira sujeta mediante un soporte que la asegure mediante unión bridada al cilindro y también mediante soldadura a la entrada de alimentación.

Figura 2-8. Tolva



Fuente: Elaboración propia, 2024

2.4.4. Resistencia

La resistencia es utilizada para generar la temperatura necesaria dentro del cilindro y permitir la fusión del material, las más utilizadas son las resistencias de bandas y de espirales de alambre, sin embargo, al abarcar una distancia mayor se optó por una resistencia de espirales de 1,5 metros de longitud que está formada por espirales de nicrom recubiertos por material cerámico para evitar cortes, los datos del fabricante especifican que esta es de 400W y es alimentada a corriente alterna de 220V.

Figura 2-9. Resistencia de nicrom

Fuente: Elaboración propia, 2024

2.4.5. Control de temperatura

El controlador de temperatura permite ajustar el valor de la temperatura a uno determinado como “SET Value” o SV, que es el valor al cual se quiere estabilizar el sistema modificando la temperatura mostrada o también conocida como “Point Value” o PV.

El controlador tiene una entrada procedente de un sensor de temperatura que comúnmente es una termocupla y tiene una salida que está conectada a un elemento de control que será la resistencia, entonces de esta forma el controlador toma un valor a partir del sensor y en base a esta actúa para controlar el comportamiento de la resistencia.

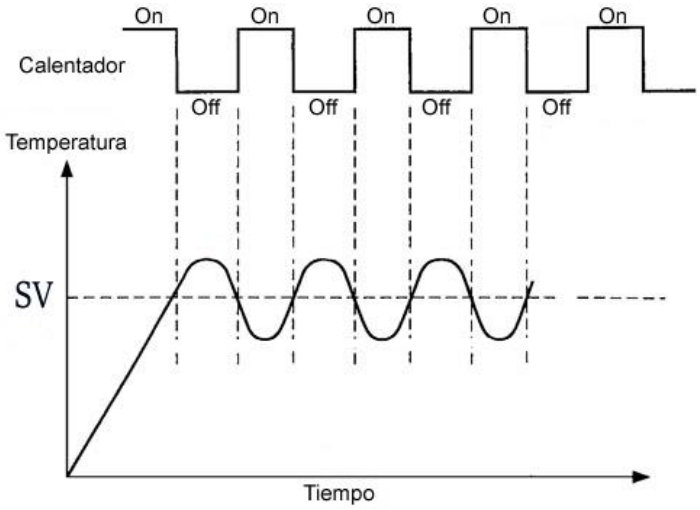
El ajuste de la temperatura puede darse de 2 formas según el controlador, en algunos incluso se puede gestionar ambas formas, estas son el control On/Off y el control en modo PID.

Control On/Off

Como su nombre lo indica este tipo de control actúa de forma más sencilla que el PID, y es que consiste en mantener el sistema apagado o prendido según el set value SV, por ejemplo, cuando el PV supera dicho valor el controlador apaga la resistencia mientras que si se encuentra por debajo del valor el controlador mantendrá prendida la resistencia.

Sin embargo, este modo de control puede resultar poco conveniente cuando la inercia del sistema sea alta, esto quiere decir que al momento de llegar al SV el sistema no se detiene de inmediato y esto se puede observar mediante el overshot que es el sobrepaso del valor establecido, de la misma manera ocurre al momento de reactivar el sistema, por lo cual el PV baja más de lo establecido y de esta manera el comportamiento puede verse reflejado mediante una onda constante que oscila en el SV pero no lo llega a mantener constante.

Figura 2-10. Control On/Off



Fuente: (Martinez, 2017)

Control PID

El control proporcional integral derivativo (PID) a diferencia del control On/Off utiliza 3 variables para el control que son:

- P: Es el control proporcional, que reacciona al error de corriente.
- I: Es el control integral, que aborda errores acumulados en el pasado.
- D: Es el control derivado, que predice errores futuros.

Mediante estos 3 controles el sistema ajusta la salida para mantenerla cercana al SV.

El controlador de temperatura seleccionado para la extrusión fue el modelo REX-C700 que tiene una salida a Relay o también conocido como contactor magnético y una alimentación a 220 V, su rango de control se encuentra desde 0 hasta 1300ºC lo cual hace que este dentro del rango de temperaturas con las que se trabajara que oscilan entre los 170 y 200ºC.

Este controlador tiene ambos modos de control de temperatura por lo que se optó por el PID ya que presenta mayor estabilidad en el sistema.

Figura 2-11. Controlador de temperatura Rex C700

Fuente: (Tekne, 2023)

2.4.6. Motorreductor

El motor reductor es el que permite el movimiento del husillo y por lo tanto el transporte del material plástico, para determinar el motorreductor adecuado se calculó la potencia de accionamiento y las revoluciones del tornillo sin fin.

Para las revoluciones por minuto se tiene la siguiente formula:

$$N = \frac{\gamma \cdot h}{\pi \cdot D} \qquad \text{Ecuación II-4}$$

Donde:

γ: Velocidad de cizallamiento (1/s)

D: Diámetro del husillo (mm)

N: Velocidad angular del husillo (rev/seg)

h: Altura de filete en la zona de dosificación (mm)

La velocidad de cizallamiento es la velocidad a la que una capa de un fluido o material se mueve en relación con una capa adyacente cuando estas capas están sujetas a una fuerza que las desplazan, para el cálculo de esta velocidad se tiene la siguiente tabla:

Tabla II-3. Rango de velocidades de cizalla en diversos procesos

Situación	Velocidad de cizalla (s^{-1})	Ejemplos
Sedimentación de partículas finas en líquidos	$10^{-6} – 10^{-3}$	Medicinas, pinturas, aderezos de ensalada
Extrusores	$10^{0} – 10^{2}$	Polímeros, alimentos, semisólidos
Masticación y tragado	$10^{1} – 10^{2}$	Alimentos
Mezclado y agitación	$10^{1} – 10^{3}$	Procesado de líquidos
Flujo en tuberías	$10^{0} – 10^{3}$	Bombeo de líquidos, flujo de sangre
Cepillado	$10^{3} – 10^{4}$	Pinturas
Frotado	$10^{4} – 10^{5}$	Cremas para la piel, lociones
Rociado	$10^{5} – 10^{6}$	Atomización, "sprays"
Lubricación	$10^{3} – 10^{7}$	Cojinetes, motores

Fuente: (Hernández, 2010)

Los valores correspondientes para la extrusión están entre los 1 s^{-1} y 100s^{-1}, de los cuales, según referencias bibliográficas, para polímeros se ocupa el rango entre 20s^{-1} y 50s^{-1}, por lo tanto, se toma como valor de velocidad de cizallamiento los 20 s^{-1}.

Por lo tanto, se tienen los siguientes valores:

$\boldsymbol{\gamma}$=20 1/s

D: 21 mm

N: Velocidad angular del husillo (rev/seg)

h: 3 mm

$$N = \frac{20\ s^{-1} \cdot 3mm}{\pi \cdot 21mm}$$

$$N = 0{,}91\ rev/s$$

$$N = 0{,}91 \frac{rev}{s} * \frac{60s}{1min}$$

$$N = 54{,}56\ rpm$$

Para la potencia requerida se tiene la siguiente formula:

$$P = \frac{N \cdot \pi \cdot D^3}{K^2}$$ Ecuación II-5

Donde:

P: Potencia requerida (W)

D: Diámetro del husillo (mm)

N: Revoluciones del husillo (rpm)

K: Factor de proporcionalidad, igual a 66.7

$$P = \frac{54{,}56 \cdot \pi \cdot 21^3}{66{,}7^2}$$

$$P = 356{,}8W$$

$$P = 356\ W * \frac{1\ Hp}{745{,}7W} = 0{,}47\ Hp$$

Por lo tanto, el motorreductor deberá tener una potencia de al menos 0,47 Hp y una velocidad de 54,56 rpm. Con las características definidas para el motor se seleccionó un motorreductor de 0,5 Hp que mediante su caja reductor permite el funcionamiento a 60 rpm, para su unión al husillo se utilizó una junta de acoplamiento universal que evita los movimientos por desnivel y también se requirió uniones soldadas para el husillo.

