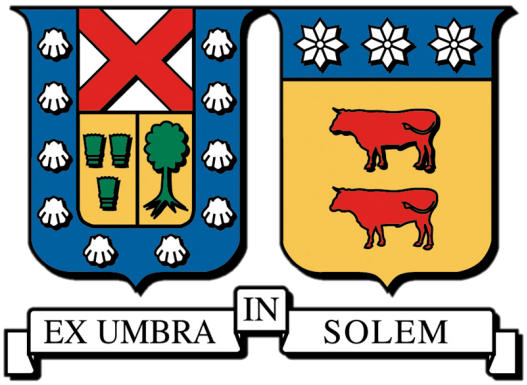
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO, CHILE



ADAPTACIÓN DE UN CABEZAL EXTRUSOR PARA FABRICACIÓN ADITIVA CON POLÍMEROS UTILIZANDO MATERIAL 100% RECICLADO

FELIPE ANDRÉS TOBAR LAZCANO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dip. Ing. UDO RHEINSCHMIDT
PROFESOR CO-REFERENTE: PhD.,Ing. ALEJANDRO PACHECO

OCTUBRE-2024

Resumen

El siguiente trabajo se desarrolla en el Laboratorio Eco Fab Lab, cuyo objetivo es la fabricación aditiva de gran volumen y velocidad a partir de plástico reciclado procedente de tapas de botellas y envases. Para ello, el laboratorio cuenta con un extrusor de gran capacidad que funde el plástico y lo deposita en el lugar indicado por un brazo robótico. A su vez, el cabezal, debido a su peso, se sostiene gracias a un brazo compensador. Este estudio se centra en modificar el cabezal extrusor, diseñado originalmente para trabajar con pellet de plástico, para que pueda funcionar utilizando plástico triturado y asegurar un flujo continuo y regular. Entre las modificaciones principales que se han realizado, destacan la sustitución del sistema de alimentación, que era un codo de plástico estrecho, por un tubo metálico de 28 [mm] de diámetro interior, la ampliación de la entrada de material y la incorporación de un tornillo sinfín metálico dentro del nuevo sistema de alimentación, que es impulsado por un motor eléctrico conectado al brazo robótico. De esta forma, el tornillo cumple la función de empujar el material triturado, que tiende a estancarse debido a su forma de hojuelas.

Los resultados obtenidos muestran un avance significativo hacia el objetivo de lograr un flujo constante y regular. Se realizaron pruebas con una boquilla de tamaño 2,5 [mm] y 1 [mm], siendo en esta última donde se obtuvieron los mejores resultados, ya que el tamaño del filamento es bastante regular y el número de detenciones durante la extrusión es mínimo. Para alcanzar este objetivo en su totalidad, se recomienda reemplazar el motor que impulsa el sinfín presente en el tubo de alimentación por uno con mayor par y menor número de rpm, con el objetivo de evitar atascamientos y la caída de temperatura por un flujo másico excesivo. También se recomienda alargar el cilindro del cabezal para mejorar el sistema de refrigeración y reducir la temperatura en la zona de entrada de material, lo que provoca que este se aglomere y se atasque, deteniendo la extrusión.

Abstract

The following work is being carried out in the Eco Fab Lab, which aims to achieve high-volume, high-speed additive manufacturing from recycled plastic from bottle caps and containers. To do this, the laboratory has a high-capacity extruder that melts the plastic and deposits it in the indicated place by a robotic arm. In turn, the head, due to its weight, is supported by a compensating arm. This study focuses on modifying the extruder head, originally designed to work with plastic pellets, so that it can operate using crushed plastic and ensure a continuous and regular flow. Among the main modifications that have been made, the following stand out: the replacement of the feeding system, which was a narrow plastic elbow, with a metal tube with an internal diameter of 28 mm, the enlargement of the material inlet and the incorporation of a metal worm screw within the new feeding system, which is driven by an electric motor connected to the robotic arm. In this way, the screw performs the function of pushing the crushed material, which tends to stagnate due to its flake shape.

The results obtained show a significant progress towards the goal of achieving a constant and regular flow. Tests were carried out with a nozzle size of 2.5 [mm] and 1 [mm], with the latter being where the best results were obtained, since the filament size is quite regular and the number of stops during extrusion is minimal. To fully achieve this goal, it is recommended to replace the motor that drives the auger present in the feed tube with one with greater torque and lower rpm, in order to avoid jams and temperature drop due to excessive mass flow. It is also recommended to lengthen the head cylinder to improve the cooling system and reduce the temperature in the material inlet area, which causes the material to agglomerate and jam, stopping extrusion.

Agradecimientos

Deseo agradecer a mis padres por su constante apoyo durante todo mi recorrido como estudiante, quienes siempre me motivaron a continuar y a no preocuparme si los resultados obtenidos no eran los esperados, ya que sabían que siempre di mi máximo esfuerzo.

Agradezco también a mis amigos por los buenos momentos compartidos durante esta etapa, por el apoyo mutuo que nos permitió avanzar juntos y por las anécdotas que nos quedan de recuerdo.

Al profesor Udo Rheinschmidt, por ser un profesional comprometido con sus alumnos, cercano y comprensivo, y por su mirada positiva de no ver problemas, sino desafíos.

Al equipo de EFL, quienes iniciaron este proyecto, les agradezco por su labor y les deseo mucho éxito a las nuevas generaciones que se sumen a él.

Finalmente, muchas gracias al apoyo académico del Laboratorio de Tecnología Mecánica, a los señores Juan, Gerardo y Vicente, por su ayuda en todo momento en la fabricación de piezas, utilizando la fresadora, el torno y el taladro de banco. A Camilo, del Laboratorio Taller Metalmecánico, por su ayuda en el torno.

Tabla de Contenidos

1 Introducción **1**

2 Objetivos y Alcances **2**

3 Marco Teórico **3**

3.1 Plásticos . . . 3
3.1.1 Origen y fabricación . . . 3
3.1.2 Tipos de Plásticos . . . 4
3.2 Fabricación aditiva . . . 5
3.2.1 Impresión FDM convencional y robotizada . . . 5
3.3 Suministros para FDM . . . 6
3.3.1 Filamento . . . 6
3.3.2 Pellets . . . 9
3.4 Suministros de impresión 3D a partir de termoplásticos reciclados . . . 10
3.4.1 PET . . . 10
3.4.2 HDPE . . . 10
3.4.3 LDPE . . . 10
3.4.4 PP . . . 10

4 Materiales y Métodos **11**

4.1 Maquinas y herramientas . . . 11
4.2 Equipo de impresión EFL . . . 13
4.2.1 Cabezal extrusor . . . 14
4.3 Modificaciones realizadas al cabezal . . . 16
4.3.1 Reemplazo del codo de alimentación . . . 17
4.3.2 Incorporación de un tornillo sinfín al tubo de alimentación . . . 25
4.3.3 Incorporación tornillo sinfín fabricado de ABS con fibra de carbono . . . 34
4.3.4 Modificaciones menores requeridas . . . 35

4.3.5 Tornillo sinfín de ABS con fibra de carbono más modificaciones menores 36
4.3.6 Incorporación tornillo sinfín híbrido y cambio del soporte metálico 37
4.3.7 Nuevo acople tornillo sinfín híbrido 40
4.3.8 Tornillo sinfín metalico 44

5 Resultados **48**

6 Conclusiones y Recomendaciones **50**

Referencias **51**

Lista de Tablas

3.1 Comparación entre la Creality Ender 3 Max y el brazo robótico UR5 6

4.1 Antes y después: tornillo sinfín metálico. Elaboración propia. 44

Lista de Figuras

3.1 Impresión convencional y robotizada. Elaboración propia. 6
3.2 Fabricación de filamentos. Fuente: Nurel [14] 7

4.1 Equipo de impresión. Cortesía Angel Valdés equipo EFL. 13
4.2 Elementos que componen el cabezal. Elaboración propia. 14
4.3 Hojuelas de plástico triturado. Elaboración propia. 16
4.4 Configuración codo-soporte de alimentación. Elaboración propia. 17
4.5 Bosquejo nuevo alimentador. Elaboración propia. 18
4.6 Diseño tubo de alimentación en Fusion360. Elaboración propia. 18
4.7 Fabricación 1er tubo de alimentación. Elaboración propia. 19
4.8 Plano rediseño tubo de alimentación. Elaboración propia. 20
4.9 Modificación de la entrada de material. Elaboración propia. 21
4.10 Fabricación del nuevo soporte. Elaboración propia. 22
4.11 Incorporación del nuevo tubo de alimentación al cabezal. Elaboración propia. 23
4.12 Primera prueba utilizando el tubo de alimentación. Elaboración propia. 24
4.13 Bosquejo para incorporar un tornillo sinfín al tubo alimentador. Elaboración propia. 25
4.14 Cotas a considerar en la construcción del tornillo sinfín. Elaboración propia. 26
4.15 Dimensiones motorreductor seleccionado. Elaboración propia. 28
4.16 Plano tornillo sinfín. Elaboración propia. 29
4.17 Tornillo sinfín impreso en 3D. Elaboración propia. 29
4.18 Proceso de fabricación unión tubo vertical al tubo de alimentación. Elaboración propia. 29
4.19 Plano diseño soporte motorreductor. Elaboración propia. 30
4.20 Elaboración soporte del motor. Elaboración propia. 31
4.21 Disposición de orificios, eje y pernos de sujeción del motor. Elaboración propia. . . 31
4.22 Ensamble tubo de alimentación y motor en Fusion360. Elaboración propia. 32
4.23 Perforación tubo de alimentación diseño Fusion360. Elaboración propia. 32
4.24 Incorporación tornillo sinfín al interior del tubo de alimentación. Elaboración propia. 33

4.25 Prueba cabezal utilizando sinfín de ABS con fibra de carbono. Elaboración propia. . 34
4.26 Modificaciones menores del cabezal. Elaboración propia. 35
4.27 Prueba en frío. Fuente: material visual del equipo EFL. 36
4.28 Prueba en caliente. Fuente: material visual del equipo EFL. 37
4.29 Trazado y ensamble del nuevo soporte para el tubo de alimentación. Elaboración propia. 38
4.30 Plano del tornillo sinfín híbrido. Elaboración propia. 39
4.31 Tornillo sinfín híbrido. Elaboración propia. 40
4.32 Corte del clavo tras funcionamiento. Elaboración propia. 40
4.33 Plano tornillo sinfín híbrido con nuevo acople. Elaboración propia. 41
4.34 Elaboración del nuevo acople y presentación. Elaboración propia. 42
4.35 Prueba sinfín híbrido con acople mejorado.Elaboración propia. 43
4.36 Filamento obtenido. Elaboración propia. 43
4.37 Prueba sinfín metálico, boquilla 2.5 [mm]. Elaboración propia. 45
4.38 Filamento obtenido con sinfin metalico, boquilla 2.5 [mm]. Elaboración propia. . . . 46
4.39 Prueba sinfín metálico, boquilla 1 [mm]. Elaboración propia. 47
4.40 Filamento obtenido con sinfin metalico, boquilla 1 [mm]. Elaboración propia. 47

5.1 Filamentos obtenidos de distintas extrusiones. Elaboración propia. 48
5.2 Filamento boquilla 1 [mm] vs filamento comercial. Elaboración propia. 49

Nomenclatura

Siglas	Significado
3D	Tres dimensiones
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
CNC	Control Numérico por Computadora
EFL	Eco Fab Lab
FDM	Modelado por Deposición Fundida
FFF	Fabricación de Filamento Fundido
HDPE	Polietileno de Alta Densidad
LDPE	Polietileno de Baja Densidad
PBF	Fusión de Lecho de Polvo
PE	Polietileno
PET	Tereftalato de Polietileno
PETG	Tereftalato de Polietileno Modificado con Glicol
PLA	Ácido Poliláctico
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloruro de Polivinilo
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
SLA	Estereolitografía
SLM	Fusión Selectiva por Láser
SLS	Sinterización Selectiva por Láser
TIG	Gas Inerte de Tungsteno
TPU	Poliuretano Termoplástico
Símbolo	**Significado, unidades**
°C	Grados Celsius
Ø	Diámetro, mm

Término	Significado
M3	Perno métrico con diámetro de rosca nominal de 3 mm
Unidad	**Significado**
h	Hora
kg	Kilogramo
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
Nm	Newton metro
rpm	Revoluciones por minuto
V	Voltio
W	Vatio

Capítulo 1

Introducción

La ingeniería es fundamental para desarrollar procesos sostenibles que den solución a problemáticas mundiales, como la contaminación y el mal uso de recursos [1]. En consecuencia, en las últimas décadas han surgido nuevos métodos de fabricación que están en constante evolución para optimizar el uso de los recursos. Uno de estos métodos es la fabricación aditiva, la cual consiste en depositar material capa por capa de forma controlada donde se requiera [2].

Una de las técnicas más reconocidas en la fabricación aditiva es la impresión 3D, que en los últimos años ha asumido un rol fundamental en la creación de objetos tridimensionales, gracias a su versatilidad y eficiencia, desplazando a métodos tradicionales de producción como la fabricación sustractiva.

Este trabajo tiene como objetivo aumentar la eficiencia de la impresión 3D en el laboratorio EFL al reemplazar el pellet plástico con plástico triturado proveniente de tapas recicladas. Esta transición tiene un impacto positivo en el medio ambiente, no solo por reutilizar plástico, sino también porque elimina los procesos de fabricación adicionales requeridos para la formación de pellets, independientemente de si estos provienen de plástico virgen (como el derivado de la destilación de petróleo crudo) o de plástico reciclado. Para lograr esto, serán necesarias modificaciones físicas en el cabezal extrusor que permitan un flujo continuo de este nuevo suministro de impresión.

Capítulo 2

Objetivos y Alcances

Las impresoras 3D convencionales que imprimen en plástico utilizan como suministro pellets o filamentos de este material. Con el desarrollo de este trabajo se busca modificar el extrusor adaptado al efector final del brazo robótico, actualmente instalado en laboratorio EFL, para fabricación aditiva utilizando como materia prima plástico triturado proveniente de reciclaje de tapas de botellas. De esta manera se evita la transformación previa del plástico triturado al alimentarlo directamente en el cabezal, aumentando la eficiencia del proceso.

El objetivo general de este trabajo es diseñar y adaptar un extrusor al cabezal de una máquina impresora para procesar directamente material polimérico 100% triturado.

Para realizar este trabajo de título se deben completar los siguientes objetivos específicos:

- Estudio estado del arte de la fabricación y el uso de filamento y pellets plásticos para impresión 3D.
- Estudio de los parámetros de proceso para la extrusión de polímeros termoplásticos, e. g., polipropileno, polietileno de alta y baja densidad.
- Planteamiento de diferentes alternativas para entradas al cabezal de impresión.
- Diseño, planos de detalle y fabricación de la alternativa seleccionada.
- Registro y análisis cualitativo de muestras fabricadas con la nueva extrusora.
- Evaluación y reporte de resultados para sugerir modificaciones al diseño.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Plásticos

La palabra "plástico" deriva del griego "plastikos", que significa "capaz de ser moldeado". Los plásticos se caracterizan por sus variadas propiedades, las cuales permiten moldearlos y adaptarlos a una amplia gama de formas y usos. El plastico esta presente en gran parte de los objetos que utilizamos en el dia a dia como ropa, utensilios, herramientas, electrodomesticos, transporte, tecnologia,etc. [3].

3.1.1 Origen y fabricación

"Los plásticos se derivan principalmente de hidrocarburos, que son compuestos orgánicos formados por átomos de carbono e hidrógeno. La principal fuente de hidrocarburos para la fabricación de plásticos es el petróleo crudo, que se extrae de yacimientos subterráneos a través de la perforación de pozos petroleros" [4]. Una vez extraído el petróleo crudo, se somete a un proceso de refinación para obtener los productos químicos fundamentales para la fabricación de plásticos. Este proceso incluye una destilación fraccionada, donde el petróleo se calienta y se separa en distintas fracciones según sus puntos de ebullición. Cada fracción agrupa hidrocarburos con propiedades químicas y físicas similares. Una fracción clave obtenida es la nafta. Esta se separa y se somete a un proceso denominado craqueo catalítico, en el cual las moléculas grandes de hidrocarburos se descomponen en moléculas más pequeñas, como el etileno y el propileno, que son productos químicos básicos en la mayoría de los plásticos. El etileno también puede obtenerse del gas natural. Tanto el etileno como el propileno son monómeros. Un monómero es una pequeña molécula que puede unirse con otras similares para formar una cadena más larga llamada polímero. "Podemos imaginar los monómeros como 'ladrillos' individuales y los polímeros como la 'pared' construida al unir esos ladrillos" [4]. El proceso de transformación de un monómero a un polímero se denomina polimerización y puede

realizarse mediante adición o condensación. Independientemente del proceso de polimerización utilizado, a menudo se agregan aditivos para modificar las propiedades físicas y/o químicas del plástico. Los aditivos se incorporan en diferentes etapas del proceso de polimerización para lograr las características deseadas en el producto final. Entre los aditivos más comunes se encuentran:

1. Estabilizadores: protegen el plástico de factores externos como la luz ultravioleta o el oxígeno, prolongando su vida útil.
2. Pigmentos y colorantes: añaden color al plástico.
3. Plastificantes: mejoran la flexibilidad y maleabilidad del plástico.
4. Retardantes de llama: reducen la inflamabilidad del plástico y limitan la propagación de las llamas en caso de incendio.
5. Agentes de refuerzo: mejoran las propiedades mecánicas del plástico.

