



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

**DESARROLLO DE UN SISTEMA EXTRUSOR PARA LA  
FABRICACIÓN DE FILAMENTO RECICLADO A PARTIR DE  
RESIDUOS PLÁSTICOS APLICADO A EMPRENDIMIENTOS**

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

AUTORES: Gregory Joel Toro Rojas  
TUTOR: Michelle de los Ángeles Cárdenas Ibáñez

Guayaquil - Ecuador  
2025

26/08/25  
19:00

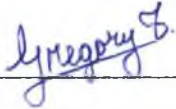
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Gregory Joel Toro Rojas** con documento de identificación N° **1317909842** manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 26 de agosto del año 2025

Atentamente,



---

Gregory Joel Toro Rojas  
1317909842

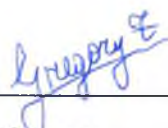
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **Gregory Joel Toro Rojas** con documento de identificación N° **1317909842** expreso por voluntad propia y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN SISTEMA EXTRUSOR PARA LA FABRICACIÓN DE FILAMENTO RECICLADO A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS APLICADO A EMPRENDIMIENTOS**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 26 de agosto del año 2025

Atentamente,



---

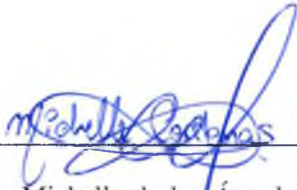
Gregory Joel Toro Rojas  
1317909842

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Michelle de los Ángeles Cárdenas Ibáñez**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN SISTEMA EXTRUSOR PARA LA FABRICACIÓN DE FILAMENTO RECICLADO A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS APLICADO A EMPRENDIMIENTOS**, realizado por **Gregory Joel Toro Rojas** con documento de identificación N° **1317909842**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de agosto del año 2025

Atentamente,



---

Ing. Michelle de los Ángeles Cárdenas Ibáñez

## I. DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia por este logro, por apoyarme en este proceso de formación como profesional y como persona. A mis padres el Lic. Julio Toro Figueroa y la Lic. Isis Rojas Gilces quienes siempre estuvieron conmigo, me apoyaron en todos los sentidos y me aconsejaron y enseñaron lo necesario para mi formación, sobre todo a mi hermano el Ing. Jordy Toro Rojas quien fue mi compañero que me apoyo cuando lo necesitaba desde siempre en todo momento, con quien he compartido aprendizajes y desafíos que fortalecieron no solo el camino juntos, también nuestro lazo como hermanos. Asimismo dedico este logro a mis amigos y seres queridos que me alentaron para finalizar este proceso cuando más lo necesitaba. En memoria de mi tío Daniel Rojas Gilces, quién en vida me motivo y siempre me decía que puedo ser Ingeniero y siempre tuvo fe en mi, los recuerdos con él siempre permanecerán como un tesoro, fortaleza y gratitud de quien soy hoy en día al igual de aquellos que en algún momento estuvieron a mi lado.

## II. AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por siempre darme la fortaleza de seguir con la frente en alto y darme fuerzas para ser una mejor versión de mi cada día. A mis padres quienes nunca dudaron de mis capacidades y siempre me dijeron lo que era capaz de hacer, a mi hermano por siempre estar a mi lado apoyándome y dándome la mano cuando lo necesitaba, agradezco siempre que me hayan hecho sentir acompañado de ellos a pesar de la distancia entre ciudades. También agradezco a aquellas personas que ya no están a mi lado y me enseñaron muchas cosas valiosas e importantes para mi desarrollo y crecimiento en especial mis familiares y amigos que estuvieron siempre conmigo al igual a las nuevas personas que se integran en mi vida y me ayudan y enseñan que con la motivación y disciplina necesarias se logran grandes cosas.

### III. RESUMEN

Para la fabricación de filamento reciclado a partir de desechos plásticos PLA, se crea un sistema extrusor que está dirigido a pequeños negocios que emplean la impresión en tres dimensiones. El diseño incorpora subsistemas de control, electrónicos y mecánicos, teniendo en cuenta los parámetros de bobinado, enfriamiento, temperatura y extrusión. Dentro de la metodología, se empleó modelado CAD, puesta en práctica del firmware Marlin y validación experimental a través de ensayos de extrusión. Los resultados muestran que es posible reducir los costes operativos, utilizar el material desechado y contribuir a la sostenibilidad a través de la reutilización de polímeros, lo que confirma su viabilidad técnica y económica en ambientes de manufactura aditiva de pequeña escala.

#### IV. ABSTRACT

To manufacture recycled filament from PLA plastic waste, an extruder system is designed for small businesses that use 3D printing. The design incorporates control, electronic, and mechanical subsystems, taking into account winding, cooling, temperature, and extrusion parameters. The methodology used included CAD modeling, implementation of the Marlin firmware, and experimental validation through extrusion tests. The results show that it is possible to reduce operating costs, utilize discarded material, and contribute to sustainability through polymer reuse, confirming its technical and economic viability in small-scale additive manufacturing environments.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>DEDICATORIA</b>	5
<b>II.</b>	<b>AGRADECIMIENTO</b>	6
<b>III.</b>	<b>RESUMEN</b>	7
<b>IV.</b>	<b>ABSTRACT</b>	8
<b>V.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>VI.</b>	<b>PROBLEMA</b>	2
<b>VII.</b>	<b>Justificación</b>	3
<b>VIII.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	4
	VIII-A. Objetivo general . . . . .	4
	VIII-B. Objetivos específicos . . . . .	4
<b>IX.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	5
	IX-A. Antecedentes teóricos . . . . .	5
	IX-B. Extrusora de Filamento . . . . .	5
	IX-C. Ácido poliláctico (PLA) . . . . .	6
	IX-D. Software CAD SolidWorks . . . . .	6
	IX-E. Software Bambu Studio . . . . .	7
	IX-F. Software Pronterface . . . . .	8
	IX-G. Tolva de alimentación de PLA . . . . .	9
	IX-H. Tornillo extrusor de acero inoxidable D12 x 215mm . . . . .	10
	IX-I. Boquilla extrusora 1.75mm . . . . .	11
	IX-J. Cámara de extrusión . . . . .	12
	IX-K. Pantalla LCD . . . . .	13
	IX-L. Cartucho calefactor 24V/40W . . . . .	13
	IX-M. Fuente de alimentación 24V/15A . . . . .	14
	IX-N. Ventilador axial de 24V . . . . .	15
	IX-Ñ. Microcontrolador (PLACA MKS) . . . . .	16
	IX-O. Sensor de temperatura (termistor NTC 100k) . . . . .	17
	IX-P. Motor paso a paso Nema 23 . . . . .	18
	IX-Q. Motor Nema 17 . . . . .	19
	IX-R. Driver de motor nema 23 . . . . .	20
	IX-S. Driver de motor nema 17 . . . . .	20
	IX-T. Rodamientos . . . . .	21
<b>X.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	23
	X-A. Diseño conceptual y planificación . . . . .	23
	X-B. Sistema mecánico de la extrusora . . . . .	23
	X-C. Sistema electrónico . . . . .	24
	X-D. Sistemas de control . . . . .	24
	X-E. Configuraciones del Firmware . . . . .	24
	X-F. Elaboración de la extrusora . . . . .	25
	X-G. Firmware y programación . . . . .	61