Figura 2-12. Motorreductor

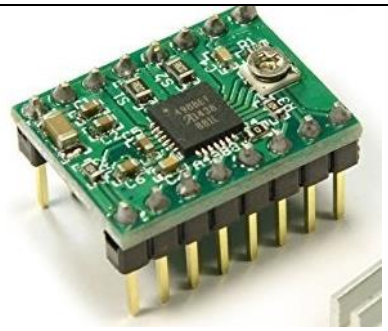
Fuente: Elaboración propia, 2024

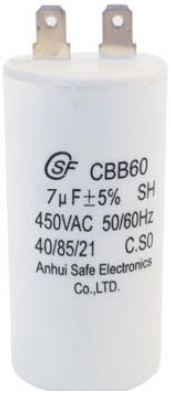
2.5. Especificaciones técnicas de los equipos y controladores utilizados para el prototipo

Tabla II-4. Especificaciones técnicas de equipos y controladores

Nro	Equipo/controlador		especificaciones
1	Motorreductor		Motor monofásico 0,5Hp con caja reductora a 60 rpm
2	Contactor magnético NXC-09		- Marca: CHINT Next - Estándares conformes: IEC / EN 60947-1, IEC / EN 60947-4-1, IEC / EN 60947-5-1. - Corriente nominal de funcionamiento Ie: 6A ~ 630A - Voltaje de operación nominal Ue: 220V ~ 690V - Voltaje de aislamiento nominal: 690 V (NXC-06M ~ 100), 1000 V (NXC-120 ~ 630) - Número de polos: 3P y 4P (solo para NXC-06M ~ 12M) - Método de control de la bobina: CA (NXC-06 (M) ~ 225), CC (NXC-06M ~ 12M), CA / CC (NXC-265 ~ 630) - Método de instalación: instalación de riel y tornillo NXC-06M ~ 100,Instalación de tornillos NXC-120 ~ 630
3	Controlador de temperatura REX-C700		- Modelo: REX-C700FK02 - Ambiente de trabajo: 0 - 50, 30-80 (por ciento) RH (sin gas corrosivo) - Precisión: (más menos) 0.5 (por ciento) FS - Voltaje: 220VAC 50/60Hz - Entrada: K - Tamaño: 67 * 67 * 110 mm - Tamaño de Cabeza Frontal: 72 x 72 x 12 mm

4	Fuente Switching		-Voltaje de salida del canal 1: 12 VDC -Número de salidas: 1 salida -Potencia de salida: 60 W -Voltaje de entrada:220V AC -Corriente de salida del canal 1: 5 A -Estiло de montaje: Chasis -Longitud: 110 mm -Anchura: 79 mm -Altura: 36 mm -Serie: S-60-12
5	Potenciometro		-Tipo: lineal único (tipo B) -Eje: moleteado de 6mm -Valor de resistencia: 20Kohm -Números de Pin: 3 -Diámetro del eje: 6mm -Longitud del eje: 15mm -Diámetro de la rosca de montaje: 7mm
6	Controlador de velocidad PWM		-Proporcionar entrada de voltaje: 6V - 28VDC -Potencia de salida máxima: 80w -Corriente de salida continua máxima : 3A -Servicio ajustable : 5% - 100%
7	Motorreductor DC de Alto Torque		-Motor 25 RPM -Modelo: JGY370 -Voltaje: 12VDC -Velocidad: 25 RPM -Corriente: 1 A -Torque: 6 Kg-cm -Peso: 163g
8	Arduino Uno R3		-Microcontrolador ATmega328. -Voltaje de entrada 7-12V. -14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM). -6 entradas análogas. -32k de memoria Flash. -Reloj de 16MHz de velocidad.

9	A4988 Driver Stepper		-Interfaz de paso simple y control de dirección -Cinco resoluciones diferentes: paso completo, medio paso, cuarto paso, 1/8 de paso y 1/16 de paso -Control ajustable de corriente que permite fijar la máxima salida de corriente con un potenciómetro, lo cual permite a su vez usar tensiones por encima de la especificación de voltaje del motor de paso para lograr tasas de paso más altas -Control de apagado térmico en caso de generar alta temperatura -Placa de 4 capas, cobre de 2 oz para una mejor disipación de calor -Pad de tierra expuesto y soldable debajo del chip driver, en la parte inferior de la placa
10	Ventilador DC		Tamaño: 4010 40x40x10mm Voltaje nominal: 12V Velocidad máxima: 4000rpm Flujo de aire máximo: 2.9CFM Ruido: 20db Peso: 14.1g Dirección de soplado: Axial Vida útil: 30000 h.
11	Capacitor Electrolítico		-Tipo de condensador: Electrolítico -Capacidad: 56µF -Tensión de trabajo: 100V CC -Dimensiones de cuerpo: 10 x 9.3mm -Diámetro terminales: 0.4mm -Temperatura de trabajo: -25 a 105°C

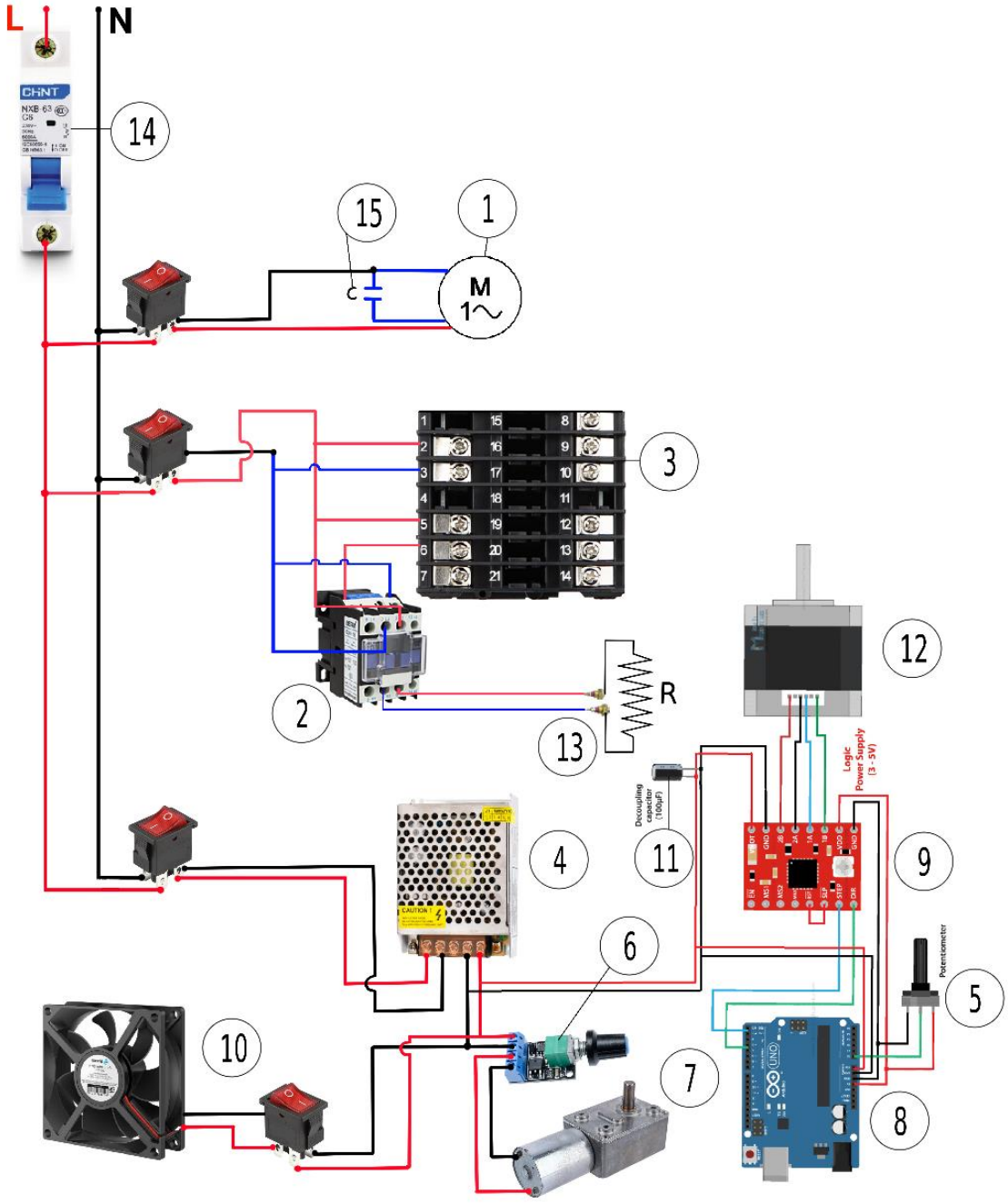
12	Motor paso a paso nema17		-Resolution: 200 steps/rev (1.8 °) -voltage nominal: 2,8 V -consumo de corriente por bobina: 1,7 A -resistencia de la bobina: 1.65 Ω -inductancia de la bobina: 3.2 mH -torque 4.0 kg*cm (0.4 Nm) -cableado: bipolar (four wires) -diámetro del eje: 5 mm -peso: 280 g -Standard: NEMA 17 Cableado: Azul: A Rojo: A - Verde: B Negro: B -
13	Resistencia de nicrom		Resistencia de alambre de nicrom en espiral recubierta con cilindros cerámicos -Longitud: 1m -Voltaje: 220V Potencia: 400W
14	Interruptor termomagnético		-Interruptor termomagnético 1x2A con poder de ruptura (Icu) de 20kA a 230VAC y 10kA a 440VAC -Corriente nominal de ruptura (Icn) 6kA a 230/400VAC según norma IEC 60898
15	Capacitor de arranque		-Modelo: CBB60. -Material : Película de polipropileno. -Capacitancia: 7 μF. -Tolerancia : 5%. -Frecuencia nominal: 50/60 Hz. -Voltaje nominal: 450 VAC. -Tamaño (aproximado): 50x30mm -Color: Blanco -Peso: 28.8 g