Después de completar la polimerización, se obtiene un polímero en forma de resina, una sustancia viscosa y densa. Esta resina pasa por procesos adicionales como enfriamiento, solidificación y trituración para transformarse en pellets, que son la forma estándar para la fabricación de productos plásticos y facilitan su manejo y transporte.

3.1.2 Tipos de Plásticos

Termoplásticos

Son los plásticos que, a altas temperaturas, se pueden fundir y moldear para que, una vez enfriados, conserven la forma que se les dio. Su principal característica es que este proceso se puede realizar más de una vez, lo que permite su reciclaje. Sin embargo, cada vez que se repite este proceso, las propiedades del plástico se van deteriorando, hasta llegar a un punto en que ya no es posible su reciclaje [5]. Entre los termoplásticos más utilizados están el tereftalato de polietileno (PET), el polietileno de alta densidad (HDPE), el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno de baja densidad (LDPE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el policarbonato, el estireno y el nylon [6].

Termoestables

Se diferencian de los termoplásticos en que solo se pueden fundir y moldear una vez. Si se vuelven a calentar, se quemarán en lugar de fundirse. Esto se debe a que, al calentarse por primera vez, las moléculas se unen de forma permanente. Estos plásticos se caracterizan por su rigidez y gran resistencia al calor [5]. Ejemplos de polímeros termoestables incluyen el poliuretano, las resinas de formaldehído de fenol, las resinas de poliéster insaturado y los recubrimientos epoxi [7].

Elastómeros

Su principal característica es su elasticidad, pudiendo deformarse bajo esfuerzos y recuperar su forma original una vez que dicho esfuerzo deja de aplicarse. Esta propiedad se debe a que sus moléculas se enlazan entre sí de forma desordenada y formando grandes cadenas; cuando se estiran, se alinean, pero, al liberarse, vuelven a su forma original. Algunos elastómeros son el caucho (tanto natural como sintético), el neopreno y las siliconas [5].

3.2 Fabricación aditiva

"La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, es un proceso que se utiliza para crear un objeto físico (o 3D) mediante la superposición de capas de material a partir de un modelo digital. A diferencia de la fabricación sustractiva, que crea el producto final retirando material de un bloque, la fabricación aditiva combina varias piezas para conformar el producto final"[8].

Existen distintas tecnicas de impresion 3D, siendo las mas utilizadas:

1. FDM (Modelado por Deposición Fundida): También conocida como FFF (Fabricación de Filamento Fundido) debido al uso predominante de este material en la impresión, consiste en un carrete de filamento plástico que alimenta un extrusor caliente. Este extrusor funde y extruye el material a través de una boquilla, depositando el material capa por capa en los lugares requeridos [9].

2. SLA (estereolitografía): Se trata de una resina líquida que es solidificada en el lugar requerido por un láser o una fuente de luz. Este proceso de solidificación se conoce como curado [10].

3. PBF (fusión de lecho de polvo): Existen varios métodos basados en polvos, siendo los más comunes el SLM (Selective Laser Melting) y el SLS (Selective Laser Sintering). Una potente fuente láser se dirige al polvo de impresión y provoca la fusión de partículas específicas, formando así la pieza deseada. Lo más común es utilizar polvo metálico [10].

4. Chorro de material o aglutinante: Un agente aglutinante se introduce en el proceso para unir partículas de polvo de metal, cerámica o materiales compuestos. El polvo se distribuye en una capa delgada y luego se adhiere selectivamente mediante el agente aglutinante [11].

3.2.1 Impresión FDM convencional y robotizada

La impresión 3D convencional utiliza un sistema de pórticos, que son vigas y rieles deslizantes que sostienen el cabezal extrusor y guían su movimiento, mientras este deposita el plástico fundido

para la fabricación del diseño 3D. Por otro lado, la impresión 3D robotizada utiliza un robot para sostener y guiar el extrusor. Ambos sistemas de guía se muestran en la Figura 3.1

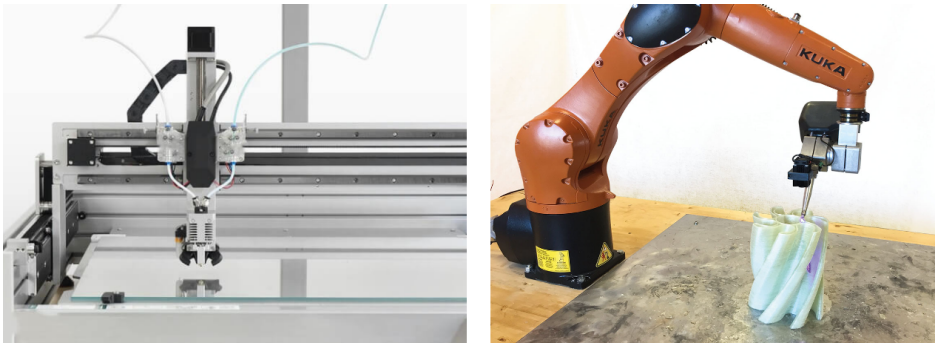


Figura 3.1: Impresión convencional y robotizada. Elaboración propia.

Si bien existen impresoras 3D de gran escala que utilizan el sistema de pórticos, estas son poco comunes. Por lo tanto, consideramos como "convencionales" aquellas presentes en pequeñas y medianas empresas, universidades y domicilios, las cuales tienen un volumen de impresión reducido. Para realizar una comparación entre ambos sistemas, consideraremos los equipos disponibles en el EFL: una impresora convencional Creality Ender 3 Max y el equipo de impresión guiado por un brazo robótico UR5.

Tabla 3.1: Comparación entre la Creality Ender 3 Max y el brazo robótico UR5

	Creality Ender 3 Max	**Brazo robótico UR5**
Volumen/radio de impresión	300x300x340 [mm]	850 [mm]
Velocidad máx. de movimiento	300 [mm/s]	1000 [mm/s]
Precio aproximado	$350	$31000

3.3 Suministros para FDM

3.3.1 Filamento

Los filamentos para impresión 3D están hechos de termoplásticos y son el principal suministro utilizado en la técnica FDM. Por esta razón, también se conoce a esta técnica como FFF. A diferencia de otros materiales, como el polvo y la resina líquida, el filamento es un hilo continuo que se enrolla en carretes para su uso en impresoras. Existen dos estándares principales de filamentos: 1,75 [mm] y 3 [mm], siendo el primero el más popular por su mejor rendimiento de impresión. Los filamentos están disponibles en varios materiales, cada uno con diferentes temperaturas de impresión y propiedades, lo que permite una amplia gama de aplicaciones en la impresión 3D [12].

Fabricación

Los filamentos se fabrican a partir de pellets plásticos específicos para cada tipo de material. Generalmente, estos pellets son de color blanco o transparente, lo que facilita el control de la coloración del filamento final. Durante el proceso de producción, se añaden aditivos que mejoran propiedades como la resistencia al impacto, la durabilidad, la integridad estructural y el color del filamento.

Posteriormente, los pellets pasan a una cámara de secado para eliminar la humedad que afecta negativamente la calidad del filamento. Estos suelen secarse a una temperatura de entre 60 [°C] y 80 [°C] durante unas horas, lo que varía según el fabricante.

Una vez secos, se introducen en una extrusora de un solo tornillo que incluye una cámara de calentamiento. Allí, son fundidos hasta formar una pasta viscosa que es expulsada en forma de cuerda por una boquilla redonda. Esta cuerda pasa por una cámara de agua tibia y luego por una cámara de agua a temperatura ambiente para ser enfriada, lo cual es crucial para obtener un filamento redondeado.

La velocidad a la que se tira el filamento determina su diámetro: a mayor velocidad, menor es el diámetro obtenido. Finalmente, los motores tiran del filamento hacia el mecanismo de bobinado. El proceso de bobinado comienza midiendo el diámetro del filamento con un dispositivo láser para garantizar que se encuentra dentro de la tolerancia del diámetro objetivo. Luego, se enrolla en un carrete hasta que este alcanza un peso establecido. El bobinado se detiene y un operador corta el filamento para asegurarlo a otro carrete y repetir el proceso [13].

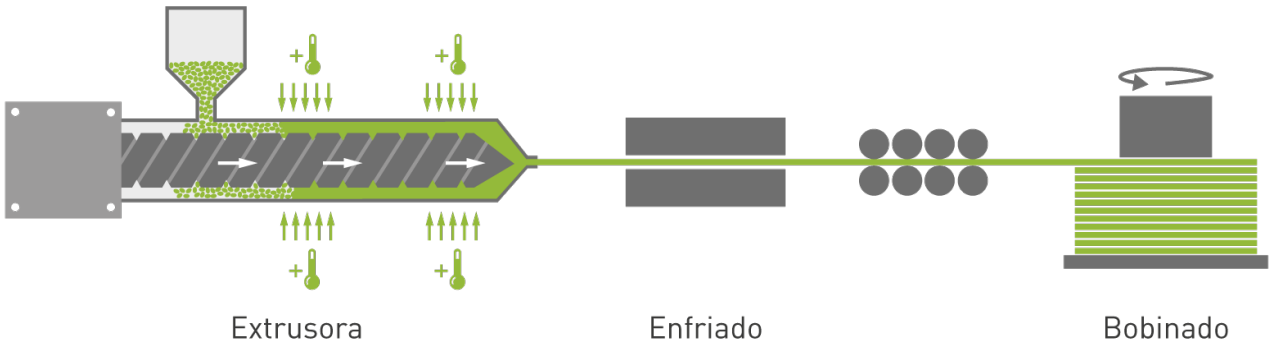


Figura 3.2: Fabricación de filamentos. Fuente: Nurel [14]

.

Materiales

Los materiales más comunes en los filamentos son:

PLA

El filamento PLA (ácido poliláctico) es el más utilizado en las impresoras 3D debido a su facilidad de impresión. Se obtiene a partir de la fermentación de vegetales como el maíz, la yuca y la caña de azúcar, lo que lo hace biodegradable y una alternativa sostenible. Sus principales características incluyen dureza media, fragilidad, ser inodoro y disponibilidad en una gran variedad de colores. La temperatura de impresión recomendada para el PLA oscila entre 180[°C] y 220[°C]. Aunque no requiere una cama caliente, su uso es conveniente para mejorar la calidad de la impresión [15].

ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un polímero termoplástico que se fabrica a partir del petróleo, sintetizado a partir de tres monómeros: acrilonitrilo, butadieno y estireno, cuyas proporciones se pueden manipular para modificar sus propiedades. Se caracteriza por su alta resistencia al impacto y a bajas temperaturas, creando piezas ligeras y duraderas. El estireno proporciona rigidez y brillo, mientras que el butadieno le otorga resistencia al impacto y propiedades a bajas temperaturas. Para su impresión, se requiere una temperatura entre 210 y 260 [°C], y una cama caliente entre 80 y 110 [°C] para fundirse adecuadamente. El filamento debe conservarse en un entorno fresco y seco, y el lugar de impresión debe estar ventilado, ya que emana olores tóxicos durante el proceso [16].

PETG

El filamento PETG (Tereftalato de Polietileno Modificado con Glicol) se origina del PET, un material derivado del petróleo famoso en la fabricación de botellas y envases. Se le añade glicol (G) para mejorar su resistencia, durabilidad y flexibilidad. Destaca por su similitud con el PLA en su facilidad de impresión y con el ABS en su resistencia. Además, es un material con compatibilidad alimentaria. Su temperatura de extrusión oscila entre 220 y 260 [°C], y la cama caliente debe estar entre 75 y 90 [°C]. No se recomienda utilizar soportes, ya que son muy difíciles de retirar, y el filamento debe mantenerse en un ambiente libre de humedad [17].

Nylon

El nylon, también conocido como PA por ser un polímero del grupo de las poliamidas, es un plástico derivado del petróleo. Se clasifica según su composición química, específicamente por el número de átomos de carbono que contiene. Los tipos más utilizados para filamentos son el PA6, PA11, PA12 y PA66. Destacan por su flexibilidad, resistencia al impacto y a la abrasión. Su temperatura

de impresión oscila entre 240 y 260 [°C], y la temperatura de la cámara de impresión debe estar entre 60 y 100 [°C]. Al igual que el PETG y el ABS, es higroscópico, lo que significa que absorbe fácilmente la humedad del ambiente, por lo que debe conservarse en un entorno fresco y seco. Es biocompatible, lo que permite su uso en piezas que están en contacto con la piel [18, 19].

TPU
El TPU (poliuretano termoplástico) es un elastómero derivado del petróleo conocido por su notable flexibilidad y durabilidad, capaz de soportar fuerzas de compresión y tracción superiores a las de materiales comunes como el PLA y el ABS. Además, destaca por su resistencia a la abrasión, al aceite y a productos químicos. Gracias a su excelente cohesión entre capas, el TPU garantiza una homogeneidad mecánica sobresaliente en las piezas, haciéndolas isotrópicas. La temperatura de impresión recomendada para el TPU varía entre 210 y 235 [°C], mientras que la cama de impresión debe mantenerse entre 30 y 60 [°C] [20].

3.3.2 Pellets

También conocido como plástico granulado, son polímeros que la industria del plástico utiliza para la fabricación a gran escala de productos de uso cotidiano, industrial y médico. Tienen forma esférica y su diámetro suele estar entre 1 y 5 [mm]. Generalmente, los pellets plásticos se utilizan en la fabricación de filamentos para impresión 3D. Sin embargo, en el último tiempo, las empresas han comenzado a desarrollar impresoras diseñadas para trabajar directamente con estos pellets u ofrecer soluciones adaptables para convertir impresoras de filamento en compatibles con gránulos. Esto se debe a que el extrusor de una impresora de filamento y el de una impresora de gránulos son diferentes [21].

Al trabajar con filamentos, es crucial tener en cuenta que sus propiedades físicas y químicas pueden diferir de las de la materia prima original debido al proceso de fabricación (ver sección 3.3.1). Utilizar pellets desde el principio elimina la necesidad de transformar la materia prima, lo que permite mantener propiedades químicas y físicas más cercanas a las del material original y reduce los costos de impresión. Además, el uso directo de gránulos disminuye los problemas de atascamiento y facilita la combinación de colores durante la impresión.

3.4 Suministros de impresión 3D a partir de termoplásticos reciclados

Resulta interesante la posibilidad de reciclar los termoplásticos más utilizados en la actualidad como suministro de impresión 3D, por lo que, a continuación, se mencionan algunos de ellos, sus principales usos y temperaturas de fusión.

3.4.1 PET

El tereftalato de polietileno es uno de los plásticos más utilizados, especialmente para la fabricación de envases de bebidas y alimentos, como también para fibras textiles. Se caracteriza por ser transparente, liviano, resistente al desgaste y al plegado, tener una alta resistencia química y ser una buena barrera al oxígeno y humedad [22]. Su temperatura de fusión está entre los 250 y 260 [°C] [23].

3.4.2 HDPE

El polietileno de alta densidad es un polimero opaco que se caracteriza por su rigidez y resistencia a los impactos, tracción, ácidos, disolventes, además de su resistencia a las altas y bajas temperaturas. Se utiliza principalmente en la fabricación de envases de productos de limpieza, tapas de envases, tuberías, mesas y sillas. Es un material fácil de procesar mediante inyección y extrusión. Su temperatura de fusión está entre los 130 y 135 [°C] [24].

3.4.3 LDPE

El polietileno de baja densidad es un polímero transparente y flexible, utilizado en la fabricación de bolsas de alimentos y basura, bandejas, films para envases y embalajes, tuberías y prótesis. Su punto de fusión está entre los 105 y 115 [°C] [25].

3.4.4 PP

El polipropileno es un plástico de bajo costo de fabricación, con alta resistencia a la humedad, productos químicos y a los cambios de temperatura, lo que lo hace ideal para uso en exteriores. Se emplea en envases y recipientes de alimentos, cosméticos y productos químicos. Además, en la industria automotriz se utiliza para fabricar parachoques, rejillas de ventilación y paneles de instrumentos. En la industria textil, se usa para alfombras, tapicería y cuerdas. Su punto de fusión está entre los 160 y 170 [°C] [26].

Capítulo 4

Materiales y Métodos

4.1 Maquinas y herramientas

A continuación, se presenta una lista ordenada alfabéticamente de las máquinas y herramientas utilizadas durante las modificaciones del cabezal extrusor.

- Alicates
- Brocas de metal 3, 4, 15, 23 [mm]
- Esmeril angular DeWalt
- Fresadora Friedrich Deckel
- Impresora 3D Creality modelo Ender-3 Max
- Lima para metal Nicholson
- Martillo
- Mini limas Makawa
- Multiherramientas Dremel
- Pie de metro Stanley
- Sierra tronzadora DeWalt
- Soldadora Katto TIG
- Soldadora Stanley de arco manual

- Taladro de columna Ixion
- Tijera hojalatera Stanley
- Tornillo de banco Palmgren
- Torno Imor P-400

4.2 Equipo de impresión EFL

El equipo de impresión del laboratorio EFL está compuesto por las siguientes piezas:

1. Brazo robótico UR5: su función es dar el movimiento al cabezal extrusor para que este deposite el material en el lugar requerido. Se puede mover en un radio de 850 [mm].
2. Cabezal extrusor: se encarga de depositar el material de impresión en el lugar indicado por el Brazo robótico.
3. Brazo compensador 3ARM: ayuda a sostener el cabezal extrusor, el cual pesa 12 [kg], dado que el brazo robótico solo puede cargar 5 [kg].