<b>XI. RESULTADOS</b>	65
<b>XII. CONCLUSIONES</b>	70
<b>XIII. RECOMENDACIONES</b>	71
<b>XIV. CRONOGRAMA</b>	72
<b>XV. Presupuesto</b>	73
<b>XVI. ANEXOS</b>	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Impresión 3D [30]. . . . .	5
2.	Filamento de PLA [32]. . . . .	6
3.	SolidWorks. Fuente propia. . . . .	7
4.	Bambu Studio. Fuente propia. . . . .	8
5.	Bambulab.[35]. . . . .	8
6.	Software Pronterface.[36]. . . . .	9
7.	Tolva de alimentación de PLA [38]. . . . .	10
8.	Tornillo extrusor [39]. . . . .	10
9.	Tornillo extrusor de acero inoxidable D12 x 215mm [42]. . . . .	11
10.	Boquilla extrusora 1.75mm [44]. . . . .	12
11.	Cámara de extrusión [46]. . . . .	12
12.	Pantalla LCD Smart 2004 [48]. . . . .	13
13.	Cartucho calefactor 24V/40W [49]. . . . .	14
14.	Fuente de alimentación 24V/15A [50]. . . . .	15
15.	Ventilador axial de 24V [52]. . . . .	16
16.	Placa MKS [54] . . . . .	17
17.	Termistor NTC 100k [56]. . . . .	18
18.	Motor paso a paso Nema 23 [58]. . . . .	19
19.	Motor paso a paso Nema 17 [59]. . . . .	19
20.	Driver de motor nema 23. [61]. . . . .	20
21.	Driver de motor nema 17. [63]. . . . .	21
22.	Rodamientos [65]. . . . .	22
23.	Diagrama por bloques del funcionamiento de la extrusora de filamento. Fuente propia. . . . .	23
24.	Extrusora de filamento reciclado. Fuente propia. . . . .	25
25.	Calculo de Torque. Fuente propia. . . . .	25
26.	Calculo de dilatación. Fuente propia. . . . .	26
27.	Cámara calefactora. Fuente propia. . . . .	27
28.	Pieza Impresa 1. Fuente propia. . . . .	27
29.	Pieza Impresa 2. Fuente propia. . . . .	28
30.	Pieza Impresa 3. Fuente propia. . . . .	28
31.	Receptáculo de filamento. Fuente propia. . . . .	28
32.	Modulo de extrusión. Fuente propia. . . . .	29
33.	Pieza impresa 4. Fuente propia. . . . .	29
34.	Base de la extrusora. Fuente propia. . . . .	30
35.	Pieza impresa 5. Fuente propia. . . . .	30
36.	Pieza impresa 6. Fuente propia. . . . .	31
37.	Pieza impresa 7. Fuente propia. . . . .	31
38.	Pieza impresa 8. Fuente propia. . . . .	31
39.	Conexiones de alimentación. Fuente propia. . . . .	32
40.	Placa MKS. Fuente propia. . . . .	32
41.	Dataset MKS [78] . . . . .	33
42.	Conexión pantalla LCD. Fuente propia. . . . .	33
43.	Pieza impresa 9. Fuente propia. . . . .	33
44.	Ajuste de cableado de motor nema 17. Fuente propia. . . . .	34
45.	Conexión de filtrado de filamento. Fuente propia. . . . .	34
46.	Conexión de bobinado de filamento. Fuente propia. . . . .	35
47.	Conexión de los cartuchos calefactores. Fuente propia. . . . .	35
48.	Conexión del termistor. Fuente propia. . . . .	36
49.	Conexión de la fuente de alimentación a la MKS. Fuente propia. . . . .	36