Fuente: Elaboración propia, 2024

2.6. Sistema de conexiones

Las conexiones realizadas siguen el esquema planteado en la siguiente figura

Figura 2-13. Diagrama de conexiones eléctricas a 220V



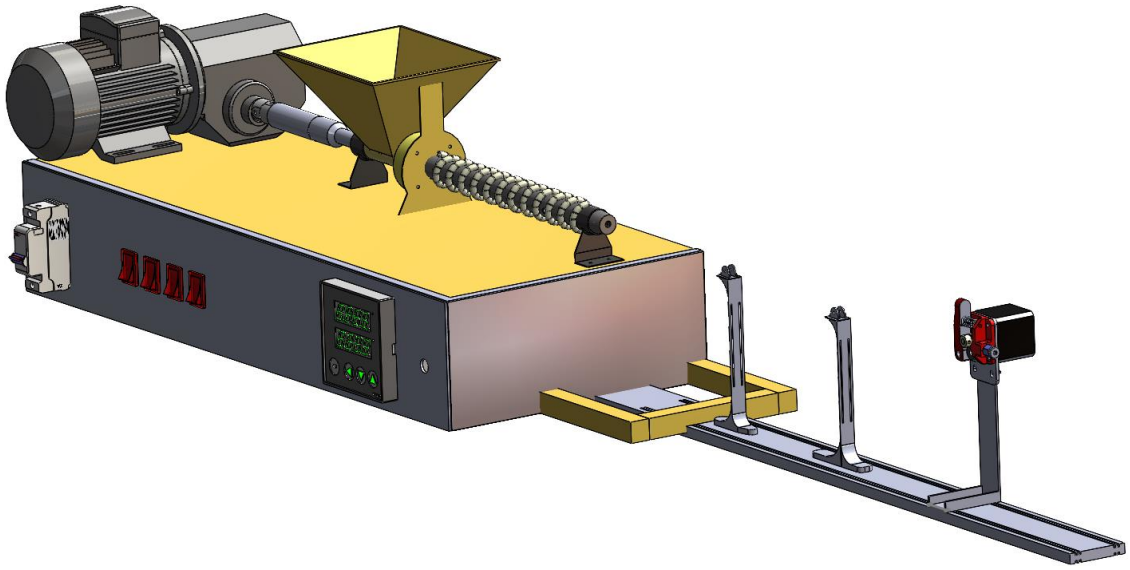
Fuente: Elaboración propia, 2024

2.7. Soportes y base

Tanto el sistema de embobinado como la extrusora se ubicaron sobre una base que también funciona como tablero de conexiones para ubicar todo lo que respecta a los elementos de control como el controlador de temperatura o el potenciómetro para controlar la velocidad, además se tienen soportes adicionales para mejorar la estabilidad del equipo y reducir las vibraciones y movimientos generados principalmente por el motorreductor y el contactor magnético.

Finalmente se tiene el diseño general elaborado para la extrusora de plástico junto con su sistema de embobinado y de refrigeración dado por la ventiladora ubicada cerca de la boquilla a la salida del filamento y tanto el sistema eléctrico como sus componentes referidos al controlador de temperatura y los interruptores están mostrados en la siguiente figura del equipo:

Figura 2-14. Ensamblado de la extrusora



Fuente: Elaboración propia, 2024

Las especificaciones más importantes se resumen en la siguiente tabla:

Tabla II-5. Dimensiones y especificaciones de la extrusora

Longitud de cilindro	30 cm
Diámetro de tornillo sin fin	2,1 cm
Longitud de sistema de embobinado	66 cm
Diámetro de boquilla	2mm
Longitud de resistencia	1 m
Velocidad motorreductor	60 rpm
Dimensiones de entrada de alimentación	1,54x3,3 cm

Fuente: Elaboración propia, 2024

2.8. Determinación del flujo volumétrico del extrusor

Para la determinación del flujo volumétrico se tiene la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{1}{2}\pi^2 * D^2 * N * h * Sen(\theta) * Cos(\theta) \qquad \text{Ecuación II-6}$$

Con los siguientes datos:

D=0,021m

N=0,91 rev/seg

h=0,003m

Θ=5º

$$Q = \frac{1}{2}\pi^2 * 0{,}021^2 * 0{,}91 * 0{,}003 * Sen(5) * Cos(5)$$

$$Q = 5{,}158 \cdot 10^{-7}\ m^3/s$$

2.9. Determinación flujo másico polipropileno

Para el flujo másico se utiliza el valor de densidad de 770 kg/m3 y el flujo volumétrico de $5{,}158 \cdot 10^{-7}\ m^3/s$ por lo cual:

$$\dot{m} = 5{,}158 \cdot 10^{-7}\ \frac{m^3}{s} * 770 \frac{kg}{m3}$$

$$\dot{m} = 4{,}643 \cdot 10^{-4}\,\frac{kg}{s} = 1{,}42\,\frac{kg}{h}$$

Determinación de presión

Para determinar la presión a la que se opera se parte de la siguiente ecuación:

$$Q = k \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \qquad \text{Ecuación II-7}$$

Donde:

Q: caudal volumétrico m3/seg

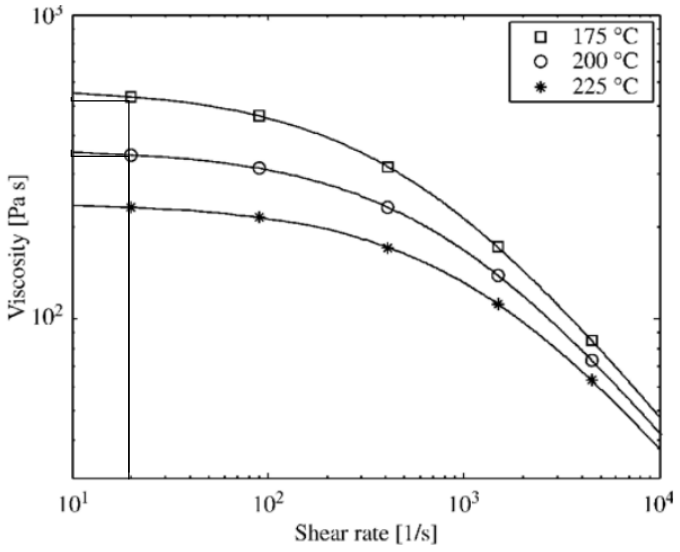
μ: Viscosidad Pa*s

k: constante que depende del orificio de la boquilla

Δ***P***: variación de la presión a la entrada y salida de la boquilla

La viscosidad se determina con la gráfica de velocidad de cizallamiento con temperatura dando para 175ºC un valor de 510 Pa*s mientras que para 200ºC es de 350 Pa*s