La Figura 4.1 muestra las piezas anteriormente mencionadas, enumeradas en el mismo orden.



Figura 4.1: Equipo de impresión. Cortesía Angel Valdés equipo EFL.

Este trabajo se centra en el cabezal extrusor. Por lo tanto, en la siguiente sección se detalla exclusivamente esta pieza.

4.2.1 Cabezal extrusor

El cabezal extrusor es el responsable de transformar el suministro de plástico en una pasta fundida, que luego se extruye para formar la pieza tridimensional. Para llevar a cabo esta tarea, requiere varios elementos, los cuales se enumeran en la Figura 4.2.

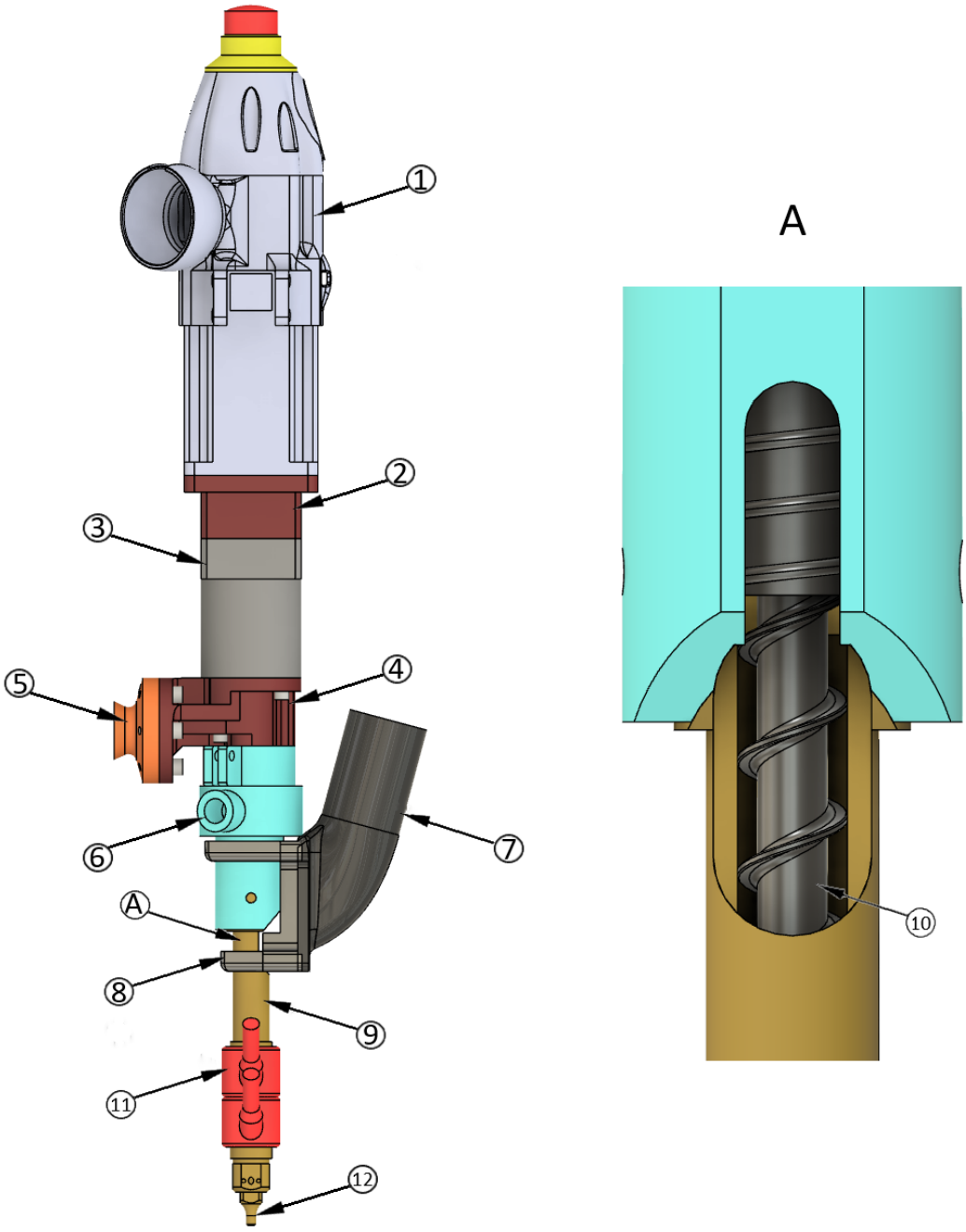


Figura 4.2: Elementos que componen el cabezal. Elaboración propia.

1. Servomotor: servomotor modelo CNC Dorna de 750 [W] de potencia nominal. Es alimentado por una corriente de 220 [V] y puede alcanzar las 3000 [rpm]. Su función es dar movimiento al hilo sinfín ubicado dentro del cilindro, moviendo así el suministro plástico desde la parte superior del cilindro hacia la inferior. Allí, el calor generado por las resistencias funde y transforma el material en una pasta, la cual es extruida a través de la boquilla.

2. Reductor: reduce la velocidad de rotación del motor mientras aumenta el torque de salida. La relacion de transmisión es de 1:8.

3. Flange: conecta el reductor de velocidad con la parte inferior del cabezal.

4. Soporte: soporta el sistema de refrigeración, extrusión, alimentación y la conexión del brazo robótico con el cabezal. Las uniones se realizan mediante pernos.

5. Conexión brazo robótico - cabezal: estructura metálica que sirve para unir el cabezal al brazo robótico mediante seis pernos.

6. Sistema de refrigeración: pieza metálica hueca a la que se conectan dos mangueras para circular agua con la ayuda de una bomba sumergible. Esto se realiza con el propósito de enfriar la estructura metálica debido al calor proveniente de las resistencias.

7. Codo de alimentación: es un codo plástico utilizado para introducir el material de impresión en el cilindro, depositándolo en la abertura superior para que sea captado por el tornillo sinfín.

8. Soporte codo de alimentación: estructura metálica que, mediante 4 pernos, asegura el codo de alimentación al cilindro.

9. Cilindro: recibe y confina el suministro plástico, permitiendo que el tornillo sinfín lo comprima y transporte en su interior. En su parte inferior, cuenta con una rosca interior que se utiliza para fijar boquillas de diferentes tamaños.

10. Tornillo sinfín: es el encargado de transportar y comprimir el suministro plastico por todo el cilindro, formando así una pasta homogénea que luego es extruida por la boquilla.

11. Resistencias: dos resistencias encargadas de aumentar la temperatura del cilindro para fundir el plástico en su interior.

12. Boquilla: permite la salida del plástico fundido para ser depositado según lo indique el brazo robótico. Está unida al cilindro mediante rosca, y las hay de diferentes tamaños, lo que permite variar la cantidad de plástico depositada en cada capa, teniendo relación directa en la velocidad de impresión.

4.3 Modificaciones realizadas al cabezal

El cabezal extrusor disponible fue diseñado para funcionar con pellets plásticos, los cuales tienen una forma geométrica esférica o similar. Esta configuración les permite fluir fácilmente por el sistema de alimentación.

Como se mencionó en la introducción, se modificará el cabezal para que utilice como suministro de impresión plástico triturado proveniente de tapas recicladas. El principal desafío será asegurar un buen flujo de este material a través del sistema de alimentación, ya que, debido a su geometría de pequeñas hojuelas, como se puede ver en la Figura 4.3, tienden a estancarse, deteniendo el flujo.

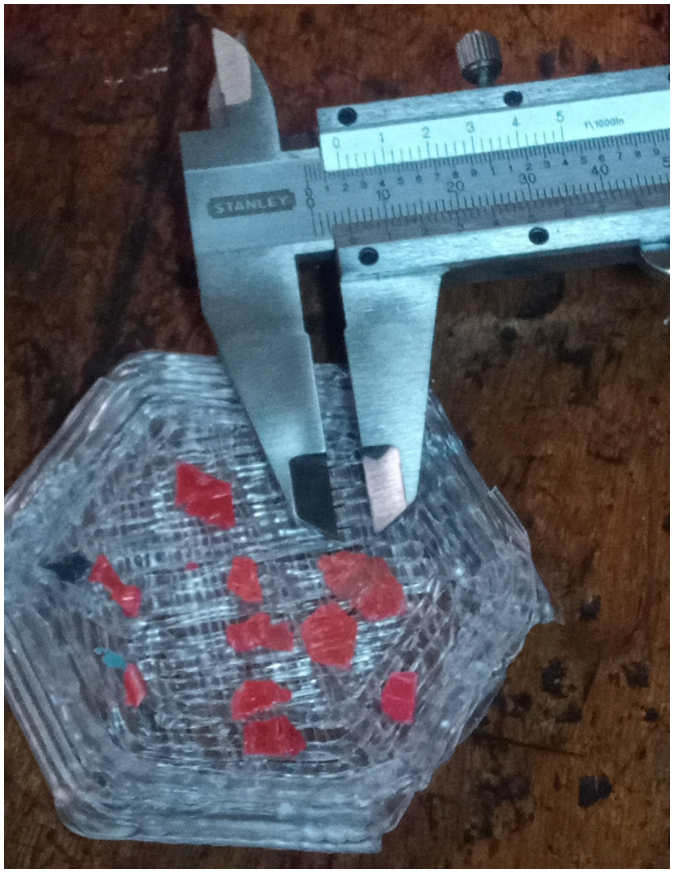


Figura 4.3: Hojuelas de plástico triturado. Elaboración propia.

4.3.1 Reemplazo del codo de alimentación

Requerimientos y diseño

El codo de alimentación necesita ser sustituido, ya que su diseño no es apropiado para las hojuelas. Durante el proceso de alimentación, las hojuelas no fluyen correctamente y requieren ser empujadas con un objeto externo para avanzar a través del estrecho conducto y ser capturadas por el tornillo sinfín. Habitualmente, esta acción se lleva a cabo utilizando un destornillador o una llave Allen.

En la Figura 4.4 se evidencia que el soporte metálico forma un pasillo entre el codo de alimentación y la entrada del cilindro. Este pasillo, además de ser muy angosto, tiene una zona sin pendiente donde las hojuelas quedan estancadas.



Figura 4.4: Configuración codo-soporte de alimentación. Elaboración propia.

Para sustituir el codo plástico, se comenzó por plantear qué características debería tener el nuevo alimentador para evitar los problemas del elemento a sustituir. Se consideraron los siguientes aspectos:

1. Garantizar una pendiente adecuada que permita un flujo natural del material por efecto de la gravedad.

2. Aumentar el tamaño del canal.

3. Garantizar que el material alcance el tornillo sinfín de manera directa y sin obstrucciones.

Concluyendo, que la mejor opción es un tubo metálico con un diámetro interior acorde al tamaño de la abertura presente en el cilindro (ver Figura 4.2 (A)). Es importante que el tubo sea metálico,

ya que el calor generado por las resistencias se transfiere por todo el cabezal. En la Figura 4.5 se presenta un bosquejo de como se veria esta solucion.

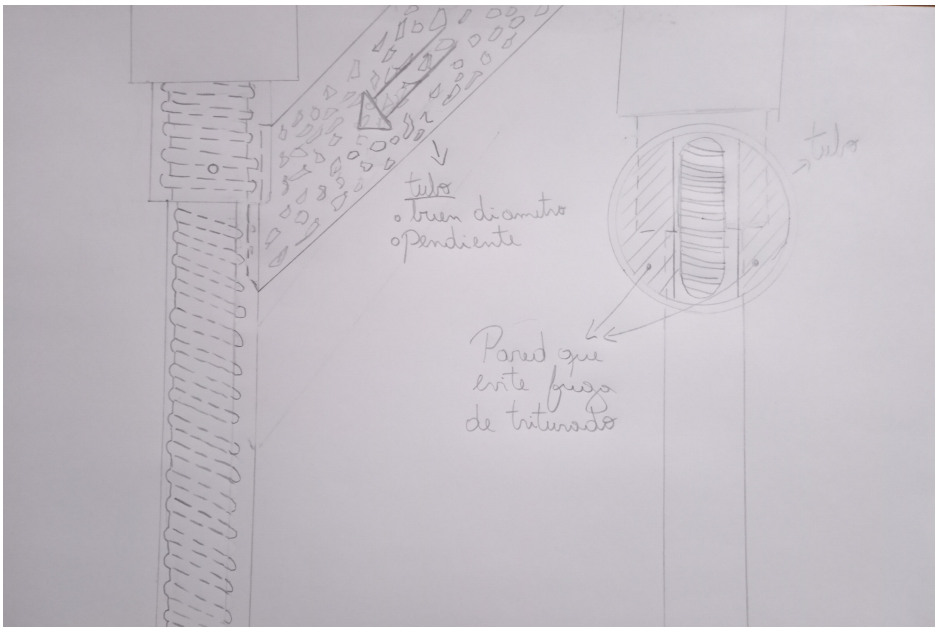


Figura 4.5: Bosquejo nuevo alimentador. Elaboración propia.

Para una implementación precisa, se diseñó en el programa Fusion360 un tubo con un diámetro exterior de 32 [mm] y un diámetro interior de 28 [mm], estas son las dimensiones reales del tubo a utilizar. Se representó el tubo en color verde y se le dio una inclinación de 40° (ver Figura 4.6(a)). La ubicación del tubo se realiza de manera que su borde coincida con el borde de la entrada de plástico triturado, evitando desniveles que puedan impedir el flujo (ver Figura 4.6(b)). Utilizando la herramienta de Combinar entre el cuerpo del cabezal y el tubo de alimentación, se obtiene la geometría que debe tener este último para encajar de manera exacta (ver Figura 4.6(c)).

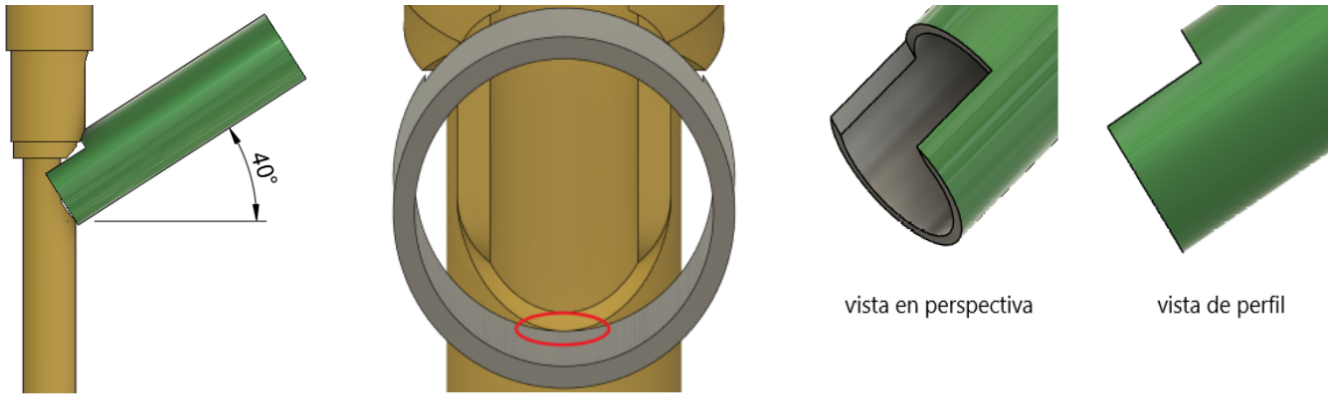


Figura 4.6: Diseño tubo de alimentación en Fusion360. Elaboración propia.

Construcción del tubo de alimentación

A partir de un tubo de 300 [mm] de longitud y las dimensiones mencionadas anteriormente, se corta un segmento de 100 [mm] utilizando el esmeril angular. Este trozo se corta de acuerdo con la geometría obtenida en el programa Fusion360 (ver Figura 4.6(c)). El proceso de fabricación y el resultado obtenido se presentan en la Figura 4.7.



(a) Prof. Udo Rheinschmidt



(b) Resultado

Figura 4.7: Fabricación 1er tubo de alimentación. Elaboración propia.

Resultado

El resultado no fue el esperado, ya que, como se aprecia en la Figura 4.7(b), existen aberturas entre el tubo de alimentación y el cilindro, por las que eventualmente se escapará el plástico triturado. Además, la abertura existente en el cilindro es angosta, por lo que no se aprovecha el tamaño del tubo de alimentación. Como solución, se propone modificar el cilindro incluyendo la parte inferior del sistema de refrigeración, que es el punto donde ambos elementos se unen mediante dos pernos sin cabeza. Esto dará como resultado una entrada de material más amplia, y el tubo de alimentación no necesitará tener una geometría compleja como se había diseñado inicialmente.

Rediseño del tubo de alimentación y modificaciones al cilindro del cabezal

En la Figura 4.8 se presenta el plano del nuevo diseño del tubo de alimentación. Se puede observar que este diseño presenta un corte sencillo para unirse al cilindro del cabezal. Las dos pletinas, cada una con dos orificios de 3 [mm] cada uno, servirán para pasar pernos que se unirán a un bloque metálico que será el nuevo soporte, siguiendo la lógica del soporte original, pero de mayor tamaño.