50.	Controlador del motor nema 23. Fuente propia. . . . .	37
51.	Conexión de la fuente de alimentación al driver. Fuente propia. . . . .	37
52.	Conexiones del motor nema 23 al driver. Fuente propia. . . . .	38
53.	Conexiones del motor nema 23 al driver. Fuente propia. . . . .	38
54.	Conexiones del motor nema 23 al driver. Fuente propia. . . . .	39
55.	Conexión de la pantalla LCD a la MKS. Fuente propia. . . . .	39
56.	Pieza impresa 10. Fuente propia. . . . .	40
57.	Pieza impresa 11. Fuente propia. . . . .	40
58.	Pieza impresa 12. Fuente propia. . . . .	41
59.	Sección inicial del bobinado. Fuente propia. . . . .	41
60.	Sección cerrada del bobinado. Fuente propia. . . . .	42
61.	Pieza impresa 13. Fuente propia. . . . .	42
62.	Ajuste del bobinado inicial. Fuente propia. . . . .	43
63.	Pieza impresa 14. Fuente propia. . . . .	43
64.	Pieza impresa 15. Fuente propia. . . . .	43
65.	Pieza impresa 16. Fuente propia. . . . .	44
66.	Pieza impresa 17. Fuente propia. . . . .	44
67.	Pieza impresa 18. Fuente propia. . . . .	44
68.	Pieza impresa 19. Fuente propia. . . . .	45
69.	Pieza impresa 20. Fuente propia. . . . .	45
70.	Pieza impresa 21. Fuente propia. . . . .	45
71.	Pieza impresa 22. Fuente propia. . . . .	46
72.	Pieza impresa 23. Fuente propia. . . . .	46
73.	Pieza impresa 24. Fuente propia. . . . .	46
74.	Conexión del perfil de aluminio. Fuente propia. . . . .	47
75.	Sección de oscilación del bobinado. Fuente propia. . . . .	47
76.	Unión del bobinado. Fuente propia . . . . .	48
77.	Pieza impresa 25. Fuente propia . . . . .	48
78.	Corredera del bobinado. Fuente propia . . . . .	49
79.	Pieza impresa 26. Fuente propia . . . . .	49
80.	Inclusión de motor nema 17. Fuente propia . . . . .	50
81.	Pieza impresa 27. Fuente propia . . . . .	50
82.	Pieza impresa 28. Fuente propia . . . . .	51
83.	Sistema de bobinado. Fuente propia . . . . .	51
84.	Pieza impresa 29. Fuente propia . . . . .	52
85.	Pieza impresa 30. Fuente propia . . . . .	52
86.	Pieza impresa 31. Fuente propia . . . . .	52
87.	Filtro de fusión. Fuente propia . . . . .	53
88.	Sistema de extrusión. Fuente propia . . . . .	53
89.	Pieza impresa 32. Fuente propia . . . . .	54
90.	Pieza impresa 33. Fuente propia . . . . .	54
91.	Pieza impresa 34. Fuente propia . . . . .	54
92.	Pieza impresa 35. Fuente propia . . . . .	55
93.	Sistema de filtrado del filamento. Fuente propia . . . . .	55
94.	Pieza impresa 36. Fuente propia . . . . .	56
95.	Ventilador de enfriamiento 1. Fuente propia . . . . .	56
96.	Ventilador de enfriamiento 2. Fuente propia . . . . .	57
97.	Ventilador de enfriamiento 3. Fuente propia . . . . .	57
98.	Pieza impresa 37. Fuente propia . . . . .	58
99.	Pieza impresa 38. Fuente propia . . . . .	58

100.	Pieza impresa 39. Fuente propia . . . . .	58
101.	Pieza impresa 40. Fuente propia . . . . .	59
102.	Pieza impresa 41. Fuente propia . . . . .	59
103.	Final de carrera. Fuente propia . . . . .	59
104.	Pieza impresa 42. Fuente propia . . . . .	60
105.	Pieza impresa 43. Fuente propia . . . . .	60
106.	Sección del final de carrera. Fuente propia . . . . .	60
107.	Conexión de final de carrera. Fuente propia . . . . .	61
108.	Códigos Marlin 1. Fuente propia . . . . .	61
109.	Códigos Marlin 2. Fuente propia . . . . .	62
110.	Códigos Marlin 3. Fuente propia . . . . .	62
111.	Datos de PID de la extrusora de filamento reciclado. Fuente propia . . . . .	63
112.	Autotune Start de la extrusora de filamento. Fuente propia . . . . .	63
113.	PID de la extrusora de filamento. Fuente propia . . . . .	64
114.	Main de la extrusora. Fuente propia. . . . .	65
115.	Condiciones de extrusión. Fuente propia. . . . .	65
116.	/Main de extrusión. Fuente propia. . . . .	66
117.	Inicio de la extrusión. Fuente propia. . . . .	66
118.	Parámetros de la extrusión iniciada. Fuente propia. . . . .	66
119.	Extrusión de filamento reciclado. Fuente propia. . . . .	67
120.	Filamento bobinado. Fuente propia. . . . .	67
121.	Costos de la extrusora. Fuente propia. . . . .	68
122.	Costos de la extrusora. Fuente propia. . . . .	68
123.	Anexo 1. Fuente propia . . . . .	77
124.	Anexo 2. Fuente propia . . . . .	77
125.	Anexo 3. Fuente propia . . . . .	78
126.	Anexo 4. Fuente propia . . . . .	78
127.	Anexo 5. Fuente propia . . . . .	79
128.	Anexo 6. Fuente propia . . . . .	79
129.	Anexo 7. Fuente propia . . . . .	80
130.	Anexo 8. Fuente propia . . . . .	80

#### ÍNDICE DE TABLAS

I.	Cronograma . . . . .	72
II.	Presupuesto . . . . .	73

## V. INTRODUCCIÓN

La demanda de filamentos plásticos, en particular el ácido poliláctico (PLA), ha aumentado debido a la mayor utilización de la manufactura aditiva. Este material se utiliza con frecuencia en impresión 3D por su sencillez y su baja toxicidad. No obstante, este aumento ha producido un gran volumen de residuos a partir de impresiones fallidas, soportes desechados y prototipos defectuosos. En caso de que no existan procesos de reciclaje accesibles, estos finalmente se acumulan como basura y perjudican tanto al medio ambiente como a la economía del usuario. Pese a que el PLA es un biopolímero renovable, su proceso de degradación necesita condiciones industriales determinadas, que escasean en los hogares; esto restringe su sostenibilidad. El elevado precio de las extrusoras de filamento que están disponibles en el mercado es una de las barreras principales para la reducción de este problema. Estos equipos, al estar concebidos para usos industriales o semindustriales, son poco asequibles para usuarios independientes, entidades educativas y pequeños negocios. La ausencia de tecnologías asequibles que hagan posible reprocesar desechos de PLA en nuevo filamento causa una dependencia del material virgen, lo cual se traduce en un aumento de los costos operativos y en un ciclo de producción lineal que no es muy sostenible. Como respuesta a este problema, se propone desarrollar un sistema extrusor de escritorio que tenga la capacidad de convertir desechos plásticos en filamento reciclado. El diseño incorpora subsistemas de control, electrónicos y mecánicos que garantizan un proceso de extrusión, regulación térmica, enfriamiento y bobinado estables. El planteamiento metodológico incluye el empleo de instrumentos CAD para la modelación y el ensamblaje, la aplicación del firmware Marlin para supervisar el proceso, y la comprobación experimental a través de pruebas de extrusión que permitan asegurar la calidad del filamento conseguido. El propósito principal de este proyecto es poner en marcha un sistema extrusor para producir filamento reciclado con desechos plásticos, enfocado en fomentar una producción sostenible en la impresión 3D de pequeñas empresas. Concretamente, se pretende: crear un sistema extrusor de PLA reciclado que funcione con un motor rotativo; establecer un mecanismo de bobinado y un sistema de control de temperatura para garantizar la estabilidad del filamento en dimensiones y su continuidad; y mediante una evaluación de costos, verificar la funcionalidad económica de la máquina para empresas pequeñas. Esta iniciativa es importante porque tiene la capacidad de reducir el volumen de desechos plásticos que provienen de la impresión 3D, los gastos operativos relacionados con la adquisición de filamento virgen y fomentar la economía circular en contextos con recursos escasos. Igualmente, es una solución tecnológica que puede replicarse y que facilita que la gente tenga acceso a procesos de reciclaje, lo cual posibilita que los centros educativos, las comunidades y los talleres implementen hábitos sostenibles en sus actividades productivas. En resumen, el sistema extrusor que se propone no solo brinda una solución técnica a la cuestión del reciclaje de PLA, sino que además potencia el modelo de producción responsable en la manufactura aditiva al convertir desechos en materia prima valiosa y colaborar con la sostenibilidad en términos económicos y medioambientales para los usuarios.