Figura 2-15. Determinación de viscosidades



Fuente: Elaboración propia, 2024

El cálculo de k está determinado según la siguiente tabla:

Tabla II-6. Expresiones k para distintas formas de boquilla

Descripción	Expresión de k
Boquilla circular de radio R, longitud L (obtención de láminas cilíndricas)	$k = \frac{\pi R^4}{8L}$
Boquilla plana, de profundidad H, anchura W y longitud L (obtención de láminas planas)	$k = \frac{WH^3}{12L}$
Boquilla anular, de diámetro externo R0, diámetro interno R1, longitud L (obtención de forma de tubos)	$k = \frac{(R_0 + R_1) * (R_0 + R_1)^3}{12L}$

Fuente: (Gutiérrez, 2014)

Como se trata de una boquilla para perfiles cilíndricos se tiene una de 3,4mm de diámetro, por lo tanto:

R=0,0017m

Lb=0,006m

$$k = \frac{\pi R^4}{8L} = \frac{\pi * 0{,}0017^4}{8 * 0{,}006} \qquad \text{Ecuación II-8}$$

$$k = 5{,}46 \cdot 10^{-10}\ m^3$$

Para la diferencia de presión se tomará en cuenta la viscosidad a 200ºC que es de 350 Pa*s

$$\Delta P = \frac{Q \cdot \mu}{k} \qquad \text{Ecuación II-9}$$

$$\Delta P = \frac{5{,}158 \cdot 10^{-7}\ \frac{m^3}{s} \cdot 350\ Pa * s}{5{,}46 \cdot 10^{-10}\ m^3}$$

$$\Delta P = 330251{,}7\ Pa$$

Si a la salida se tiene presión atmosférica de 101325Pa, la presión dentro de la extrusora es de:

$$\Delta P = P2 - P1$$

$$330251{,}7 = P2 - 101325$$

$$P2 = 431576{,}7\ Pa$$

2.10. Descripción del funcionamiento del equipo

2.10.1. Control de temperatura

El prototipo de extrusora cuenta con un sistema de calentamiento basado en una resistencia de alambre de nicrom, esta es controlada por un controlador de temperatura Rex-C700 el cual es el encargado de recibir la información que brinda la termocupla instalada de tipo K, la cual está conectada a la superficie del cilindro. Por otra parte, el controlador hace uso de un contactor magnético para regular la entrada de pulsos a la resistencia, de esta forma se hace un control PID del sistema de calentamiento, donde lo ideal es mantener una temperatura de entre 176ºC hasta los 220ºC según el polímero.

2.10.2. Fusión del material

La fusión del material se produce dentro del cilindro gracias al desplazamiento generado por el movimiento del husillo y al calentamiento de las partículas de plástico, así mismo es importante que el material sea previamente picado y pesado, de esta forma se garantiza que pasará por las 3 zonas de formación, siendo la primera la de transporte de partículas aun en estado sólido pero incrementado la temperatura, luego pasan por una zona de transición donde el material comienza a fundirse y volverse fluido y finalmente una zona de dosificación donde el material se homogeniza y elimina la presencia de burbujas de aire que podrían llegar a formarse en anteriores zonas. En la extrusora la parte más importante es la zona de dosificación la cual se logra dejando un espacio considerable entre la punta del husillo y la boquilla, para que de esta forma se acumule y mezcle el polímero hasta que exista una cantidad suficiente para expulsar por presión el material a través de la boquilla.

Figura 2-16. Preparación de muestra para la fusión

Fuente: Elaboración propia, 2024

2.10.3. Enfriamiento

La refrigeración se da mediante el ventilador instalado a la salida de la extrusora, este permite aumentar la densidad del filamento y reducir su capacidad de adherencia a superficies dada por la temperatura que maneja a su salida de la boquilla, de ahí que sea necesario enfriarlo, además es necesaria para que el filamento mantenga una forma caracterizada por una superficie transversal en forma de circulo y que no sea deformada en el proceso de embobinado.

2.10.4. Embobinado

El proceso de embobinado funciona mediante un motor paso a paso que acciona un sistema de tensionado que está conformado por una pieza que genera fricción entre el filamento, un elemento rotor y un rodamiento, de esta forma se consigue una tensión constante según la velocidad del motor.

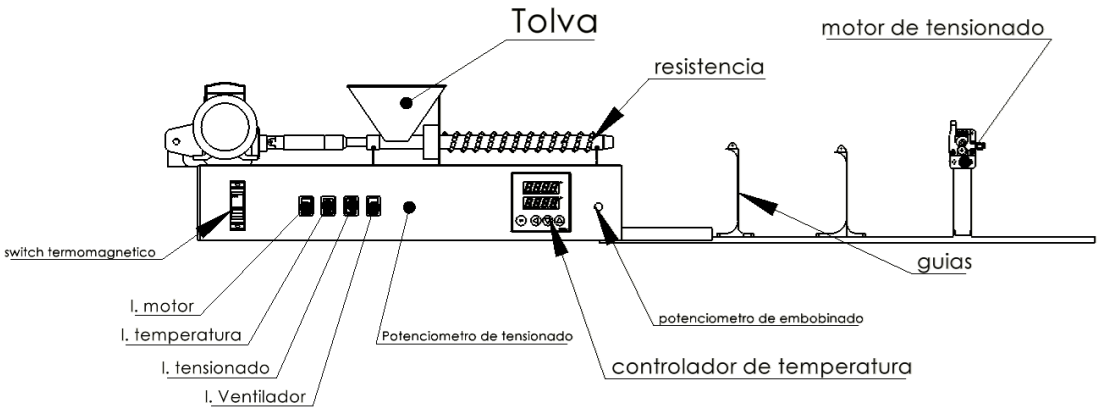
La velocidad de tensionado será la variable a controlar para obtener distintos diámetros de filamentos, y eso se logra mediante la conexión a un sistema Arduino UNO el cual mediante un potenciómetro permitirá regular la velocidad del motor. Este sistema también cuenta con guías formadas por rodamientos las cuales permitan la orientación

correcta del material y evita el encorvamiento excesivo del filamento que posteriormente genera atascos en la optación de embobinado y tensionado.

2.11. Puesta en marcha del extrusor

Para la puesta en marcha del equipo se reconocen las siguientes partes del equipo:

Figura 2-17. Partes de la extrusora



Fuente: Elaboración propia, 2024

Para empezar, se verifica que el equipo entre conectado a una fuente de 220V o red monofásica, luego, en caso de que el interruptor termo magnético este apagado, se acciona el interruptor para permitir el flujo de corriente por la fase.

Luego de la verificación se debe accionar el interruptor del controlador de temperatura, esto hará que se comience a calentar el cilindro mediante la resistencia y se podrá observar en el controlador una pantalla donde se debe establecer el SV o valor deseado para la temperatura de operación, según la imagen:

Figura 2-18. SV de temperatura de operación

Fuente: Elaboración propia, 2024

Para el correcto funcionamiento del equipo se debe esperar alrededor de 8 a 11 minutos dependiendo de la temperatura, estos son los tiempos necesarios para que el valor de temperatura PV sea igual al establecido SV, de esta forma se garantiza que se estabilice la extrusora y no exista una obstrucción interna. Este tiempo se determinó mediante pruebas, de donde se obtuvo el siguiente promedio:

Tabla II-7. Datos de tiempo de calentamiento

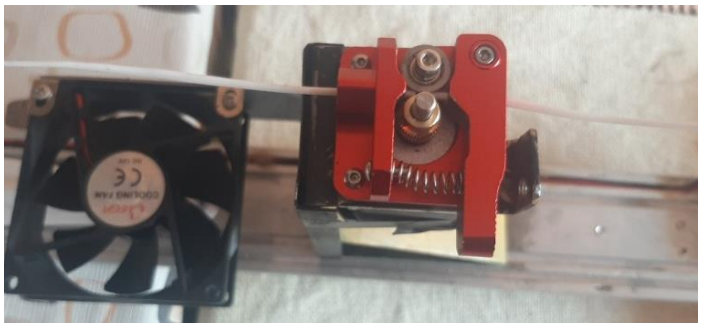
Nro	Tiempo de calentamiento desde 25ºC hasta 176ºC minutos	Tiempo de calentamiento desde 25ºC hasta 196ºC minutos
1	6:15	10:44
2	7:34	10:23
3	6:45	9:57
4	8:05	9:41
5	6:57	11:33
6	7:21	10:15
7	7:14	10:50
8	7:39	9:59
Promedio	7:13 min	10:25 min

Fuente: Elaboración propia, 2024

Luego se acciona el motor mediante su respectivo interruptor e igualmente debe esperarse un determinado tiempo en caso de que expulse restos de polímero provenientes de operaciones pasadas, en caso de no apreciarse salidas de material por la boquilla se procede a ingresar el plástico picado y determinado en cuanto a peso.