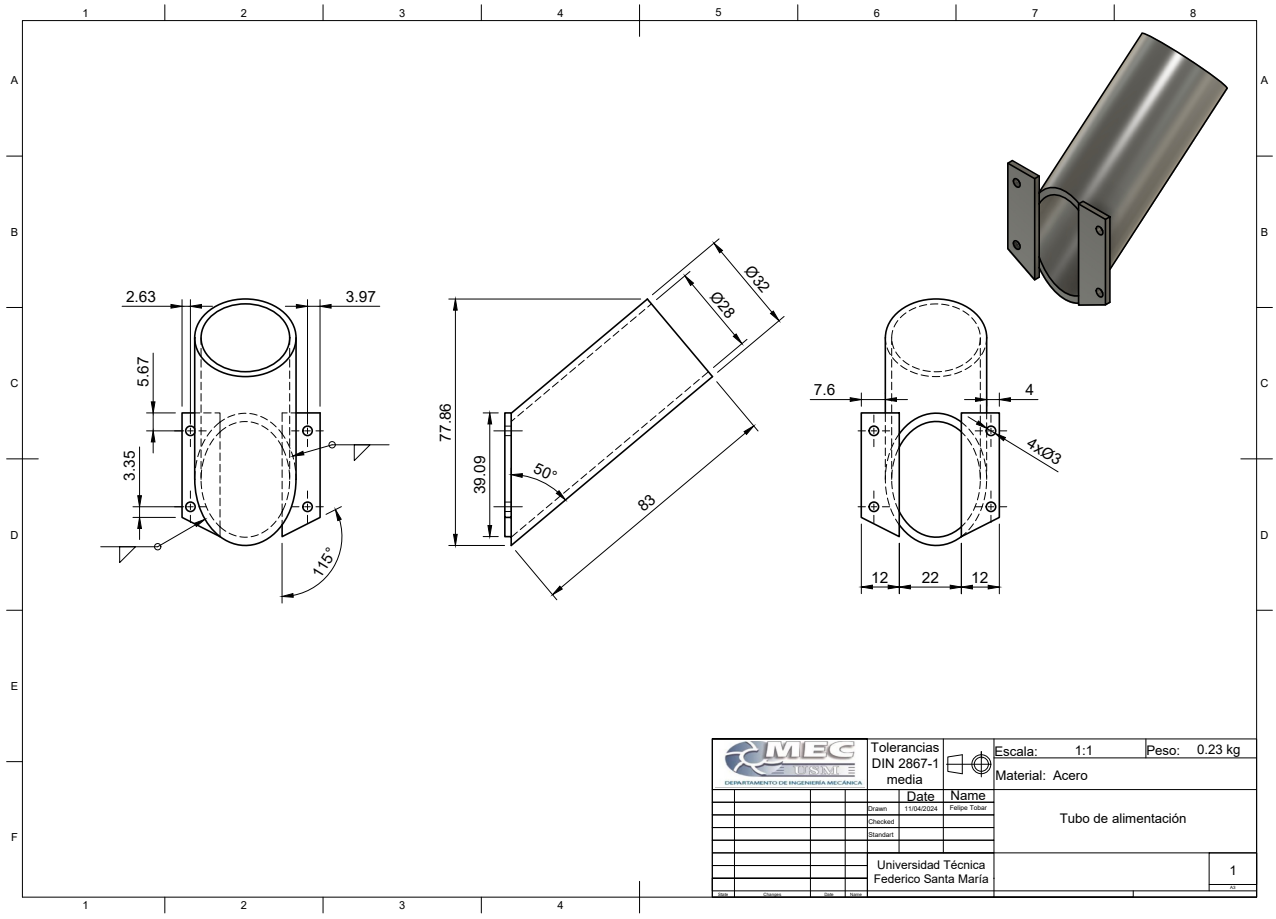
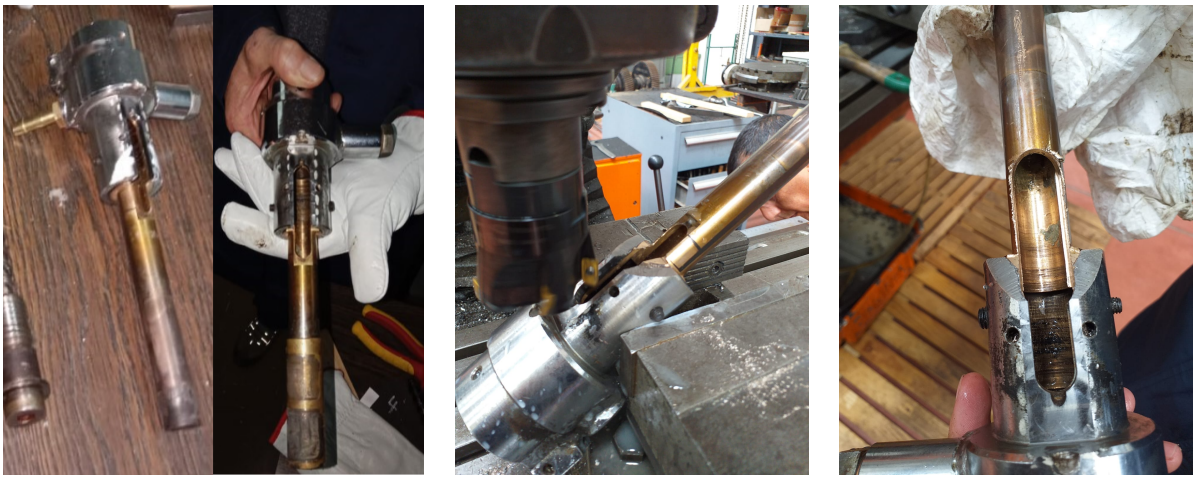


Figura 4.8: Plano rediseño tubo de alimentación. Elaboración propia.

En la Figura 4.9(a) se presentan las marcas realizadas en la zona de unión entre la parte inferior del sistema de refrigeración y el cilindro. También se marca debajo de esta zona para tener una mayor entrada, lo que permitirá al tornillo sinfín incorporar el plástico más fácilmente. Utilizando la fresadora, se comienza removiendo la zona superior (ver Figura 4.9(b)) y luego se posiciona la pieza horizontalmente para eliminar la zona de la entrada. El resultado del mecanizado se muestra en la Figura 4.9(c), logrando una mayor abertura en la entrada y eliminando la zona superior que obstaculizaba la incorporación del tubo de alimentación. Posteriormente, con la ayuda de la multiherramienta, se eliminaron las rebabas producidas durante el fresado.



(a) Trazado (b) Fresado (c) Resultado

Figura 4.9: Modificación de la entrada de material. Elaboración propia.

Construcción soporte tubo de alimentación

Teniendo el tubo de alimentación y el cilindro listos para ser ensamblados, se tuvo que fabricar una pieza que uniera ambas partes. Para esto se utilizó como referencia el soporte ya existente para el codo de alimentación. A continuación, se detalla el paso a paso en la fabricación del soporte del tubo de alimentación. En la figura 4.10 se presentan algunas imágenes del proceso, ordenadas cronológicamente.



Figura 4.10: Fabricación del nuevo soporte. Elaboración propia.

A partir de un bloque de metal de dimensiones 100x57x12 [mm] y empleando el esmeril angular, se obtienen tres piezas de tamaño similar.Estas piezas se sueldan manualmente por arco en sus caras laterales para formar un bloque de dimensiones 57x36x27 [mm], al cual se le rectifican las caras superior e inferior en la fresadora. Una vez que las caras están lisas, se delimita la zona a remover para que el cilindro del cabezal encaje en el bloque; el trazado se realiza utilizando como molde el soporte del codo de alimentación. Haciendo uso de una broca de 23 [mm] montada en la fresadora, se extrae la mayor cantidad de material posible que evite modificar la geometría requerida, mientras que el resto se elimina con Dremel.

Una vez que el cilindro encaja en el bloque, se unen al tubo de alimentación dos pletinas de dimensiones 32x13x2 [mm]. Esto se realizó mediante soldadura TIG debido al poco espesor de la pletina. Utilizando el taladro de banco y una broca de 3 [mm], se perforan dos orificios en cada pletina, los cuales servirán para fijar el tubo al bloque.

Con los orificios de las pletinas como guía y utilizando el mismo taladro de banco, se perforan nuevamente los 4 orificios en el bloque. Esta vez se emplea una broca de 4 [mm] para permitir un juego adecuado entre ambas piezas, ya que los orificios en las pletinas no resultaron como se esperaba debido a la presencia del cordón de soldadura.

Finalmente, el tubo de alimentación y su soporte están listos para ser acoplados al cabezal mediante 4 pernos M3.

Incorporación tubo de alimentación

En la Figura 4.11 se muestra el resultado obtenido al conectar el tubo de alimentación al cilindro. También se muestra el estado previo y posterior de la configuración de alimentación, analizado mediante un estudio de sección realizado en el programa Fusion360. La imagen demuestra que la nueva configuración presenta una mayor pendiente y que la alimentación del triturado es directa al eliminar el angosto canal descrito en la Sección 4.3.1.

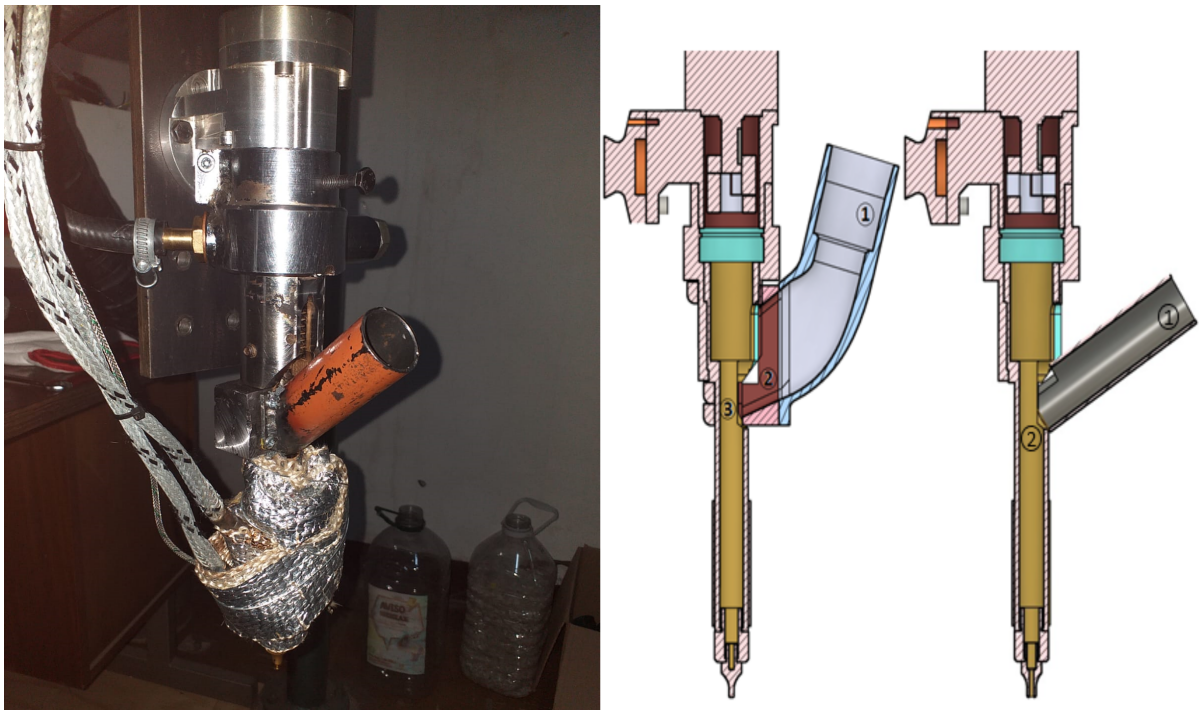


Figura 4.11: Incorporación del nuevo tubo de alimentación al cabezal. Elaboración propia.

Resultados

Se ensayó el nuevo sistema alimentándolo con un 100% de plástico triturado. Si bien al comienzo se consigue extruir plástico de manera continua (ver Figura 4.12), al poco tiempo de uso persiste el problema de atascamiento, el cual se evidencia con la detención de la extrusión. Se consideró que este problema podría derivarse de un calentamiento excesivo en la entrada de material, provocando la aglomeración del triturado y, por ende, el atasco. Para descartar esta suposición, se llevó a cabo una prueba en frío. Aun así, las hojuelas de plástico no fluyen. Por tanto, se requiere la incorporación de un elemento que empuje el triturado hacia el tornillo sinfín. Esto se realizará mediante un segundo tornillo sinfín dispuesto en el interior del tubo de alimentación (ver sección 4.3.2).



Figura 4.12: Primera prueba utilizando el tubo de alimentación. Elaboración propia.

4.3.2 Incorporación de un tornillo sinfín al tubo de alimentación

Opciones de implementación

Debido a los resultados obtenidos, se ha decidido incluir un tornillo sinfín dentro del tubo de alimentación para empujar las hojuelas de plástico, solucionando así el problema de flujo discontinuo. En la Figura 4.13 se presenta un bosquejo con tres opciones para realizar esta tarea. A continuación, se describen brevemente, incluyendo sus pros y contras.

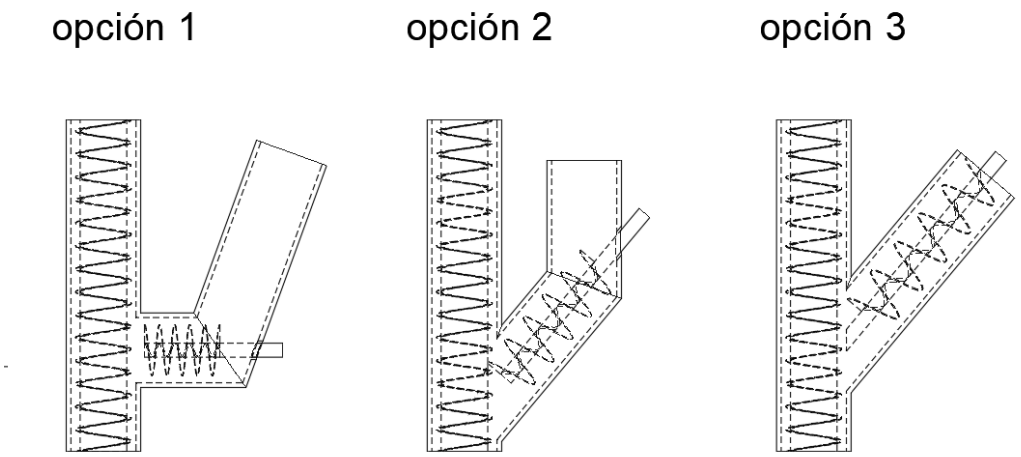


Figura 4.13: Bosquejo para incorporar un tornillo sinfín al tubo alimentador. Elaboración propia.

1. Opción 1: Incorporar un tubo horizontal al tubo de alimentación para ubicar el tornillo sinfín.
   (a) Ventajas: La perforación requerida para la salida del eje del tornillo sinfín y la incorporación del motor eléctrico es sencilla debido a la posición horizontal del sinfín.
   (b) Desventajas: Se debe agregar un tubo horizontal al tubo de alimentación, por lo que es necesario fabricar un nuevo soporte para acoplarse al cabezal.
2. Opción 2: Incorporar el tornillo sinfín al tubo de alimentación ya existente, agregando un tubo vertical para la entrada de plástico triturado.
   (a) Ventajas: No es necesario modificar el soporte del tubo de alimentación.
   (b) Desventajas: Agregar un tubo vertical. Posicionar el tornillo sinfín de forma inclinada.
3. Opción 3: Incorporar el tornillo sinfín al interior del tubo de alimentación sin realizar modificaciones.
   (a) Ventajas: No requiere modificaciones.

(b) Desventajas: La ubicación del motor eléctrico que permita impulsar el tornillo sinfín, pero que a su vez no bloquee la entrada de triturado.

Se opta por elegir la opción 2, ya que es de fácil construcción y no requiere modificar el soporte que une el tubo de alimentación al cabezal.

Restricciones tornillo sinfín

Como se ilustra en la Figura 4.14, existen restricciones en cuanto a sus dimensiones físicas. Debe tener un largo mínimo de 83 [mm] para cubrir toda la longitud del tubo de alimentación, mientras que su diámetro no debe exceder los 22 [mm] para evitar golpear las placas metálicas que se unen al soporte del tubo de alimentación.