## VI. PROBLEMA

A nivel mundial el uso de plásticos ha aumentado en gran manera y se ha propagado significativamente la generación de residuos de filamentos de ácido poliláctico (PLA), al paso del tiempo representan un problema ambiental si no se usa un adecuado gestionamiento y control [1]. En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), se realizó una investigación del impacto ambiental de la producción de PLA en Guayaquil. Usando una metodología de análisis de Ciclo de Vida (ACV), se evaluó que la producción de 1 metro cuadrado de PLA crea 0.85kg de CO<sub>2</sub> equivalente. El 74.32 % de este impacto es proveniente del uso de PLA, junto al consumo de electricidad equivalente al 20.41 % y el uso de polietilenglicol que es del 5.05 %. La producción de PLA en Ecuador, el 14 % de cambios climáticos son producidos por residuos plásticos a comparación con su producción en EEUU, debido al uso de fertilizantes y prácticas agrícolas locales [2].

Un problema copartícipe asociado a la fabricación aditiva es el exponencial uso de PLA, en ciertos casos suele ser un material biodegradable o reciclable, termina siendo convertida en un desecho, principalmente en medios no industriales o domésticos [3]. Una impresión fallida, soportes o prototipos defectuosos generan residuos que acumulados en masa, ayudan a la contaminación de residuos plásticos. El PLA, si bien, es un bioplástico derivado del maíz o caña de azúcar, su efectiva degradación necesita condiciones industriales específicas que muchos usuarios tienen accesibilidad limitada [4]. La escasez de sistemas accesibles que aporten al reciclaje de material, ha desarrollado un ciclo de usar y desear contrario al modelo de economía circular que se promueve en la actualidad en las políticas de sostenibilidad. Ante este desafío, es urgente un diseño tecnológico que solucione y permita reducir los desechos de este material para reprocesarlo y recomponer al ciclo productivo, disminuyendo el impacto ambiental que provoca el proceso de impresión 3D [5].

Otro obstáculo para el reciclaje eficiente en la impresión 3D es el elevado costo de máquinas especializadas, como las extrusoras de filamento. Las opciones mercantiles tanto nacional como internacionales, suelen ser muy altos los gastos económicos, generando una limitación adquisitiva para las pequeñas empresas, talleres, usuarios o instituciones educativas, agravando la situación en países que siguen en desarrollo, en donde las importaciones, impuestos y logísticas contienen un papel económico significativo, lo cual genera muchas carencias de este tipo de tecnología [6]. El costo elevado de las máquinas no solo imposibilita el reciclaje del plástico, sino que influye en la necesidad de comprar nuevos filamentos, revalorizando la producción y reduciendo la sostenibilidad del proceso [7]. Por ende, ante la ausencia y limitación de máquinas extrusoras, representan una barrera técnica y económica en la adaptación experimental sostenible en impresión 3D, imposibilitando el desarrollo de modelos productivos más circulares e independientes [8].

Otro problema es la cantidad numerosa de piezas impresas que, por fallas de diseño, configuración o fallos en el proceso de impresión, resultan inútiles [9]. Las piezas defectuosas, se presentan como pérdidas de materia prima, pero también resulta en un retraso de tiempo y dinero que fueron invertidos en la fabricación [10]. Los pequeños emprendimiento con recursos limitados, pueden llegar a representar como costos significativos y tener un choque considerable en la rentabilidad operacional [11]. Existen caso en donde estos residuos suelen descartarse por no contar con las herramientas idóneas para realizar el debido reciclaje, cuando realmente puede ser triturado, reprocesado y convertirse en un filamento [12]. Implementar una extrusora de escritorio que posibilite transformar residuos plásticos en material nuevo que sea útil, podría no solo significar en una reducción significativa de volumen de residuos, sino que también representaría el reducimiento de costos operativos [13]. El recuperar una parte del material que inicialmente se consideraría perdido, podría generar que la producción logre una mejor eficiencia y sostenibilidad [14].

En conclusión, las escasas soluciones para accesibilidad y eficacia de reciclaje de residuos de PLA en pequeñas empresas es un problema severo tanto ambiental como económico. La dependencia de los filamentos vírgenes, el incremento de los costos de operación y la inutilidad de mantener en buena calidad el filamento reciclado ayuda a que se genere un insostenible ciclo de desperdicios que afecta al medio ambiente y a las empresas [15].

## VII. JUSTIFICACIÓN

La implementación de una máquina que extruya filamento basado en material reciclado plástico se presenta como una solución sostenible, estratégica y tecnológica, respondiendo directa y efectivamente los tres problemas críticos que afectan al ambiente de impresión 3D; el impacto del ecosistema que generan los desechos plásticos, los costos elevados de los equipos extrusores del mercado y la pérdida económica derivada de los desperdicios de impresiones de piezas defectuosas o fallidas [16].