Una vez que se aprecie la salida de filamento se acciona el sistema de refrigeración y embobinado mediante sus interruptores establecidos, luego se lleva el filamento a través de las guías hasta ajustarlo correctamente al tensionado.

Figura 2-19. Tensionado del filamento



Fuente: Elaboración propia, 2024

Una vez que el filamento se encuentre extendido a través de las guías se ajusta la velocidad del motor de tensionado para regular el diámetro de filamento, este proceso suele demorar en encontrar el equilibrio para un diámetro de 1,75mm por lo cual se debe considerar una cantidad suficiente de filamento para una operación del alrededor de 1 hora lo cual es el tiempo de operación óptimo para el equipo antes de que exista un sobrecalentamiento en el motor y equipo en general por el calor disipado por la resistencia. Finalmente, luego del tiempo de operación se debe esperar alrededor de 2 hrs, según la siguiente tabla de promedio de tiempo de enfriamiento del motor, para volver a utilizar el extrusor:

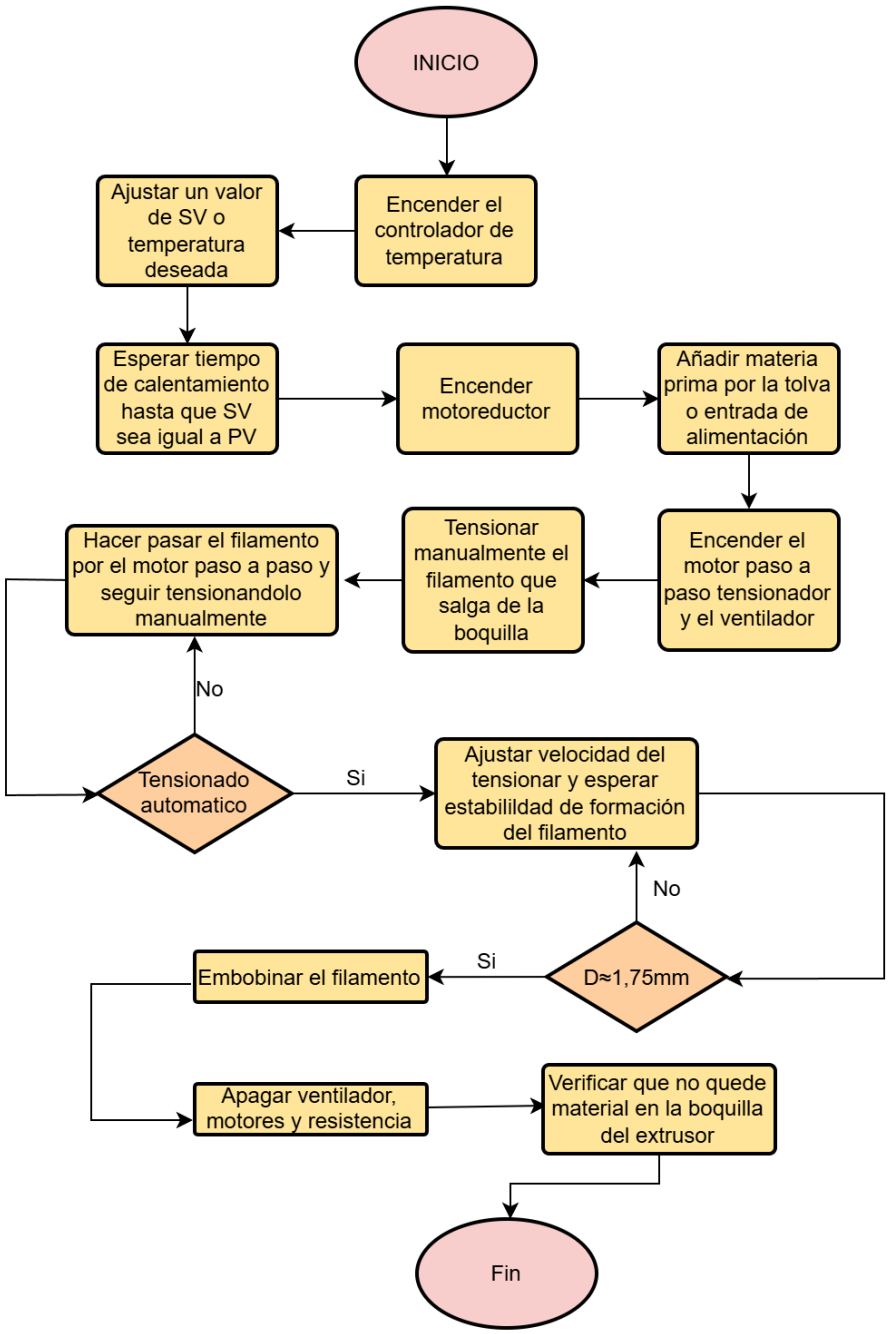
Tabla II-8. Datos de tiempo de enfriamiento

Nro	Tiempo de enfriamiento (hrs) hasta Tamb. 25ºC
1	2:30
2	1:50
3	2:10
4	2:40
5	1:45
6	3:00
7	2:15
8	2.20
Promedio	2:17 hrs

Fuente: Elaboración propia, 2024

Mediante lo expuesto previamente se puede plantear el siguiente algoritmo de operación del equipo:

Figura 2-20. Algoritmo para el control operativo



Fuente: Elaboración propia, 2024

2.12. Descripción del procedimiento para tomar muestra

La toma de muestras del filamento se base en la medición de su diámetro, para ello se hizo uso de un calibre vernier digital que permite tomar muestras y leerlas de forma rápida sin alterar el flujo del material. Considerando que inicialmente el filamento que sale por la boquilla presenta alteraciones considerables, como por ejemplo cambios bruscos de diámetro o curvaturas pronunciadas se debe esperar a que exista una estabilidad en la consistencia y tamaño del filamento para tener una buena similitud en los valores medidos, los cuales se considera optimo leerlos cada 30 segundos.

El punto de toma de mediciones será luego del elemento de tensionado para evaluar el resultado final del filamento y para evitar estar en contacto con zonas más calientes del mismo como lo sería cerca de la boquilla de salida.

Figura 2-21. Toma de muestras con vernier

Fuente: Elaboración propia, 2024

Por otra parte, el diámetro está en función de la velocidad de tensionado por lo cual se utilizó un potenciómetro que permite regular dicho valor y expresarlo en revoluciones por minuto, para el caso de mantener un diámetro de 1,75mm de filamento la modificación de este valor será solo en los momentos donde se vea un incremento o reducción del diámetro, casos en los cuales se tendrá que variar la velocidad para ajustar el diámetro.

Figura 2-22. Ajuste de RPM

Fuente: Elaboración propia, 2024

Los resultados serán registrados mediante una hoja de cálculo en Excel con el objetivo de analizar la variación del diámetro del filamento y el promedio obtenido de todas las mediciones y de la misma forma para los resultados de la velocidad del motor de tensionado en rpm.

2.13. Diseño factorial

En este diseño se investiga todas las combinaciones posibles entre los niveles de los factores para estudiar el comportamiento y las condiciones más optimas de trabajo, para ello se debe definir en primer lugar las variables para el proceso.