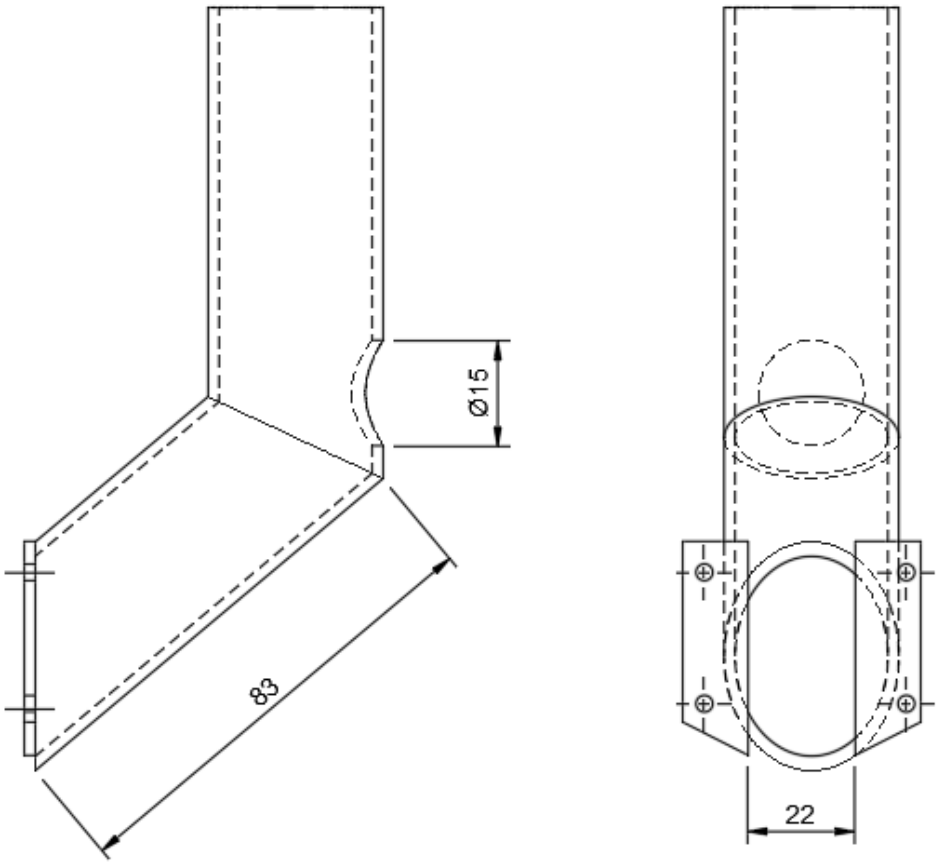


Figura 4.14: Cotas a considerar en la construcción del tornillo sinfín. Elaboración propia.

Se decide que las medidas del tornillo sinfín serán:

1. Diametro tornillo: 18[mm]
2. Diametro eje: 6 [mm]
3. Paso: 17 [mm]
4. Largo: 75 [mm]

Capacidad del tornillo sinfín y selección de motorreductor

La capacidad del tornillo sinfín queda expresada por la siguiente ecuación

$$Q = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot P \cdot N}{4} \tag{4.1}$$

donde:

- Q = capacidad [m^3/h]
- D = diámetro del tornillo [m]
- d = diámetro del eje [m]
- P = paso del tornillo [m]
- N = velocidad del tornillo [rpm]

Como la velocidad del tornillo depende del motorreductor a seleccionar, se busca uno que funcione con una alimentación de 24 [V], ya que el brazo robótico dispone de fuentes de alimentación con dicho voltaje para conectar dispositivos eléctricos. Se encuentran 3 opciones de motorreductores que trabajan en un rango de 12 a 36 [V] siendo 24 [V] el voltaje nominal. Teniendo entre elegir entre un motor de 200, 300 y 400 [rpm], se escoge el de menor número de vueltas ya que lo que priorizamos es el torque. Este motor, en condiciones nominales, tiene una potencia de 7 [W] y gira a 175 [rpm]. Con este dato procedemos a calcular la capacidad del tornillo sinfín. Reemplazando en la ecuación 4.1 se obtiene que

$$Q \approx 0.040\,[\text{m}^3/\text{h}] \tag{4.2}$$

Para saber a cuánto flujo másico equivale este flujo volumétrico, se debe multiplicar por la densidad del plástico triturado. Es importante notar que la densidad a utilizar es la densidad aparente y no la absoluta, debido a que, por la forma de las hojuelas, estas densidades son distintas. En un recipiente de volumen conocido, se agrega el triturado hasta llenarlo y sin compactación. Luego,

este se pesa y se obtiene la densidad aparente, la cual es de 337 [kg/m^3]. Finalmente, multiplicamos este valor por el Q obtenido, resultando que el flujo másico entregado por el tornillo sinfín es de

$$\dot{m} \approx 13.5, [\text{kg/h}] \tag{4.3}$$

El torque del motor queda expresado por la ecuacion 4.4

$$T = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot N} \tag{4.4}$$

donde:

- T = torque [Nm]
- P = potencia [W]
- N = velocidad del tornillo [rpm]

Reemplazando los valores nominales anteriormente mencionados en la ecuacion 4.4 obtenemos que el torque nominal es de

$$T \approx 0.040\,[\text{Nm}] \tag{4.5}$$

Diseño y fabricación

Con los parámetros anteriormente mencionados y considerando las dimensiones del eje del motor , las cuales se muestran en la Figura 4.15, se diseña el tornillo sinfín.

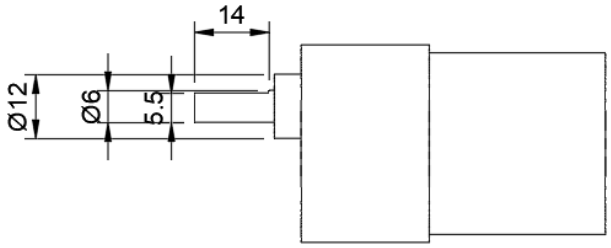


Figura 4.15: Dimensiones motorreductor seleccionado. Elaboración propia.

El plano del tornillo sinfín se muestran en la Figura 4.16. Para su fabricación se utiliza una impresora 3D Creality modelo Ender-3 Max, con filamento PLA rojo de 1.75 [mm] de diámetro. El resultado de la impresión se muestra en la Figura 4.17

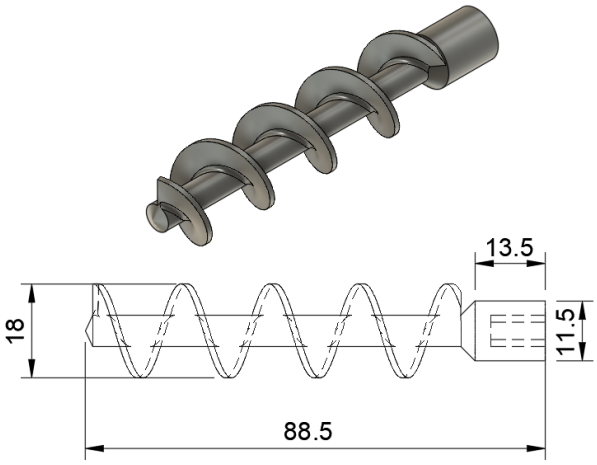


Figura 4.16: Plano tornillo sinfín. Elaboración propia.

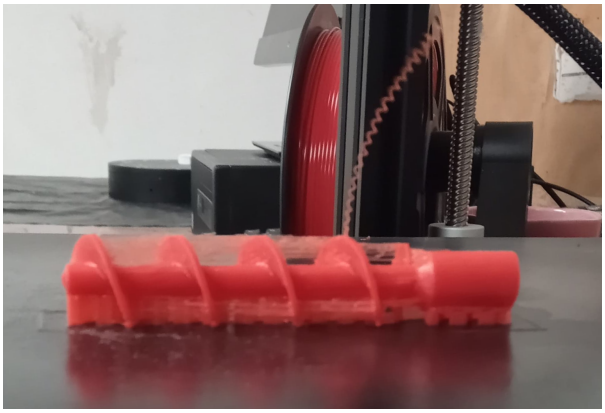


Figura 4.17: Tornillo sinfín impreso en 3D. Elaboración propia.

Incorporación de tubo vertical al tubo de alimentación

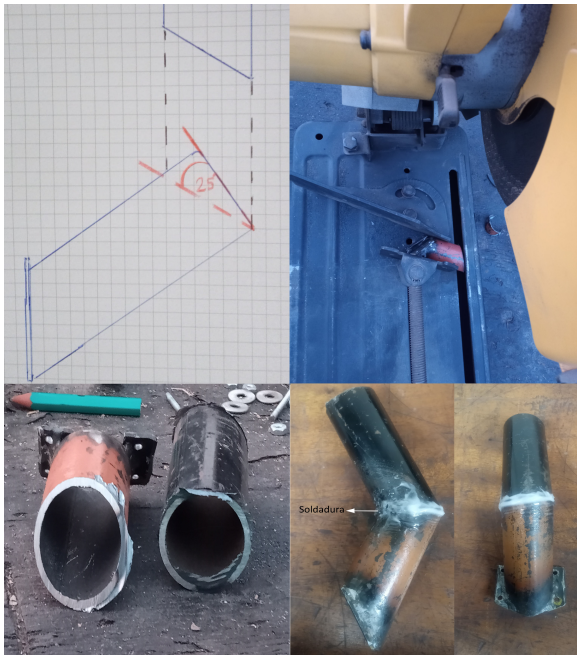


Figura 4.18: Proceso de fabricación unión tubo vertical al tubo de alimentación. Elaboración propia.

En la Figura 4.18 se muestran imágenes del proceso realizado para unir el tubo de alimentación con el tubo vertical que pasará a formar parte del mismo. Basándose en el dibujo de la misma figura, se decidió cortar ambos tubos en un ángulo de 25° para facilitar su unión mediante soldadura al arco. Utilizando la sierra tronzadora, se cortaron los tubos y se les quitó la rebaba antes de soldarlos por su parte delantera. Esta técnica de soldadura parcial se emplea para evitar que el calor excesivo endurezca demasiado el tubo, ya que este debe ser perforado para la salida del eje del tornillo sinfín, el cual estará acoplado a un motor eléctrico. El resto del tubo se unió utilizando soldadura plástica de la marca Poxipol, la cual fue posteriormente lijada para un mejor acabado.

Diseño y construcción soporte motorreductor

El soporte del motorreductor a construir debe ser ligero y de fácil remoción, por lo mismo se decide utilizar una placa delgada metálica para su construcción y dos abrazaderas como método de

sujeción al tubo de alimentación. Su plano de construcción se presenta en la Figura 4.19.

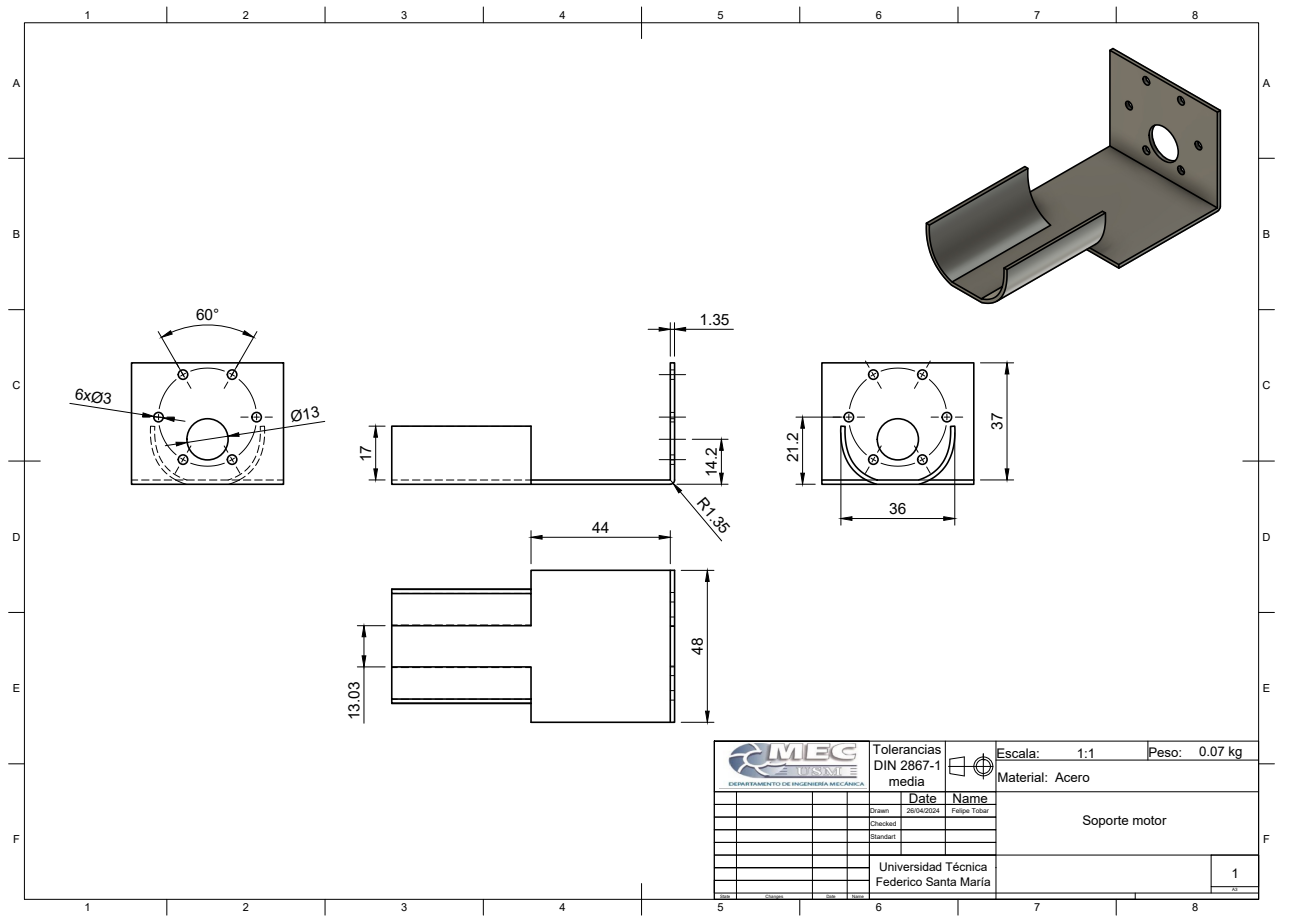


Figura 4.19: Plano diseño soporte motorreductor. Elaboración propia.

Utilizando una tijera de chapa se comienza por cortar la placa metálica con las medidas requeridas en el plano. Con ayuda de una lima, se eliminaron las rebabas de todos sus bordes. Luego, se realizaron dos cortes parciales en la placa, dejando un lado de 44 [mm] y el otro de 81 [mm]. El lado de menor medida se moldeó con la forma del tubo de alimentación, apoyándolo en un tubo de iguales dimensiones y golpeándolo con un martillo, además de doblarlo con distintos alicates. La forma tubular obtenida permite el encaje entre ambas piezas, las cuales se sujetarán mediante dos abrazaderas metálicas.
El resultado y las herramientas utilizadas en esta tarea se muestran en la Figura 4.20

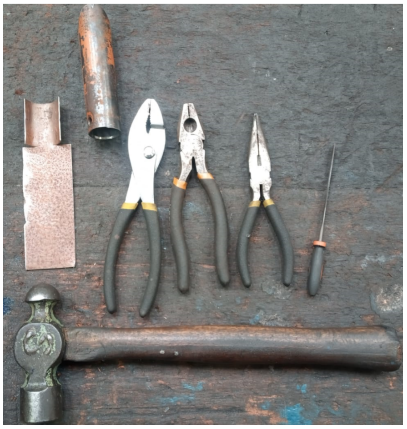


Figura 4.20: Elaboración soporte del motor. Elaboración propia.

En el extremo opuesto de la placa metálica, se marca la ubicación de los orificios necesarios para el eje del motor y sus 6 pernos de sujeción. Esto se hace utilizando un soporte previamente fabricado, que no se utilizó en esta configuración (ver Figura 4.21 (a) y (b)). Las perforaciones se realizaron con una broca de 13 y 4 [mm], respectivamente. Los orificios de la placa y del cuerpo del motor no coincidían, por lo que se aumentaron de tamaño con una mini lima circular. Con los orificios listos, el motor ya tiene donde sujetarse, pero aún debe estar posicionado en el mismo ángulo que el tubo de alimentación. Para lograr esto, la placa se dobló en un ángulo de 90° y se dejó una parte plana intermedia para separar el motor de la estructura. Para doblar la placa, se la sujetó en un tornillo de banco y se golpeó con un martillo. Luego, se colocó sobre un riel para obtener un mejor resultado con el mismo martillo.



(a) Pieza del motor utilizada como plantilla



(b) Primer diseño de soporte. Utilizado solo como plantilla

Figura 4.21: Disposición de orificios, eje y pernos de sujeción del motor. Elaboración propia.

Perforación tubo de alimentación para el paso del tornillo sinfín

Para realizar el acople entre el motor y el tornillo sinfín, este último debe salir del tubo de alimentación y conectarse al eje del motor. Por lo mismo, es necesaria una perforación que permita girar libremente el eje del tornillo sinfín, pero que a su vez no sea lo suficientemente grande para que las hojuelas salgan por él. Para realizar la perforación en el lugar adecuado, se diseñó esta configuración en Fusion360. Intentando ser lo más realista posible, se tomaron todas las medidas necesarias utilizando un pie de metro. Con el diseño listo en el programa, se mide a qué distancia se debe ubicar el centro del orificio, obteniendo una medida aproximada de 71 [mm] desde el borde superior del tubo de alimentación, como se muestra en la Figura 4.22.

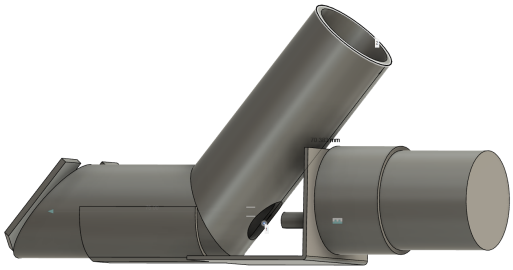


Figura 4.22: Ensamble tubo de alimentación y motor en Fusion360. Elaboración propia.