Inicialmente en la perspectiva ambiental, la fabricación aditiva ha aportado a la creación de nuevos desechos plásticos, especialmente en un contexto donde se realizan numerosos prototipos, errores por impresión de una pieza o descartes por pruebas [17]. En muchos casos, el material plástico suele acumularse indefinidamente y agrava la contaminación de residuos plásticos, este factor es importante porque contradice los principios de sostenibilidad. Bajo este contexto, desarrollar una máquina extrusora de escritorio permite transformar los desechos de plástico en filamento que pueda ser reusado, impulsando el modelo económico circular y la reducción de residuos por medio de otra vida útil del plástico [18].

En el ámbito económico, las extrusoras que venden en los mercados comerciales internacionales suelen tener precios elevados con acceso limitado a empresas pequeñas, instituciones educativas o usuarios de impresión 3D [19]. Esto evita que los sectores productivos carentes de recursos económicos incorporen procesos de reciclaje en sus operaciones laborales diarias. Crear una extrusora desarrollada propiamente con componentes de costos bajos y ajustable, representa ser una opción asequible y sostenible [20]. Contando con la finalidad de aportar a la economía, a final de cuentas es una inversión recuperable a corto plazo gracias al ahorro de un nuevo filamento, permitiendo mejorar la capacidad productiva e incentivar la innovación local sobre el diseño de maquinaria accesible [21].

Por último, desde la perspectiva operativa, es normal que mientras se provoquen fallas en las impresiones por errores del usuario, o errores técnicos y de configuración [22]. Cada impresión fallida es una representación de una pérdida en la economía tangible en forma de material plástico, energía y tiempo que se invierte en cada prototipo impreso [23]. Sin embargo, con una extrusora de filamento localmente disponible, estos materiales residuales pueden ser reciclados y nuevamente ser transformados en un filamento funcional reusable, acortando las pérdidas, reduciendo los costos de operación y mejorando efectivamente el proceso de manufactura. [24].

En resumen, desarrollar una extrusora que recicle filamento localmente, adaptada a las necesidades de los usuarios con recursos limitados, no solo posee el potencial de disminuir el impacto ambiental, asimismo reduce los costos de operación, democratizando el acceso a este tipo de tecnología e impulsando a una cultura de productividad responsable y sostenible. Esta herramienta que fomenta la innovación, contribuye por medio de residuos plásticos y vigoriza la capacidad productiva de usuarios que hoy en día no poseen el acceso a este tipo de tecnología [25].

## VIII. OBJETIVOS

### *VIII-A. Objetivo general*

Implementar un sistema extrusor para la fabricación de filamento reciclado por medio de material residual plástico para la promoción de producción sostenible de insumos en la impresión 3D en emprendimientos pequeños.

### *VIII-B. Objetivos específicos*

1. Desarrollar un sistema extrusor de material reciclado de PLA con un motor rotativo.
2. Implementar un sistema de control de temperatura y el mecanismo de bobinado para la elaboración de filamento reciclado.
3. Validar la utilidad para la pequeña empresa del sistema propuesto mediante un análisis de costos.

## IX. MARCO TEÓRICO

### IX-A. Antecedentes teóricos

La manufactura aditiva o también conocida como impresión 3D, a través del tiempo logró revolucionar procesos industriales de diseño y manufactura en departamentos como la arquitectura, ingeniería, medicina y la ingeniería creativa, permitiendo crear objetos tridimensionales por medio de un modelo digital, depositando un material en capas. Este proceso se desarrolla a través de un material fundido y posteriormente extruido en una boquilla extrusora y depositado en capas hasta crear la pieza deseada [26].

Esta tecnología se encuentra en expansión, en especial las impresoras con sistema modelo por deposición fundida (FDM), que cada vez son más rápidas, permiten una impresión 3D multicolor, pero esto a su vez genera una gran cantidad de desechos, ya sea por residuos de impresión, soportes, o por piezas defectuosas o también denominadas impresiones fallidas, lo que impulsó el desarrollo de sistemas que reciclen a nivel doméstico y local, permitiendo reusar este tipo de polímeros y convirtiéndolo en filamento utilizable y promoviendo la circulación económica en el ámbito tecnológico [27].

El reciclaje de PLA es representado como una elección responsable con el medioambiente en lo referente al ecosistema del mundo 3D. A pesar de ser un bioplástico, suele ser muy usado por la facilidad para poder imprimirlo y su relativa biodegradabilidad. El PLA es propenso a sufrir degradaciones térmicas si su proceso para reutilizarse es el incorrecto, influyendo en la aplicación de controles precisos en su procesamiento [28].

### IX-B. Extrusora de Filamento

Una máquina extrusora de filamento es diseñada para elaborar filamento termoplástico usado en impresoras 3D de mecanismo FDM. Tiene como funcionalidad reformar plástico, como los pellets o filamento triturado, en hilos continuos de cualidades específicas para ser usado en procesos de impresión 3D. La extrusión empieza cuando se introduce el filamento reciclado o los pellets en una tolva y son trasladados hacia la cámara calefactora en donde hay un sistema de tornillo sin fin. Mientras que el tornillo gira dentro del sistema de calefacción, los pellets se calientan, funden y direccionados hacia la boquilla, la cuál le da forma de hilo. El filamento reciclado y fundido una vez extruido, pasa por un sistema de enfriamiento que endurece su textura y es enrollado en una bobina para finalmente estar listo y ser usado. La extrusora es importante para los entornos industriales, ya sean en proyectos recicladores o de elaboración doméstica, permitiendo emplear desechos plásticos o material reciclado y desarrollar nuevo filamento, aportando a la reducción de costos y cooperar a la economía sostenible [29].

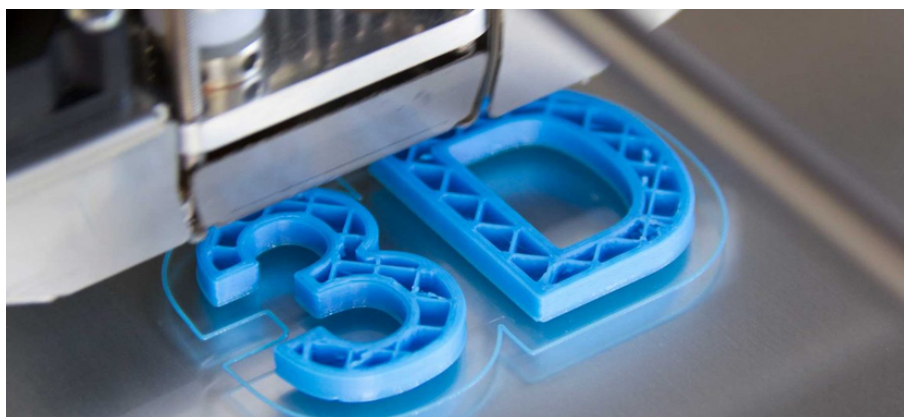


Figura 1. Impresión 3D [30].