2.13.1. Selección de Variables del Proceso Factorial

El aspecto más importante a la hora de obtener filamento para impresión 3D es el diámetro del filamento, ya que de este depende que al momento de imprimir un objeto exista una correcta distribución y adherencia entre capas, según datos de filamentos

comerciales el más común es de 1,75mm, pero también están presentes en el mercado los de 3 a 2,85 mm. Por otra parte, se tiene que la temperatura a la cual se da la extrusión viene dada por las temperaturas de fusión de los distintos polímeros.

Finalmente, otra variable de gran importancia es la velocidad de tensionado, por lo tanto, esta última condición será tomada en cuenta para el diseño factorial.

Tabla II-9. Variables independientes y dependiente del proceso del proceso

Nro	Variable	Clase	unidad
1	Temperatura	Independiente	ºC
2	Velocidad tensionado	Independiente	rpm
3	Diámetro de filamento	Dependiente	mm

Fuente: Elaboración propia, 2024

2.13.2. Diseño Factorial 2k

El diseño seleccionado para el sistema 2k es el diseño 2^2, el cual tiene como modelo de regresión la siguiente ecuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \qquad \text{Ecuación II-10}$$

donde:

y: Modelo de regresión

X_1; X_2: Variables codificadas

β: Coeficientes de regresión

ε: Error

Por otra parte, para la estimación y conocimiento de la significancia de los efectos se tienen las siguientes formulas:

Efecto A

$$A = \frac{1}{2n}\{[a + ab] - [(1) + b]\}$$

Efecto B

$$B = \frac{1}{2n}\{[b + ab] - [(1) + a]\}$$

Efecto AB

$$A * B = \frac{1}{2n}\{[(1) + ab] - [a + b]\}$$

Donde:

n: Número de réplicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

b: Resultado del tercer tratamiento

ab: Resultado del cuarto tratamiento

Para el análisis de la varianza, por su parte, se tienen las siguientes fórmulas de suma de cuadrados:

$$SS_A = \frac{\{[a + ab] - [(1) + b]\}^2}{4n}$$

$$SS_B = \frac{\{[b + ab] - [(1) + a]\}^2}{4n}$$

$$SS_{AB} = \frac{\{[(1) + ab] - [a + b]\}^2}{4n}$$

Donde

SS: Suma de cuadrados

n: Número de réplicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

b: Resultado del tercer tratamiento

ab: Resultado del cuarto tratamiento

El diseño 2^2, como lo indica su nombre tiene dos factores, cada uno con 2 niveles, los cuales codificados resultan en la siguiente tabla:

Tabla II-10. Codificación de variables

Variables	**Nivel**	
	Bajo	**Alto**
Temperatura ºC	-	+
Velocidad tensionado (rpm)	-	+

Fuente: Elaboración propia, 2024

Como se aplicará el diseño 2^k y serán 2 factores con 2 niveles se tiene que el número de experimentos son en total 4, de acuerdo a: Número de experimentos: $2^2 = 4$

Para dos réplicas realizadas del tratamiento se tiene la siguiente tabla de diseño factorial propuesta con 8 experimentos en total:

Tabla II-11. Diseño factorial para el proceso de extrusión

Nº de Exp.	Temperatura ºC	Velocidad tensionado (rpm)	**Diámetro de filamento (mm)**
1	+	-	D1
2	+	+	D2
3	-	-	D3
4	-	+	D4
5	+	-	D5
6	+	+	D6
7	-	-	D7
8	-	+	D8

Fuente: Elaboración propia, 2024

A partir del diseño se obtendrán valores de diámetros D para cada prueba, los cuales serán medidos para observar variaciones.

Por lo tanto, los valores seleccionados de temperatura y velocidad son:

Tabla II-12. Selección de niveles de variables

Variables	**Nivel**	
	Bajo	**Alto**
Temperatura ºC	176	196
Velocidad tensionado (rpm)	18	36

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla II-13. Diseño factorial para el proceso de extrusión

Nº de Exp.	Temperatura ºC	Velocidad tensionado (rpm)	**Diámetro de filamento (mm)**
1	196	18	D1
2	196	36	D2
3	176	18	D3
4	176	36	D4
5	196	18	D5
6	196	36	D6
7	176	18	D7
8	176	36	D8

Fuente: Elaboración propia, 2024

A partir del diseño se obtendrán valores de diámetros D para cada prueba, los cuales serán medidos para observar variaciones.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados obtenidos en el diseño factorial

3.1.1. Resultados cualitativos

El filamento obtenido de polipropileno en los experimentos realizados fue utilizado para impresión 3D de distintas piezas, de lo cual se observó que cuenta con una buena resistencia, además de una gran transparencia y brillo apreciable para todos los casos de estudio por lo que no existe una gran diferencia entre los rangos de temperatura o de tensionado con respecto a la calidad del filamento.

Figura 3-1. Filamentos y piezas 3D obtenidas

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.1.2. Resultados cuantitativos

Para las condiciones de alimentación se contó con 100gr de polipropileno, procurando que su ingreso sea en cantidades reducidas para evitar atascos o sobre esfuerzo del motor al transportar una cantidad mayor, luego de acuerdo al diseño factorial se realizaron 2 réplicas del mismo con 8 experimentos en total, midiendo con un vernier cada 30 segundos el diámetro del filamento. Con ello se tomaron los siguientes resultados de medidas de diámetro, considerando que el sistema se estabilice para evitar medidas fuera de orden:

Tabla III-1. Resultados obtenidos de diámetro para replica 1

	196ºC		176ºC	
	18rpm	36rpm	18rpm	36rpm
Diámetro mm	1,8	1,1	1,7	1,6
	1,9	0,9	1,9	1,1
	1,6	0,9	2,2	1,1
	1,9	1	2,2	1,2
	1,7	1,1	2,4	1,3
	1,8	1	2,3	0,9
	1,7	1,3	2,1	1,2
	1,6	1	2	1,2
	1,7	1	1,9	1
	1,9	1,2	1,5	1
	1,8	1,1	2,3	1,2
	1,7	1	2,2	1,3
	1,8	0,8	2	1,3
	1,7	0,9	2,1	1,3
	2,1	0,7	1,9	1,1
	1,8	0,8	1,8	1
Prom.	1,781	1,031	2,031	1,175

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-2. Resultados obtenidos de diámetro para replica 2

	196ºC		176ºC	
	18rpm	36rpm	18rpm	36rpm
Diámetro mm	2	1,2	1,8	1,4
	1,8	1	2,1	1,1
	1,9	1,2	2,4	1,3
	2,1	1,1	2	1,4
	2	1,2	2,6	1,5
	1,7	0,9	2,3	1
	2	1,3	2,2	1,2
	1,9	1	2	1,4
	1,8	1,1	1,9	1,2
	2,1	1,3	1,7	1,1
	1,8	1,1	2,5	1,3
	1,9	1,2	2,2	1,4
	1,8	1	2,1	1,4
	1,9	0,8	2,3	1,2
	2,2	0,9	1,9	1,1
	1,7	1	2	1,2
Prom.	1,913	1,081	2,125	1,263

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-3. Resumen resultados obtenidos de diámetro

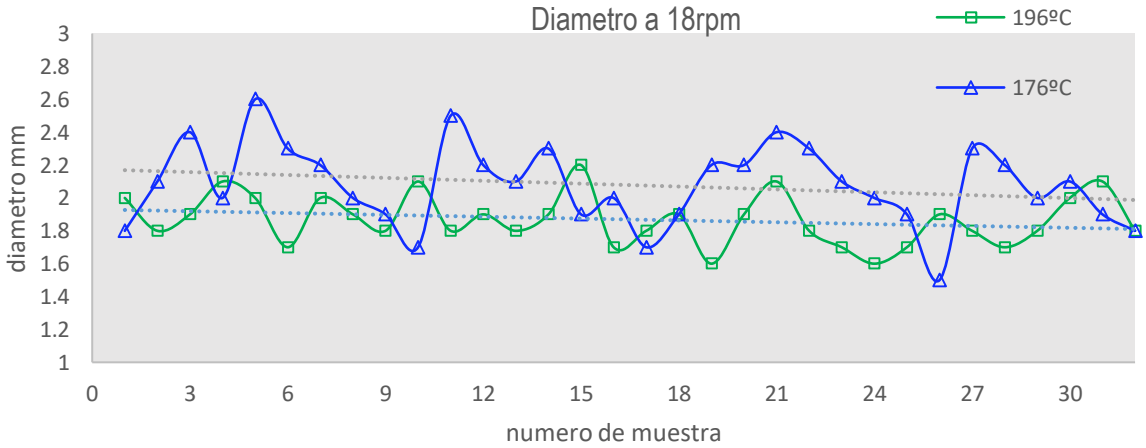
Nº de Exp.	Temperatura ºC	Velocidad tensionado (rpm)	**Diámetro promedio de filamento (mm)**
1	196	18	1,781
2	196	36	1,031
3	176	18	2,031
4	176	36	1,175
5	196	18	1,913
6	196	36	1,081
7	176	18	2,125
8	176	36	1,263