Ubicando el tubo de alimentación de forma horizontal, como muestra la Figura 4.23, este es perforado utilizando un taladro de banco. El orificio se comienza con una broca de 3 [mm] y, posteriormente, se utiliza una broca de 15 [mm]. Finalmente, se eliminan las rebabas con la ayuda de la herramienta giratoria Dremel y una lima circular.

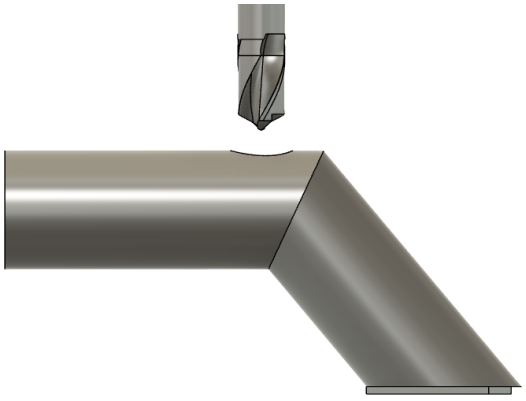


Figura 4.23: Perforación tubo de alimentación diseño Fusion360. Elaboración propia.

Teniendo todos los elementos necesarios, se realiza el ensamble para probar el funcionamiento del nuevo tornillo sinfín.

Incorporación del tornillo sinfín en el tubo de alimentación

En la Figura 4.24 se muestra el resultado del ensamblaje del tubo de alimentación con el tornillo sinfín en su interior, el cual es impulsado por un motor eléctrico.

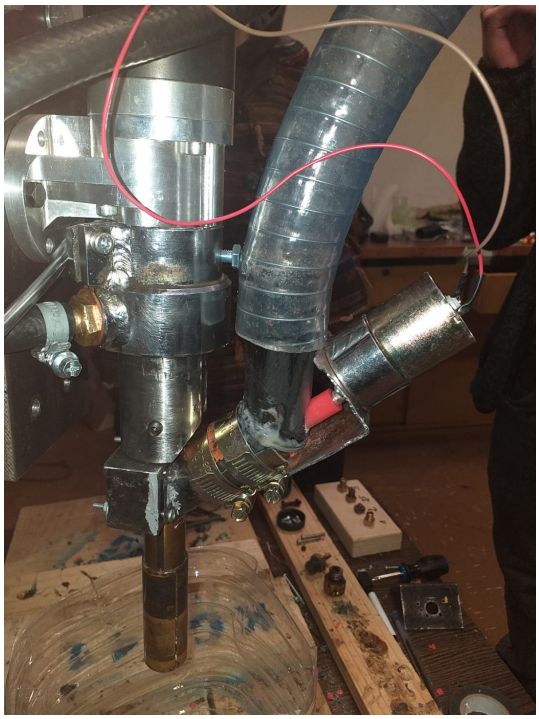


Figura 4.24: Incorporación tornillo sinfín al interior del tubo de alimentación. Elaboración propia.

Resultados

Los resultados obtenidos al hacer girar el sinfín del cilindro y el nuevo sinfín del tubo de alimentación fueron los siguientes:

1. Existe roce entre el tubo de alimentación y el sinfín del cilindro, por lo que se debe desgastar el primero para evitarlo. Esto se realiza utilizando un Dremel.

2. Existe roce entre el sinfín del tubo de alimentación y una de las placas del soporte metálico, por lo que se modificará el diseño para la próxima impresión.

3. Existe roce entre el sinfín del tubo de alimentación y el orificio por donde este sale en dirección al motor. Se utiliza un dremel para evitar este suceso.

4. El flujo del material triturado fue bueno, pero el tornillo sinfín se partió a los pocos minutos de su uso.

4.3.3 Incorporación tornillo sinfín fabricado de ABS con fibra de carbono

En base a los resultados obtenidos, se realizan las modificaciones necesarias y se procede a imprimir un tornillo sinfín de ABS y otro de ABS con fibra de carbono, con el objetivo de obtener mejores propiedades mecánicas. Además, se incorpora un controlador PWM para regular el voltaje de alimentación al motor, permitiendo así controlar la velocidad de giro del tornillo sinfín.
En la Figura 4.25 se muestran algunas imágenes de la primera prueba de extrusión utilizando el tornillo sinfín fabricado de ABS con fibra de carbono. Como se evidencia en las imágenes, las resistencias no están ensambladas al cilindro del cabezal con el fin de realizar una prueba en frío y descartar un mal flujo por exceso de calor. Los resultados obtenidos fueron bastante buenos; existe un flujo casi continuo de triturado, salvo en pequeños instantes donde se forma un arco en el interior de la manguera plástica en la zona que esta se une al tubo de alimentacion.

Existen dos zonas de fuga de triturado que deben ser solucionadas. Una está en el orificio por donde sale el eje del tornillo sinfín para acoplarse al motor eléctrico, y la otra ocurre en una pequeña abertura entre el cilindro y el tubo de alimentación en la zona inferior donde se unen. Gracias a esta prueba en frío, se notó que a pesar de la ausencia de las resistencias, el cilindro se calienta debido al roce del triturado en su interior. Esto podria provocar la aglomeracion del triturado por lo que se debe extender el sistema de refrigeración.

Para evitar la formación de arcos que ocurren en la zona de unión de la manguera plástica con el tubo vertical, se disminuirá el espesor de la pared de este último de forma gradual, generando una pendiente.

Todas estas mejoras, que incluyen tapar fugas, extender el sistema de refrigeración, disminuir el espesor de la pared del tubo de alimentación y otras modificaciones, se incluirán en la sección 4.3.4.

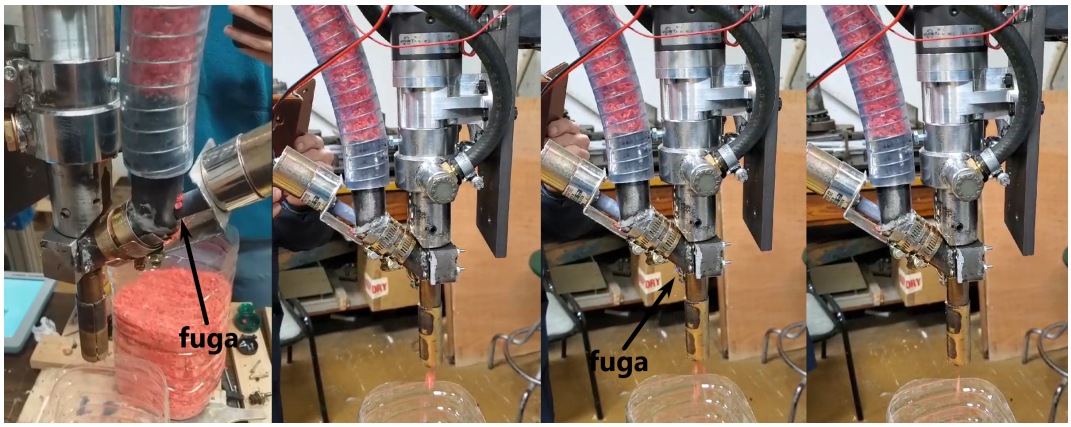


Figura 4.25: Prueba cabezal utilizando sinfín de ABS con fibra de carbono. Elaboración propia.

4.3.4 Modificaciones menores requeridas

Extensión del sistema de refrigeración

Se amplía el sistema de refrigeración existente utilizando una tubería de cobre de 7 [mm] de diámetro. Se sustituye una tubería de goma por la de cobre, que se enrolla alrededor del cilindro del cabezal en dos vueltas para asegurar el máximo contacto. Luego se extiende hacia el soporte del motor, reduciendo así la transferencia de calor desde las resistencias hacia la entrada del plástico.

Sellado de fugas

Para sellar las fugas, se aplica masilla epoxi Poxilina sobre las zonas cubiertas con papel aluminio. Este último evita que las piezas se adhieran entre sí durante el moldeado de la masilla y se retira posteriormente.

Reducción del espesor del tubo de alimentación

Utilizando la multiherramientas, se reduce gradualmente el espesor del tubo de alimentación, formando una entrada cónica. Esto evita la formación de arcos y asegura un flujo continuo del material triturado desde la manguera plástica.

Incorporación de conector enchufable para motor y caja protectora para controlador PWM

Se añade una caja de acrílico para proteger el sistema del controlador PWM contra el polvo. Además, se incorpora un conector enchufable para el motor, permitiendo ajustes sin necesidad de desconectar los cables del tubo de alimentación y el motor.

En la Figura 4.26 se presentan imágenes que muestran las modificaciones anteriormente mencionadas. Los resultados de esta nueva configuración se presentan en la sección 4.3.5.

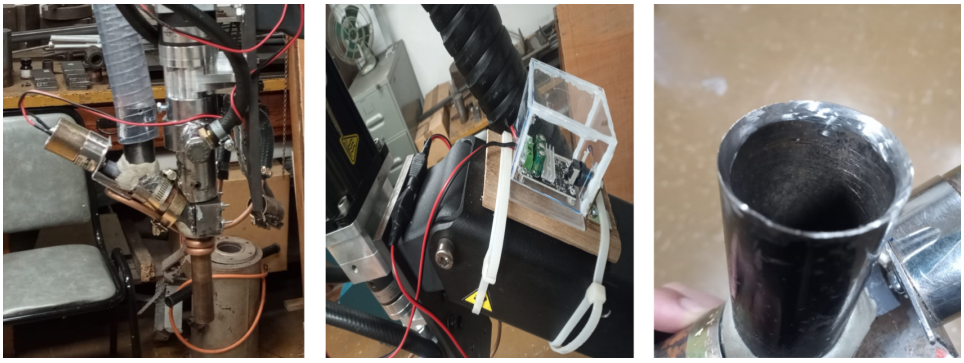


Figura 4.26: Modificaciones menores del cabezal. Elaboración propia.

4.3.5 Tornillo sinfín de ABS con fibra de carbono más modificaciones menores

Prueba en frío

La primera prueba del sistema, con las modificaciones descritas en la sección 4.3.4, se realizó en frío con el objetivo de observar el flujo de triturado en ausencia del calor generado por las resistencias. Los resultados obtenidos con las modificaciones son buenos, presentando los siguientes logros: al reducir el espesor del tubo de alimentación, ya no se forman arcos en la tubería plástica. Además, el sello realizado con la resina Poxilina funciona de manera óptima, eliminando las fugas de material, mientras que el sistema de refrigeración logra enfriar adecuadamente la zona superior del cilindro. A continuación, en la Figura 4.27, se presentan imágenes de la prueba tomadas con una diferencia de cuatro segundos.

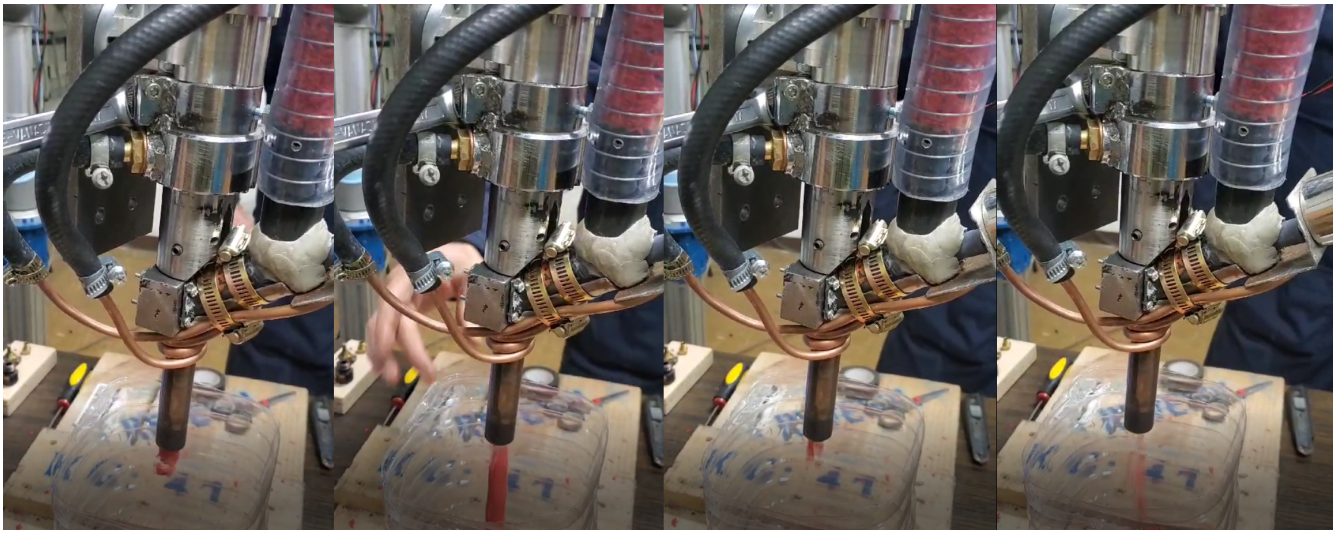


Figura 4.27: Prueba en frío. Fuente: material visual del equipo EFL.

Como se puede observar, en un momento dado el material triturado dentro del cilindro se aglomera y sale en una sola pieza. En la prueba en caliente se evaluará si esto genera problemas de flujo.

Prueba en caliente

La prueba en caliente evalúa si el sistema de refrigeración es capaz de eliminar el calor generado por las resistencias y evitar la aglomeración de triturado en la entrada al cilindro. Durante esta prueba, se logró una correcta extrusión del plástico durante al menos tres minutos, pero pasado ese tiempo,

el sinfín del tubo de alimentación se detuvo. Se retiró el sistema de alimentación y se observó que el sinfín estaba inclinado hacia arriba, probablemente debido a la acumulación de triturado en su parte inferior, lo que lo levantó y detuvo el flujo. Esto puede deberse a que no se estaba trabajando a la velocidad óptima del tornillo sinfín del cilindro, lo que provocó la acumulación de material. Por lo tanto, es un parámetro a estudiar en las próximas pruebas.

El bloque de metal del soporte del tubo de alimentación alcanzó una temperatura muy alta y, debido a su masa, tomó bastante tiempo en enfriarse. Se considera que es necesario modificarlo o sustituirlo y mejorar el sistema de refrigeración, ya que este exceso de calor puede ser otra causa del detenimiento del sinfín en el tubo de alimentación.

Analizando el material extruido en forma de filamento se observó que el diámetro de este es bastante uniforme y, al enfriarse, es un material bastante flexible y resistente. Durante la prueba, este filamento se enrolló en un carrete y también se hicieron figuras sobre una tabla.

A continuación, se presentan imágenes de la prueba en caliente.



Figura 4.28: Prueba en caliente. Fuente: material visual del equipo EFL.

4.3.6 Incorporación tornillo sinfín híbrido y cambio del soporte metálico

Con el objetivo de eliminar la gran cantidad de calor acumulado en el soporte metálico del tubo de alimentación, se procederá a su reemplazo. Además, se fabricará un tornillo sinfín híbrido, con una parte metálica y otra de plástico, con el propósito de aumentar su masa y, por ende, su inercia, lo que impedirá que se levante y se detenga.

Reemplazo del soporte metálico

A partir de dos abrazaderas en omega de 20 [mm], y utilizando el soporte metálico como guía para realizar las marcas y posteriores perforaciones, se construye el nuevo soporte del tubo de alimentación. La diferencia es notable; por su reducida masa se evitan los problemas de almacenamiento de calor, además de reducir el peso total del cabezal. En la Figura 4.29 se comparan estos dos elementos, y se muestra el nuevo soporte, ya montado al cabezal, sujetando el tubo de alimentación.

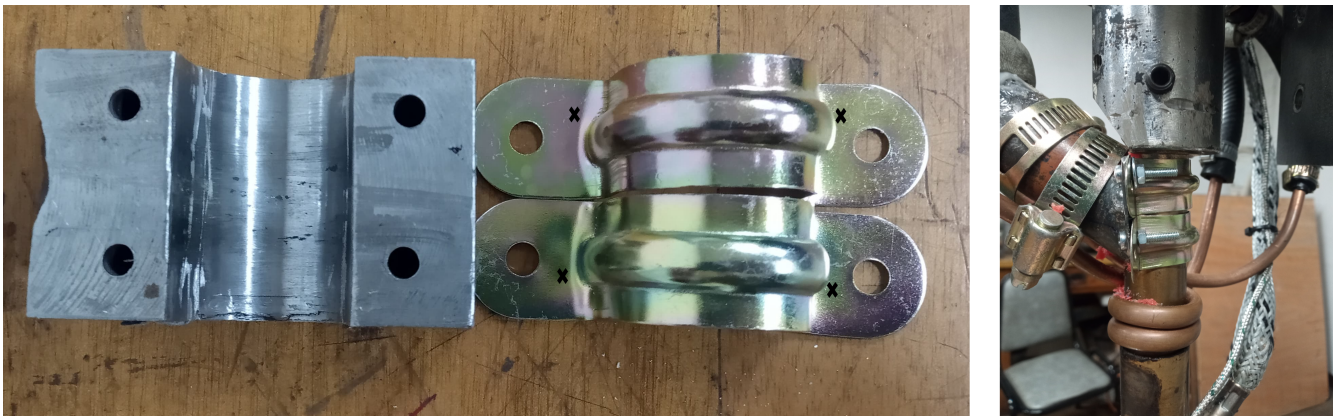


Figura 4.29: Trazado y ensamble del nuevo soporte para el tubo de alimentación. Elaboración propia.