### IX-C. *Ácido poliláctico (PLA)*

El PLA es un polímero termoplástico biodegradable, es un derivado del almidón, maíz, caña de azúcar o remolacha (recursos naturales renovables). En el ámbito de la impresión 3D es uno de los materiales más usados, en especial en la tecnología FDM por su baja toxicidad, uso fácil y de propiedades estables para su debida extrusión. A comparación de otros polímeros de origen fósil, el PLA bajo condiciones específicas industriales es compostable, presentando un impacto ambiental menor. Este material es una buena opción para los usuarios que quieren reducir el impacto ambiental e incentivar el desarrollo sostenible. Contiene un punto de fusión de 180 a 220°C, lo cuál lo convierte en un material procesado para cualquier impresora 3D sin requerir condiciones adicionales como un espacio cerrado o camas calefaccionadas. Este material es de buena rigidez y resistencia en sus dimensiones, baja contracción al momento de enfriarse, no produce vapores tóxicos que afecten al medio ambiente y al ser humano y posee una gran disponibilidad de colores y acabados. A pesar de su biodegradabilidad, el PLA en el medio ambiente no se degrada fácilmente, sus condiciones para cumplir este proceso requieren ser controladas en base a su temperatura y humedad como en las plantas de compostaje industrial. A pesar de aquello, la capacidad que posee para ser reprocesado por medio de extrusión lo convierte en un material idóneo para los proyecto de reciclaje de filamento [31].



Figura 2. Filamento de PLA [32].

### IX-D. *Software CAD SolidWorks*

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD) usado en el diseño y la ingeniería. Esta aplicación permite desarrollar modelos tridimensionales y dibujos detallados, ensamblajes y mecanismos, de igual manera para simulaciones y análisis en el movimiento de la pieza. SolidWorks es destacado por contener un entorno intuitivo, en el cuál es importante ensamblar, visualizar y ajustar los componentes antes de ser fabricados, permite la creación de modelos 2D y 3D con precisión y es utilizado para ingeniería, arquitectura, manufactura y diseño mecánico por su capacidad de realizar piezas, ensamblajes y planos de manera detallada. Sus herramientas son paramétricas y permiten modificar diseños de manera flexible al momento de ajustar dimensiones o parámetros establecidos, además de facilitar la creación de ensamblajes complejos y la verificación de la funcionalidad de las

piezas mediante un análisis de movimiento, simulación de esfuerzos y detección de interferencias En el desarrollo de la máquina extrusora, se diseñan los materiales que la componen y la manera en que está estructurada, así como la forma en que se elaboró las secciones que la distribuyen [33].

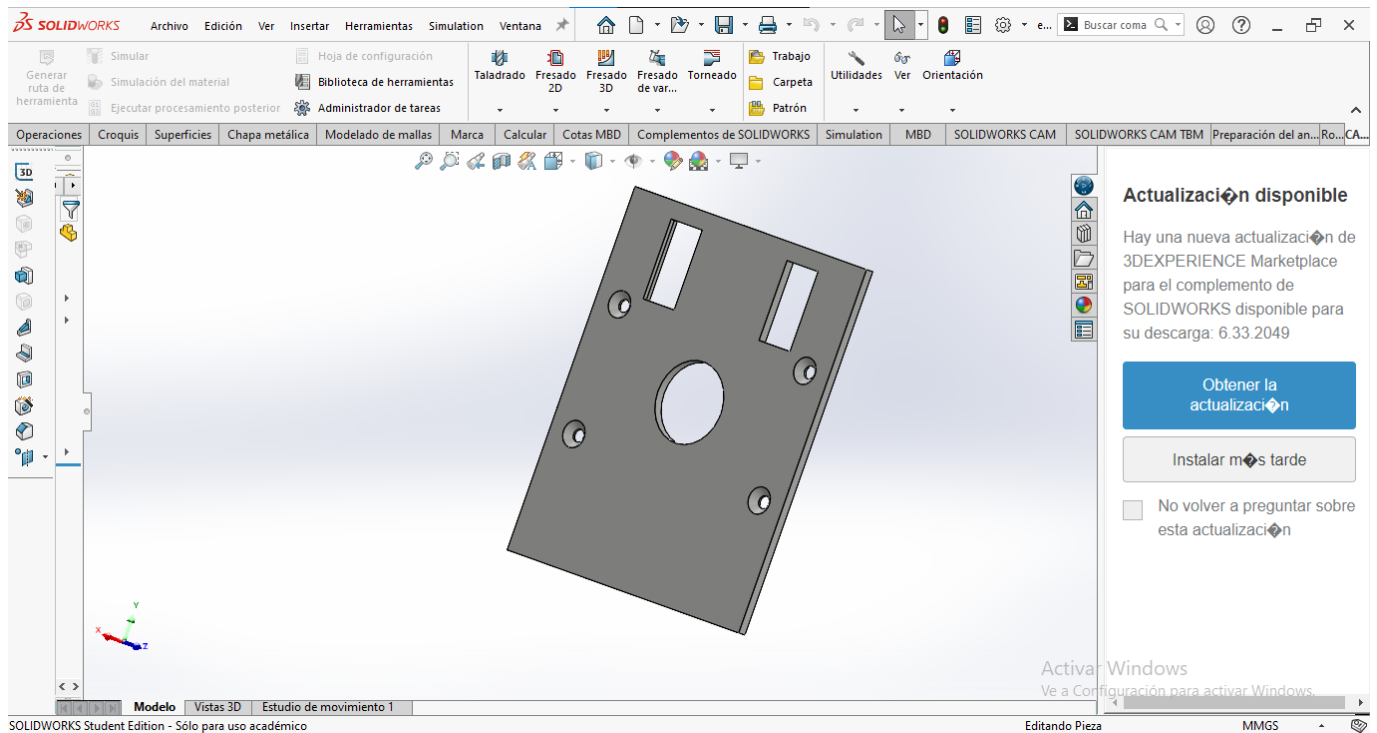


Figura 3. SolidWorks. Fuente propia. .