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2. Análisis del producto obtenido

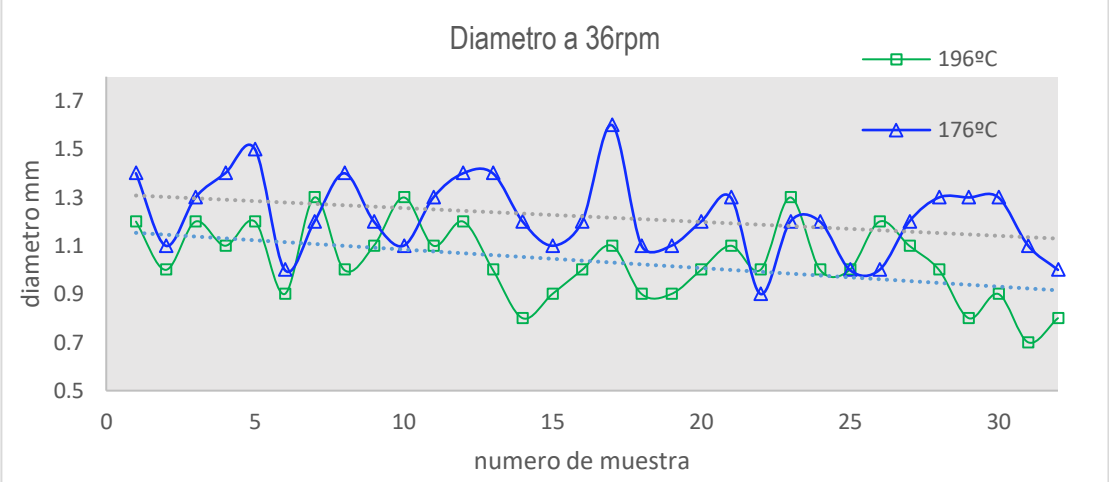
Con los resultados obtenidos se puede apreciar las siguientes grafica del comportamiento del diámetro, en primer lugar, para 18 rpm constantes se tiene:

Figura 3-2. Comportamiento del diámetro a 18 rpm



Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-3. Comportamiento del diámetro a 36 rpm



Fuente: Elaboración propia, 2024

De los resultados se observa que existe una diferencia constante entre diámetros a distintas temperaturas mediante las líneas de tendencia donde para las 18rpm de tensionado se tiene una diferencia de 0,3 mm medidos entre las paralelas, mientras que para 36 rpm se tiene una diferencia de 0,2 mm de la misma manera. Así mismo el diámetro en promedio obtenido para las pruebas de 18 rpm a 196ºC resulto en 1,785 mm siendo este un valor aceptable con respecto a los 1,75mm de diámetro que presentan las opciones comerciales.

3.3 Análisis estadístico del diseño experimental

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos en la parte experimental se empleó la plataforma de software IBM SPSS, el cual facilita la evaluación de las variables que más influyen en el proceso, así como también la comparación de datos reales y corregidos con su respectivo grado de error

3.3.1. Análisis de varianza univariante

Se realizó un análisis de modelo lineal general univariado para determinar la significancia de los factores fijos de temperatura y revoluciones por minuto en función de la variable dependiente del diámetro.

Del análisis se obtuvieron los estadísticos descriptivos que muestran las combinaciones de los factores y los valores medios de diámetro, con su desviación entre valores y el numero N de valores que son 2 tomando en cuenta las 2 réplicas.

Tabla III-4. Estadísticos descriptivos

Estadísticos descriptivos

Variable dependiente: Diámetro

Temperatura	RPM	Media	Desv. Desviación	N
176,00	18,00	2,0780	,06647	2
	36,00	1,2190	,06223	2
	Total	1,6485	,49872	4
196,00	18,00	1,8470	,09334	2
	36,00	1,0560	,03536	2
	Total	1,4515	,46031	4
Total	18,00	1,9625	,14887	4
	36,00	1,1375	,10278	4
	Total	1,5500	,45661	8

Fuente: Elaboración propia, 2024

Para determinar si los factores fijos son significativos se tiene la prueba de efectos intersujetos para un intervalo de confianza de 95%.

Tabla III-5. Efectos intersujetos

Variable dependiente: Diámetro

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1,441[a]	3	,480	105,280	,000
Intersección	19,220	1	19,220	4212,141	,000
Temperatura	,078	1	,078	17,010	,015
RPM	1,361	1	1,361	298,323	,000
Temperatura * RPM	,002	1	,002	,507	,516
Error	,018	4	,005		
Total	20,679	8			
Total corregido	1,459	7			

a. R al cuadrado = ,987 (R al cuadrado ajustada = ,978)

Fuente: Elaboración propia, 2024

El resultado muestra que tanto la temperatura con las RPM son variables significativas ya que sus valores son menores a 0,05, por otra parte, la intersección de las variables Temperatura-RPM no es significativa para la determinación del modelo matemático ya que su significancia es de 0,516. Por lo tanto, se considera despreciable para los siguientes análisis.

Por otra parte, analizando los valores de "F" para ambas variables se tiene que las RPM tienen más efecto sobre el diámetro que a comparación de la temperatura ya que su valor es mayor.

3.3.2. Determinación del modelo matemático

Para determinar el modelo matemático se realizó una regresión lineal con todas las variables significativas, es decir temperatura y RPM; además se tiene como variable dependiente el diámetro del filamento. Esto se resume en la siguiente tabla:

Tabla III-6. Resumen del modelo matemático

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,993[a]	,986	,980	,06413

a. Predictores: (Constante), RPM, Temperatura

Fuente: Elaboración propia, 2024

Del resumen del modelo se tiene un valor del coeficiente de correlación "R" de 0,993 por lo que existe una correlación muy buena entre las variables, por otra parte, el valor de "R cuadrado" indica que el 98,6% de la variabilidad total en la variable dependiente es explicada por las variables independientes

Tabla III-7. ANOVA

ANOVA[a]						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,439	2	,719	174,926	,000[b]
	Residuo	,021	5	,004		
	Total	1,459	7			

a. Variable dependiente: Diametro
b. Predictores: (Constante), RPM, Temperatura

Fuente: Elaboración propia, 2024

En el análisis de varianza (ANOVA) mostrado en la tabla III-7 se tiene que la significancia tiende a un valor de cero lo cual significa que las variables independientes tienen un efecto en la dependiente, es decir que el modelo matemático es útil para explicar la variación de datos registrados.