Diseño y fabricación sinfín híbrido

A fin de tener un tornillo sinfín de mayor inercia, más resistente y que se acople mejor al motor, evitando que deslice en su interior, se fabrica un tornillo sinfín híbrido conformado por 3 piezas, como lo muestra el plano de la Figura 4.30

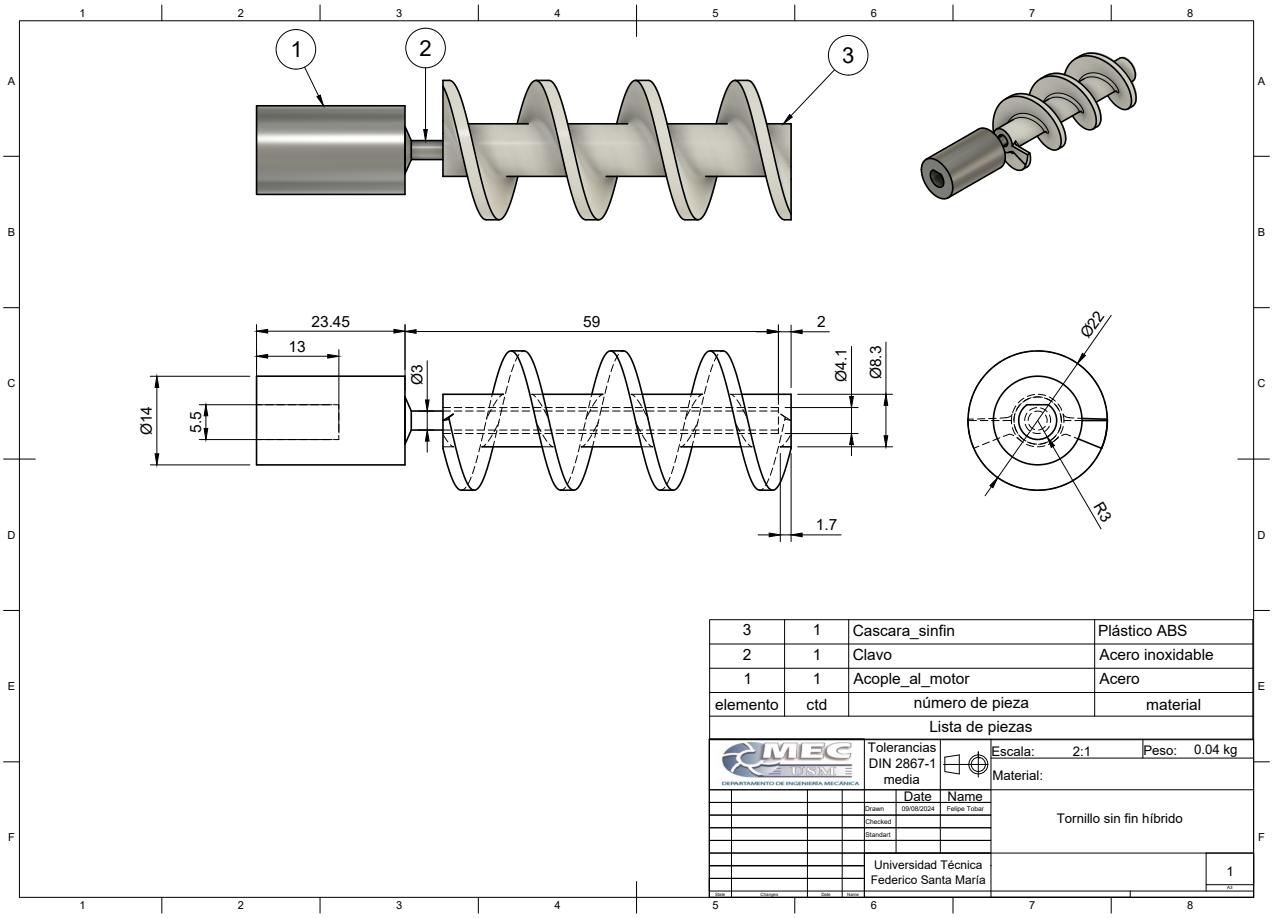


Figura 4.30: Plano del tornillo sinfín híbrido. Elaboración propia.

La pieza 1 es un cilindro de acero que tiene la entrada hembra para que se acople el motor. La pieza 2 es un clavo de acero inoxidable al que se cortó su punta a la medida requerida por la pieza 3, que viene a ser la cáscara del tornillo sinfín, con una perforación en su centro para que se acople al clavo. Esta pieza fue fabricada con impresión 3D utilizando filamento de ABS reforzado con carbono. El método de unión entre la pieza 1 y la 2, y entre la pieza 2 y la 3, se realizó utilizando resina epoxi. En la Figura 4.31 se presenta el tornillo sinfín híbrido.



Figura 4.31: Tornillo sinfín híbrido. Elaboración propia.

Resultados

Si bien el acople entre el eje metálico y el motor fue mejor que en los acoples directos entre motor y tornillo sinfín de ABS, el clavo, al poco tiempo de uso, se cortó en su cabeza (Figura 4.32). Se realizará nuevamente un acople entre el sinfín y el acople metálico, quitándole material a este último para que ambas piezas encajen y se evite la misma situación de corte, debido a que existirá una mayor área de contacto entre las piezas (ver sección 4.3.7).



Figura 4.32: Corte del clavo tras funcionamiento. Elaboración propia.

4.3.7 Nuevo acople tornillo sinfín híbrido

En consecuencia de que el sinfín híbrido funcionó bien por un corto tiempo, hasta que se cortó en su unión, se intenta nuevamente esta configuración, utilizando un acople con mayor área de apoyo. Este nuevo diseño queda representado en el plano de la Figura 4.33, al cual se le omitieron dimensiones ya que son iguales a las del plano 4.30, variando solamente en la zona de unión de ambas piezas.

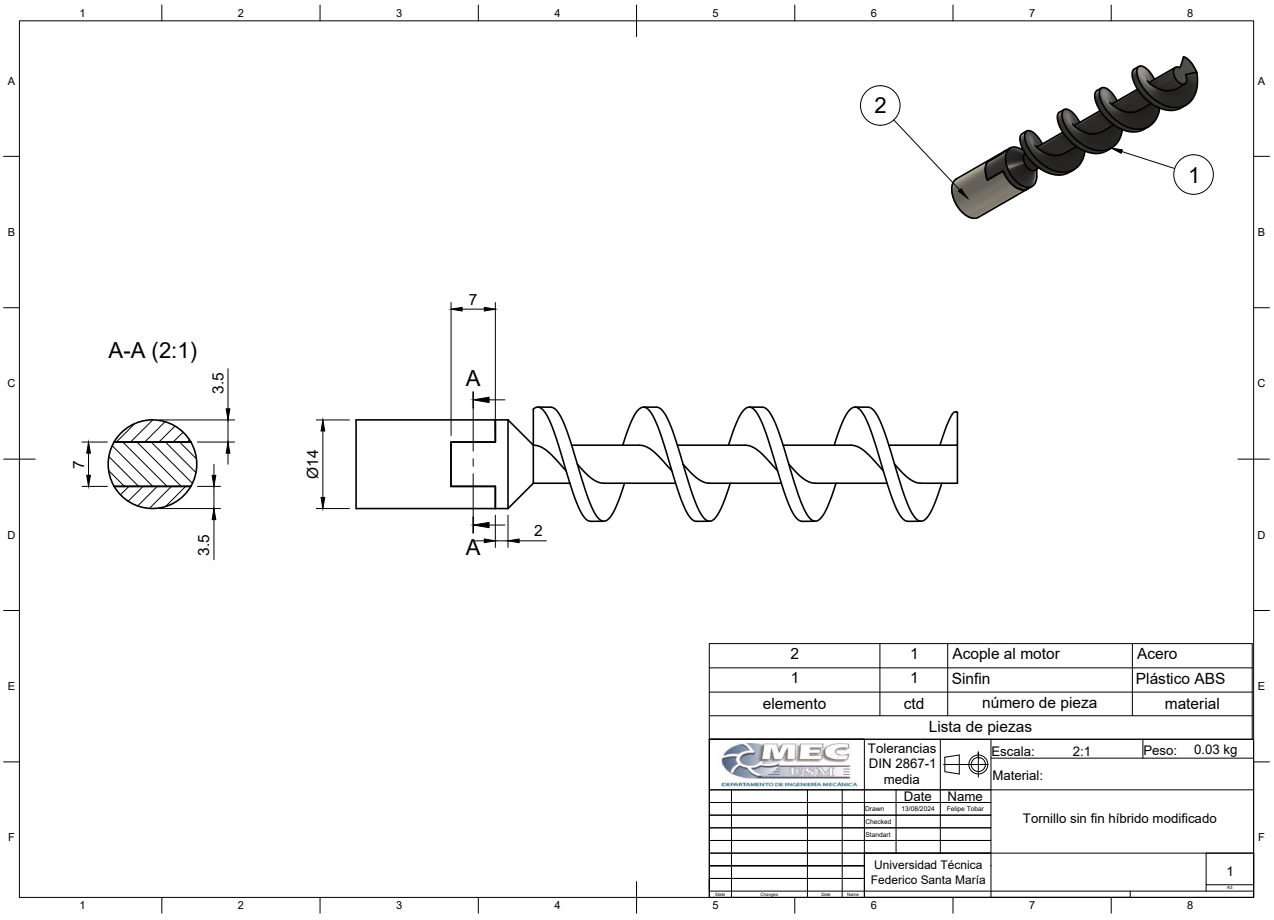


Figura 4.33: Plano tornillo sinfín híbrido con nuevo acople. Elaboración propia.

Construcción

La construcción de este nuevo diseño comenzó con la eliminación de material del acople metálico al motor. Para ello, se utilizó la fresadora y se eliminaron las rebabas con lima. Posteriormente, se hizo el corte macho al sinfín; para ello, se marcó utilizando de molde la pieza metálica recién trabajada y, con ayuda de una sierra, se cortó de forma fácil el ABS. Estas dos piezas se pegaron utilizando Poxipol. En la Figura 4.34 se muestran imágenes del proceso.

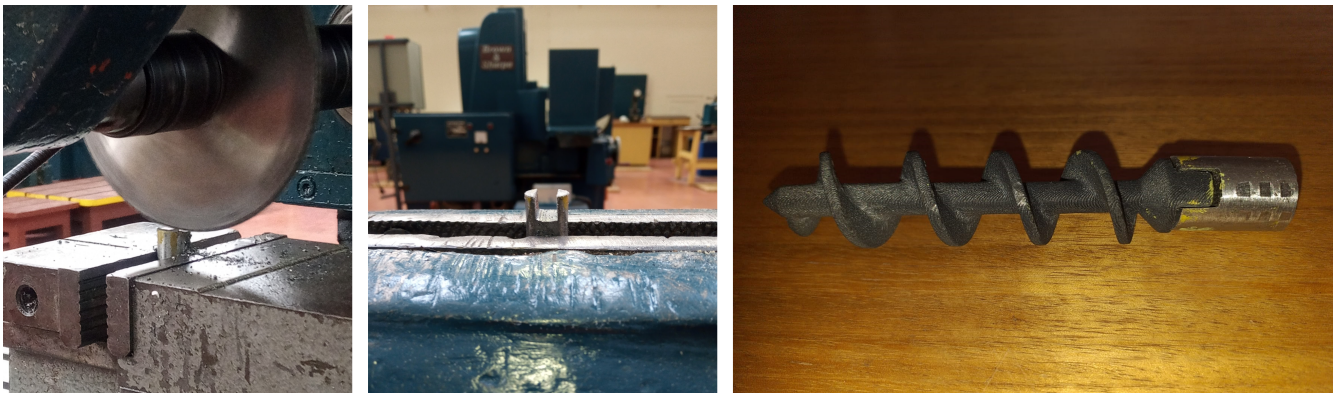


Figura 4.34: Elaboración del nuevo acople y presentación. Elaboración propia.

Resultados

Como se puede apreciar en la Figura 4.35, la extrusión de plástico inicia bastante bien; sin embargo, después de un tiempo, el plástico triturado comienza a desbordarse de la extrusora. Esto se debe a que aún falta ajustar las velocidades entre el tornillo sinfín del cabezal y el del tubo de alimentación. Esto generó un exceso de flujo de plástico triturado, lo que provocó una disminución de la temperatura en el cabezal, activando el sistema de seguridad que detiene el husillo hasta alcanzar la temperatura establecida. Esta detención causó una acumulación de material en el cabezal, aumentando la presión interior, lo que terminó soltando la masilla epoxi utilizada para sellar las fugas y ocasionando que el tornillo sinfín del alimentador se partiera en dos debido a la sobrecarga existente. Es evidente que la única solución es fabricar un tornillo sinfín completamente metálico y, con este funcionando, buscar la mejor configuración de velocidades. Aun así, los resultados son buenos, ya que el diámetro del filamento extruido es más uniforme que los obtenidos en pruebas anteriores. En la Figura 4.36 se muestra dicho filamento.

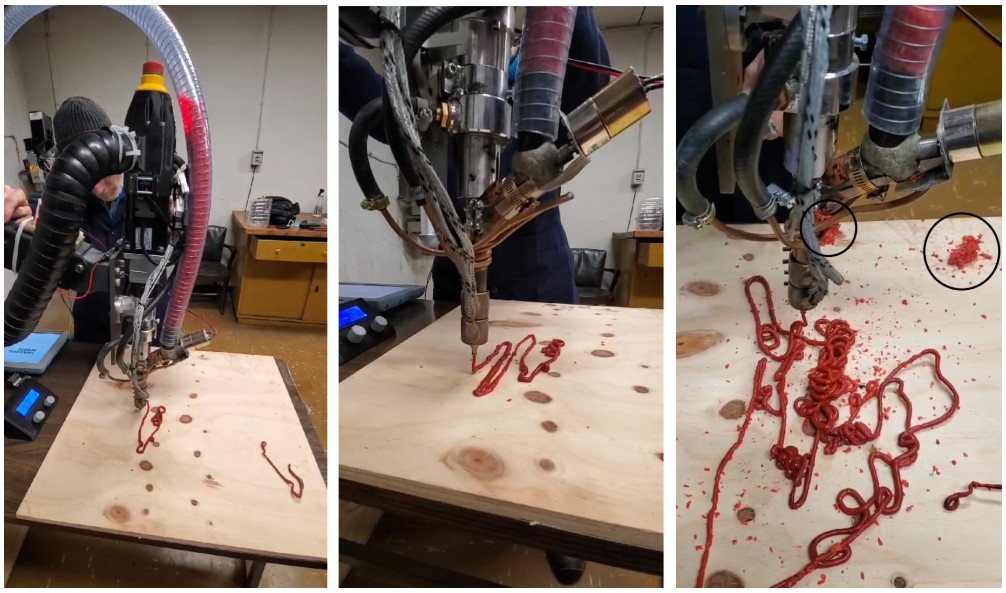


Figura 4.35: Prueba sinfín híbrido con acople mejorado.Elaboración propia.



Figura 4.36: Filamento obtenido. Elaboración propia.

4.3.8 Tornillo sinfín metalico

Fabricación

A partir de un tirafondo ferroviario, se fabricó un nuevo alimentador helicoidal completamente metálico. El primer paso fue ampliar el canal para permitir la circulación del material triturado. Esto se realizó en un torno, donde también se redujo el diámetro de la hélice para evitar el roce con el tubo de alimentación. Aparte de remover material para alcanzar las dimensiones de los modelos anteriores, esta reducción fue esencial para disminuir su peso. Por esta razón, se perforó el centro del tornillo con una broca de 12 [mm], exceptuando la zona de acople con el eje del motor, donde se utilizó una broca de 6 [mm].

El acople entre el sinfín y el eje del motor no era adecuado, lo que impedía que el motor transmitiera la potencia al sinfín. Por ello, se perforó el sinfín y se le hizo un hilo interno de 4 [mm], por el cual posteriormente se introdujo un perno Allen prisionero que ejerce presión sobre el eje del motor, permitiendo que este transmita el movimiento sin deslizamiento.

En la tabla 4.1 se detallan las características físicas del tornillo sinfín metálico antes y después de su mecanizado.

Tabla 4.1: Antes y después: tornillo sinfín metálico. Elaboración propia.

Características		
Largo [mm]	143	92
Diámetro exterior [mm]	24	21
Diámetro interior [mm]	17.5	12.5
Paso [mm]	12	12
Peso [kg]	0.347	0.147

Resultados

Utilizando boquilla de 2.5 [mm]

La primera prueba de esta nueva configuración se realizó utilizando una boquilla de 2.5 [mm]. Para esto, se llenó la manguera de alimentación con plástico triturado proveniente de tapas rojas y se estableció la temperatura de trabajo en 220 [°C], junto con una velocidad de 2500 [rpm] del husillo del cabezal. El proceso fue bastante bueno, siendo la primera vez que solo se interrumpió tres veces. Se consideró que la pausa en la operación se debió a la caída de la temperatura en el interior del cilindro, lo que provocó que el plástico no se derritiera y requería mayor fuerza, impidiendo su salida. Esto causó un atascamiento del material y aumentó la presión interna, ya que el tornillo sinfín del alimentador siguió funcionando hasta que llegó a un punto en que la fuerza necesaria para continuar girando fue tan alta que se detuvo. Pasado un tiempo, el cilindro volvió a alcanzar la temperatura adecuada y se reanudó el proceso. La razón de esta baja de temperatura se atribuyó a que la boquilla de 2.5 [mm] estaba expulsando mucho material, demandando mucho calor. Dentro de las posibles soluciones, sería utilizar una boquilla de menor tamaño, aumentar el largo del cilindro del cabezal para incorporar otra resistencia y también cambiar el motor por uno de mayor torque. En la Figura 4.37 se presentan imágenes de lo que fue la prueba del nuevo tornillo sinfín metálico.