### IX-E. Software Bambu Studio

Bambu Studio es un software de laminado perteneciente a la marca Bambu Lab, capaz de preparar modelos diseñados en 3D para impresión 3D. Repara automáticamente mallas con errores, convierte modelos 3D en código G, permite dirigir archivos y configuraciones para proyectos completos, además de controlar impresiones por medio del software y a través de la cámara que proporciona la impresora Bambulab, ofreciendo impresiones multicolor con la ayuda de diferentes filamentos y optimización del trabajo para mayor calidad y velocidad al imprimir además ofrece parámetros avanzados como retracción, flujo, presión avanzada, entre otros. Una de las ventajas del Bambu Studio es la compatibilidad con los diversos tipos de materiales de filamento y la gestión de los perfiles preconfigurados que dan facilidad al trabajo con diferentes plásticos y ofrece visualizar en tiempo real la simulación de la impresora, junto a su impresión 3D, ayudando a detectar errores al enviar archivos a la impresora. Su interfaz es muy intuitiva al igual que sus herramientas avanzadas de configuración, permitiendo a usuarios novatos y a expertos ajustar parámetros como altura de capa, velocidad de impresión, temperatura, densidad de relleno y soportes. Los soportes son parte esencial de una impresión 3D y el software da opción a generarlos automáticamente o personalizarlos con patrones como árboles, triángulos, lineal, junto a configuraciones de brim, skirt, raft para mejor adherencia. [34].

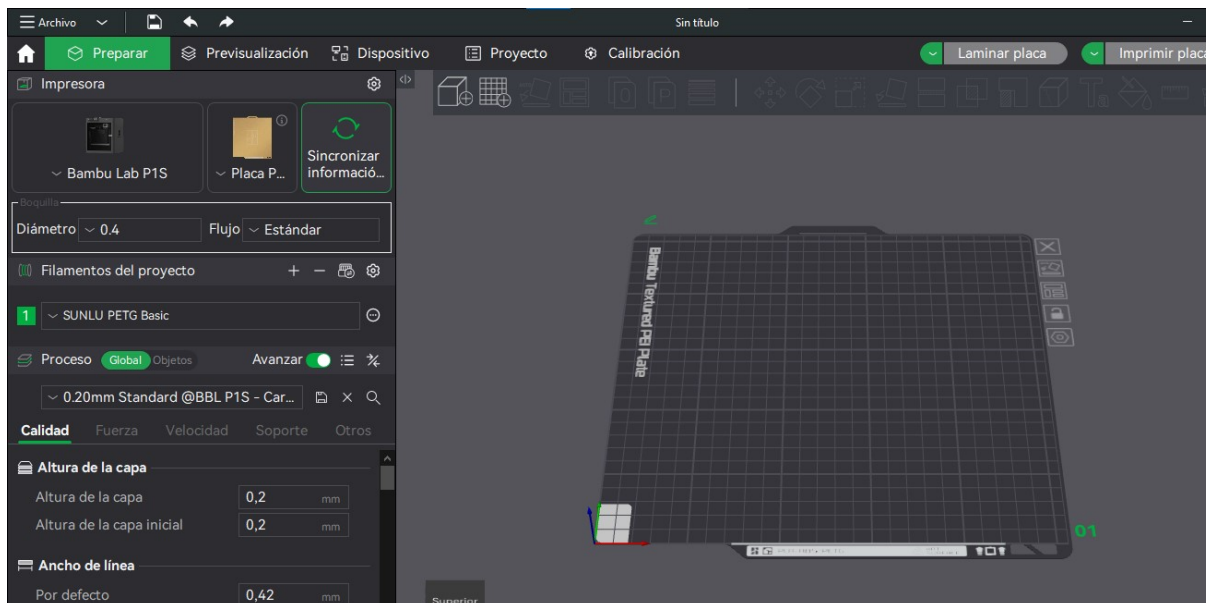


Figura 4. Bambu Studio. Fuente propia. .



Figura 5. Bambulab.[35].

#### IX-F. Software Pronterface

Es un software de control ampliamente usado en la impresión 3D y procesos de prototipado que son empleados en las máquinas CNC o extrusoras de filamento. Es desarrollado con una interfaz gráfica que da paso al usuario a comunicarse directamente, con las impresoras 3D o la extrusora de filamento, ya que consta de una interfaz gráfica que da paso a la comunicación directa con la impresora por medio de un puerto USB, su funcionalidad se basa en el código G en tiempo real y el monitoreo del estado de la máquinas. El pronterface ofrece una movilidad manual de ejes de la máquina; control de temperatura del hotend y cama caliente; cargar, iniciar y detener la impresión; visualizar trayectorias del código G y la detección de errores del proceso. Al ser un software de control y una herramienta útil para calibraciones, mantenimiento y validación de prototipos, pero en la actualidad muchas impresoras como la Bambulab contienen interfaces más avanzadas o aplicaciones propias, además permite realizar

ajustes inmediatos en la operación de la máquina y facilita la calibración, pruebas de movimiento y detecciones de posibles fallas del sistema; la interfaz incluye gráficos de temperatura, historial de comandos y botones de control manual brindando un panorama completo que gestiona de manera práctica y eficiente el proceso de extrusión, ayudando a supervisar el desempeño de la extrusora y garantizando el flujo de material estable dentro de los parámetros establecidos [36].