Tabla III-8. Coeficientes del modelo matemático

Coeficientes[a]								
		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados			95,0% intervalo de confianza para B	
Modelo		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	4,620	,428		10,799	,000	3,520	5,719
	Temperatura	-,010	,002	-,231	-4,344	,007	-,016	-,004
	RPM	-,046	,003	-,966	-18,193	,000	-,052	-,039

a. Variable dependiente: Diametro

Fuente: Elaboración propia, 2024

De los coeficientes determinados en la tabla III-8 se tiene que son aceptables para el modelo debido a que presentan valores de significación aceptables, por lo tanto, la ecuación de la regresión es:

$$Y = 4{,}62 - 0{,}01 * X_1 - 0{,}046 * X_2$$

Donde:

X1: Temperatura (ºC)

X2: velocidad (rpm)

Y: Diámetro (mm)

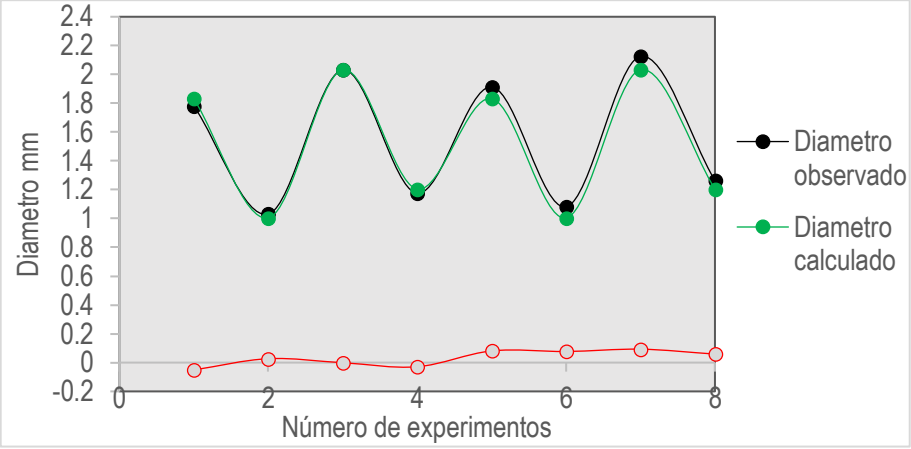
Para poder verificar el ajuste de la ecuación del modelo matemático se tiene la siguiente tabla donde se muestran los valores de diámetro observados y calculados, con su error:

Tabla III-9. Diámetros observados y calculados

Nro experimento	Diámetro observado	Diámetro calculado	error
1	1,781	1,832	-0,051
2	1,031	1,004	0,027
3	2,031	2,032	-0,001
4	1,175	1,204	-0,029
5	1,913	1,832	0,081
6	1,081	1,004	0,077
7	2,125	2,032	0,093
8	1,263	1,204	0,059

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-4. Diámetro Observado, calculado y error



Fuente: Elaboración propia, 2024

3.4. Análisis económico

Para el análisis económico se tienen los siguientes presupuestos generales tanto de servicios como de elementos para la construcción del equipo:

Tabla III-10. Presupuestos para construcción de extrusora

ítem	Unidad	Precio unitario(Bs)	Cantidad	Costo (bs)
Motoreductor monofásico	pieza	1100	1	1100
Resistencia de nicrom	pieza	250	1	250
Controlador de temperatura	pieza	160	1	160
Termocupla tipo K 0,5 mts 0-800C	pieza	35	1	35
Contactor magnético	pieza	89	1	89
Tornillo sin fin	pieza	170	1	170
Motorreductor de Alto Torque 25 rpm	pieza	118	1	118
Motor paso a paso NEMA17	pieza	99	1	99
Driver a4988	pieza	17	1	17
Extrusor MK8	pieza	80	1	80
Placa Arduino UNO	pieza	63	1	63
Cables para conexión a placa	pieza	17	2	34
potenciómetro	pieza	2,5	2	5
interruptores	pieza	15	4	60
Cable para conexión eléctrica	metro	1,5	4	6
Interruptor termo magnético	pieza	30	1	30
Fuente 12V	pieza	77	1	77
Tubos de acero inoxidable	Pieza	50	1	50
boquilla	pieza	50	1	50
Planchas de acero inoxidable para Base, tolva y estructura	pieza	200	1	200
TOTAL				2693

Fuente: Elaboración propia, 2024

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

-El proceso productivo para la obtención del filamento de polipropileno se describió mediante un flujo de procesos que comienza con la obtención de materia prima reciclada, como los envases de polipropileno. Luego, se lleva a cabo el acondicionamiento de estos envases mediante etapas de lavado, secado y picado en partículas cuadradas de 5 mm de lado, para finalmente proceder con la extrusión, enfriado, tensionado y embobinado del filamento.

-Se desarrolló el cálculo de la capacidad del prototipo del extrusor a partir de la ecuación de flujo volumétrico, donde mediante el diámetro del tornillo sin fin, rpm, altura de filete y ángulo de inclinación se determinó un flujo de $5{,}158 \cdot 10^{-7}\ m^3/s$, luego a través de la densidad del polipropileno se calculó la relación kg/h para el flujo másico, siendo este de 1,42 kg/h.

-Se diseñó y construyó el prototipo de extrusora de plástico tomando como medida de referencia el largo del husillo, comparándolo con otros trabajos donde se comparte medidas similares, dando como resultado un largo de husillo de 45cm, además a partir ello se calcularon el diámetro del husillo, la velocidad de giro en rpm, la potencia necesaria para generar ese giro y también las aperturas para la entrada en la tolva y cilindro en relaciones de 0,7D y 1,5D.

-El dimensionamiento de cada componente de la extrusora se realizó mediante el uso del programa Solid Works donde se detalló cada medida de las piezas por separado en hojas de planos y también se realizó un ensamblaje total del equipo.

-Se evaluó el presupuesto necesario para la construcción de la extrusora tomando en cuenta los costos de cada componente y controlador, dando como resultado en un costo total de 2693 Bs.

-La materia prima empleada se identificó como polipropileno a partir de material reciclado cuya identificación tenga el símbolo del polímero definido como PP; para su aplicación se acondicionó en forma de material picado con un tamaño promedio de 5mm de ancho y largo en formas cuadradas.

-Se caracterizó el filamento obtenido mediante mediciones periódicas del diámetro dando como resultado valores entre los 0,8 y los 2,3 mm, dependiendo de las revoluciones por minuto del motor de tensionado propuestas en el diseño factorial, las cuales fueron de 18 y 36 rpm, de esto se puede determinar que la variación para una temperatura de 196ºC en el caso de 18rpm y 36 rpm son de 7,41% y 4,84% respectivamente mientras que para 176ºC lo son de 4,62% y 7,48% de la misma forma. Por otra parte, se observó que, a mayor temperatura, como lo es 196ºC, los diámetros son menores que a 176ºC.

-El tiempo óptimo de operación que se determinó en base a pruebas realizas es de alrededor de 1 hora desde que se pone en funcionamiento el motor, esto para evitar un sobrecalentamiento excesivo del motor y el equipo en general.

-Se instaló un sistema de calentamiento en base a una resistencia de nicrom en tira ubicada alrededor de todo el cilindro y un controlador de temperatura que mediante un control PID permitió el ajuste de temperaturas de fusión del plástico a 176 y 196ºC.

-Analizando los resultados se determinó que el trabajo a 18rpm y 196ºC es más óptimo para conseguir diámetros mayores y próximos a los 1,75mm, de la misma manera se toma en cuenta la posibilidad de variar la velocidad de tensionado levemente para ajustar el diámetro y estabilizar la extrusión.

-Se realizó un manual operativo considerando todas la precauciones y medidas necesarias para la operación del prototipo de extrusora, añadiendo las instrucciones necesarias para su correcto uso.

4.2. Recomendación

-Se aconseja la optimización del equipo mediante la automatización de la medida del diámetro y el control de velocidad de tensionado del motor paso a paso, para lo cual se facilitó la entrada al puerto USB del componente Arduino en la parte delantera del equipo, de esta manera se puede aplicar un control PID que efectivice el proceso.

-Se recomienda al LOU disponer de calibradores vernier digitales que faciliten la medición en tiempo real del diámetro.

-Se recomienda la instalación de ventiladores para la refrigeración del motor y que de esta manera se pueda extender su tiempo de uso.

-Se recomienda la experimentación con otros polímetros para evaluar el comportamiento de distintos plásticos a sus temperaturas de fusión respectivas.

-Se debe examinar el manual de operación previamente al uso del equipo para tomar en cuenta los aspectos de control de temperatura y tiempos óptimos de uso, además de considerar los cuidados ante el manejo de un equipo que trabaja a temperaturas elevadas.

-Se recomienda a futuros tesistas que tomen como opción la realización de proyectos que involucren el diseño y construcción de equipos a nivel de prototipo, ya que resultan en presupuestos más reducidos y cumplen con el propósito de investigación y aplicación de conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.