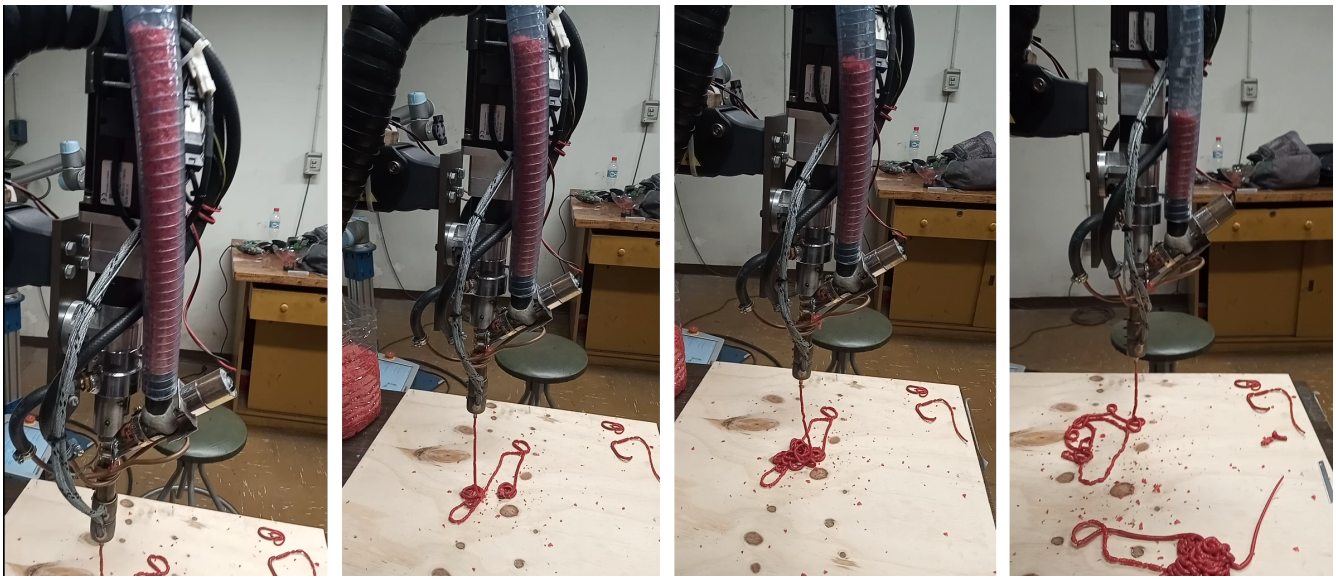


Figura 4.37: Prueba sinfín metálico, boquilla 2.5 [mm]. Elaboración propia.

En la Figura 4.38 se presenta el filamento obtenido en esta prueba. Se observa que no es el más regular en comparación con pruebas anteriores, y hay varios puntos donde el diámetro se reduce considerablemente. Estas variaciones en el diámetro pueden explicarse por las pequeñas pausas en el proceso de extrusión, las cuales son causadas por la disminución de temperatura.



Figura 4.38: Filamento obtenido con sinfin metalico, boquilla 2.5 [mm]. Elaboración propia.

Utilizando boquilla de 1 [mm]

Para comparar con la prueba anterior y verificar si persisten los problemas de baja de temperatura, diámetro irregular y detención de la extrusión, se utilizó una boquilla de 1 mm. El resultado fue mixto, con aspectos tanto positivos como negativos. Por un lado, el diámetro del filamento fue bastante uniforme, siendo el más regular obtenido en todo el trabajo, y no se presentaron problemas de baja de temperatura. Sin embargo, el aspecto desfavorable de usar una boquilla más pequeña, y por lo tanto tener un menor flujo másico, fue que el calor se propagó hasta la entrada del plástico triturado, provocando su aglomeración en el interior y deteniendo el motor en varias ocasiones. Se considera que la solución, ya mencionada previamente, sería extender el cilindro del cabezal, esta vez con el objetivo de alejar la fuente de calor de la entrada del triturado y mejorar el sistema de refrigeración, aumentando las vueltas de tubería de cobre flexible a lo largo del cilindro. A continuación, se presentan imágenes de lo que fue la extrusión.

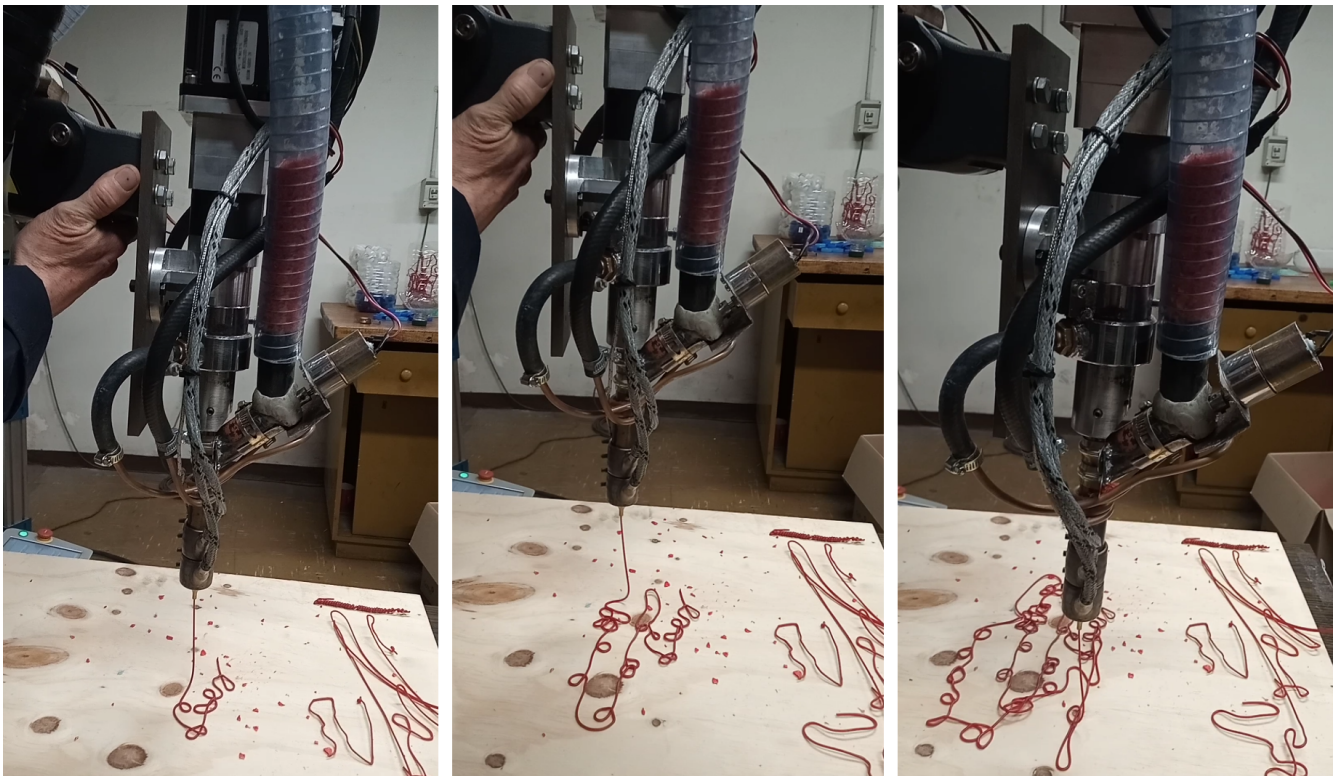


Figura 4.39: Prueba sinfín metálico, boquilla 1 [mm]. Elaboración propia.

En la Figura 4.40 se muestra el filamento obtenido con esta boquilla.



Figura 4.40: Filamento obtenido con sinfin metalico, boquilla 1 [mm]. Elaboración propia.

Capítulo 5

Resultados

A lo largo de este trabajo, se realizaron diversas pruebas de extrusión que evidenciaron problemas en la configuración del sistema. Como resultado, se llevaron a cabo varias modificaciones para lograr un filamento continuo y lo más uniforme posible. En la Figura 5.1 se presentan imágenes ordenadas de izquierda a derecha, desde la más antigua hasta la más reciente.

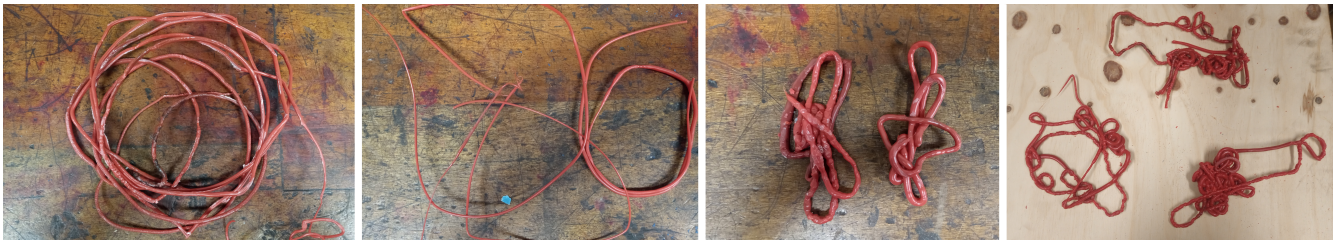


Figura 5.1: Filamentos obtenidos de distintas extrusiones. Elaboración propia.

La primera extrusión revela un filamento muy irregular, con partes quemadas. Esto indica que hubo una pausa en la extrusión debido a un atasco de material, lo que provocó que el plástico permaneciera demasiado tiempo en el interior del cilindro, ocasionando que este se quemara. Esta primera extrusión demostró la necesidad de incorporar un tornillo sinfín en la zona de alimentación para evitar futuras detenciones.

La segunda imagen muestra un filamento sin quemaduras y más regular en comparación con el primero. Esta extrusión se realizó con el primer filamento fabricado en PLA. En la tercera foto, se observan dos filamentos notablemente cortos y de un diámetro considerable, lo que demuestra un aumento del flujo extruido, facilitado por el tornillo sinfín fabricado de ABS.

Finalmente, la cuarta imagen corresponde a la última extrusión, realizada con el tornillo sinfín metálico. En esta prueba, se obtuvo un filamento largo y de gran diámetro, aunque presenta zonas delgadas debido a la pérdida de temperatura causada por el elevado flujo másico de material triturado.

Todas las pruebas anteriores se realizaron con una boquilla de 2.5 [mm], y en cada una de ellas el número de detenciones fue disminuyendo, pero la irregularidad del filamento se mantuvo prácticamente constante, lo que indicaba que la configuración aún no era la óptima. Por esta razón, se llevó a cabo una prueba con una boquilla de 1 [mm], obteniendo excelentes resultados en cuanto a la uniformidad del filamento y disminución del número de detenciones. En la Figura se presenta el filamento obtenido comparado con uno comercial para impresión 3D, en donde se observa que la regularidad en el tamaño del filamento es similar al del producto comercializado.



Figura 5.2: Filamento boquilla 1 [mm] vs filamento comercial. Elaboración propia.

Como análisis general de los resultados obtenidos, se puede afirmar que aún hay trabajo por hacer para alcanzar el objetivo de un flujo constante y regular; sin embargo, lo avanzado durante este estudio es de gran valor. La inclusión de un tornillo sinfín adicional en la zona de alimentación resultó ser una decisión acertada para acercarse al objetivo de lograr una impresión 3D continua con material reciclado proveniente de tapas de botellas y envases.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Finalizando este trabajo, podemos concluir que las diversas modificaciones realizadas al cabezal extrusor se acercan bastante al objetivo principal de alimentarlo de plástico triturado proveniente de tapas recicladas, faltando por perfeccionar los atascos de material y la regularidad del filamento obtenido. A pesar de lo anterior, los resultados obtenidos representan un buen acercamiento al objetivo final de contar con una impresora 3D alimentada con material reciclado, que permita imprimir grandes volúmenes a una velocidad muy superior a la de las impresoras 3D convencionales y a un costo mucho menor.

Dentro de las recomendaciones que se pueden mencionar para lograr mejores resultados están las siguientes:

1. Cambiar el motor del tornillo sinfín del tubo de alimentación por uno de mayor potencia, priorizando torque y disminuyendo las rpm. Esto con el objetivo de evitar atascos por falta de torque y disminuir el flujo másico de triturado que provoca la caída de temperatura en el cilindro.

2. Aumentar el tamaño del cilindro del cabezal a fin de cumplir tres objetivos:

   (a) Alejar el calor de las resistencias de la zona de entrada de plástico, ya que este aglomera el plástico y provoca atascos.

   (b) Dar espacio para extender el sistema de refrigeración.

   (c) Proporcionar espacio para una tercera resistencia en caso de ser necesario.

3. Cambiar la posición inclinada del tubo de alimentación y su forma de unirse al cabezal, por una posición horizontal y una conexión que permita mayor mantenibilidad.

Referencias

[1] UNESCO and International Centre for Engineering Education. Ingeniería para el desarrollo sostenible: resumen. Technical report, UNESCO, 2021.

[2] Electrónica Edimar. Fabricacion aditiva: Definición, procesos y beneficios. Recuperado de `https://edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/`.

[3] CAIRPLAS. Qué son los plásticos. Recuperado de https://cairplas.org.ar/plasticos/.

[4] Marpa Vacuum. ¿cómo se fabrica el plástico? el viaje de los polímeros hasta el producto final en 5 pasos. Recuperado de https://marpavacuum.com/como-se-fabrica-el-plastico-5-pasos/.

[5] envaselia. Tipos de plásticos: termoplásticos, termoestables y elastómeros. Recuperado de https://shorturl.at/Gid34.

[6] Soluciones de embalaje. El manual de los tipos de plástico. Recuperado de https://solucionesdeembalaje.com/guia-completa-tipos-plastico/.

[7] ACEROMAFE. Polímeros termoestables: qué son, clasificación y ventajas. Recuperado de https://www.aceromafe.com/polimeros-termoestables/.

[8] Autodesk. Fabricación aditiva. Recuperado de `https://www.autodesk.com/es/solutions/additive-manufacturing`.

[9] Dassault Systemes. Fdm - modelado por deposición fundida. Recuperado de https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling.

[10] Dassault Systemes. Impresión 3d. Recuperado de https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing.

[11] Dassault Systemes. Los principales retos de la fabricación aditiva y cómo superarlos. Recuperado de https://shorturl.at/vLxZu.

[12] Raise3D. ¿qué es un filamento para impresora 3d? definición, tipos y usos. Recuperado de https://www.raise3d.com/academy/what-is-3d-printer-filament/.

[13] All3DP. How is 3d printer filament made? Recuperado de https://all3dp.com/2/how-3d-printer-filament-made/.

[14] Nurel. Extrusión filamentos y otras extrusiones. Recuperado de https://nurel.com/division-biopolimeros/procesos/extrusion-filamentos/.

[15] sicnova3d. Guía para elegir filamentos para impresoras 3d. Recuperado de https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/guia-filamentos-impresoras-3d/.

[16] 3Dnatives. Guía completa: El filamento de abs en la impresión 3d. Recuperado de https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/.

[17] 3Dnatives. El plástico petg en la impresión 3d. Recuperado de https://www.3dnatives.com/es/el-plastico-petg-en-la-impresion-3d-181220192/.

[18] 3Dnatives. ¿qué características tiene el nylon en la impresión 3d? Recuperado de https://www.3dnatives.com/es/caracteristicas-tiene-nylon-en-impresion-3d-120320202/.

[19] crear4d. El poder del nylon en impresión 3d: Cómo las industrias están optimizando sus procesos. Recuperado de https://shorturl.at/DYLP4.

[20] 3Dnatives. Guía completa: El tpu en la impresión 3d. Recuperado de https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-040620202/.

[21] DKV. Pellets de plástico: que son, para qué sirven y cuáles son sus riesgos. Recuperado de https://shorturl.at/bTc6B.

[22] envaselia. Tereftalato de polietileno. Recuperado de https://www.envaselia.com/blog/tereftalato-de-polietileno-id12.htm.

[23] Linseis. Tereftalato de polietileno (pet): una investigación en profundidad. Recuperado de https://shorturl.at/2EofR.

[24] envaselia. Qué es el polietileno de alta densidad. Recuperado de https://shorturl.at/rl8QV.

[25] Tatiana Rojas. Polietileno de baja densidad (ldpe): guía de propiedades, aplicaciones y beneficios. Recuperado de https://shorturl.at/TUSpQ.

[26] David Ricardo Muñoz. Polipropileno: qué es y sus características. Recuperado de https://www.plastico.com/es/noticias/polipropileno-que-es-y-sus-caracteristicas.