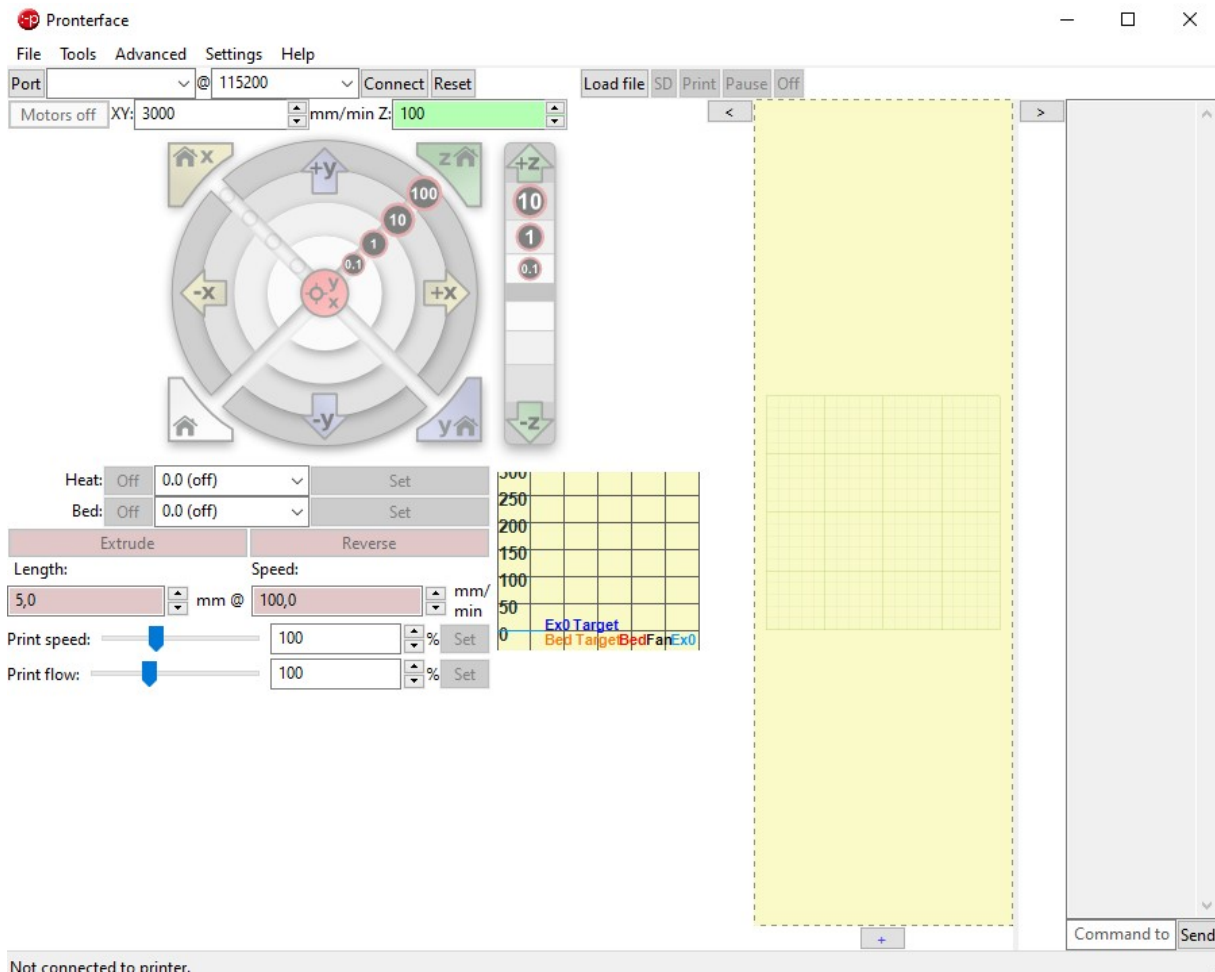


Figura 6. Software Pronterface.[36].

### IX-G. Tolva de alimentación de PLA

Es el depósito de filamento reciclado y pellets que facilita la alimentación constante de material dirigida al tornillo sin fin. La tolva es un elemento esencial, en donde se almacena el material triturado y pellets que ayuden al desarrollo del material antes de ingresar al tornillo extrusor. Por lo general se diseña con una geometría en forma de embudo invertido, lo cuál facilita el flujo del material con ayuda de la gravedad, asegurando que estos insumos sean descargados uniformemente, evitando atascos, pérdidas en el material. Estos modelos pueden fabricarse de diferentes tamaños y materiales, dependiendo de las características del material que se va a contener, ya sea plástico, pellets, arena o polvo. En la fabricación de filamentos 3D, la tolva tiene un importante rol, por lo que es el punto de ingreso del material triturado o los pellets que se dirigen a la extrusora. Gracias a esto se genera suministros constantes de materia prima, repercutiendo a la calidad y homogeneidad del filamento desarrollado [37].

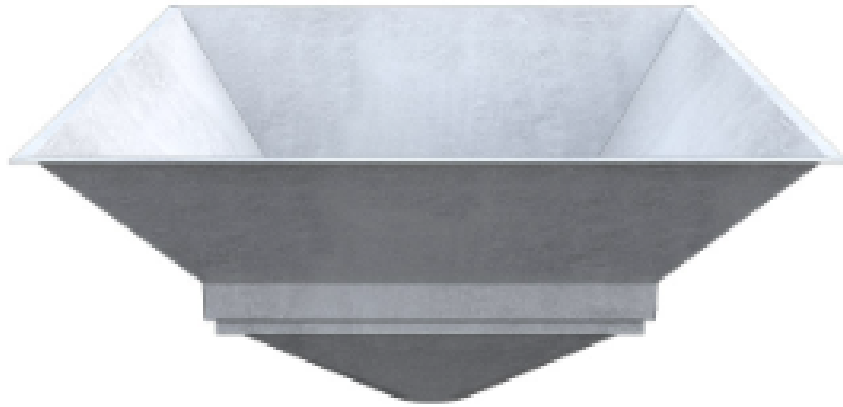


Figura 7. Tolva de alimentación de PLA [38].

*IX-H. Tornillo extrusor de acero inoxidable D12 x 215mm*

También conocido como husillo es un eje helicoidal que gira dentro de un tubo, es de los componentes más importantes del proceso de la extrusión de plástico. Cumple con la función de transportar, comprimir, fundir y empujar el material triturado desde la tolva, dirigiéndose a la boquilla el cuál da la forma final del filamento. Generalmente cumple con 3 zonas principales que son la zona de alimentación, compresión, dosificación y tiene dimensiones claves en donde dispone de cuanta presión, caudal provoca. El paso de la rosca si es grande se mueve rápido el material pero por consecuencia ejerce una presión menor pero al ser mas pequeño, este empuja mas fuerte pero requiere de mayor torque y temperatura.

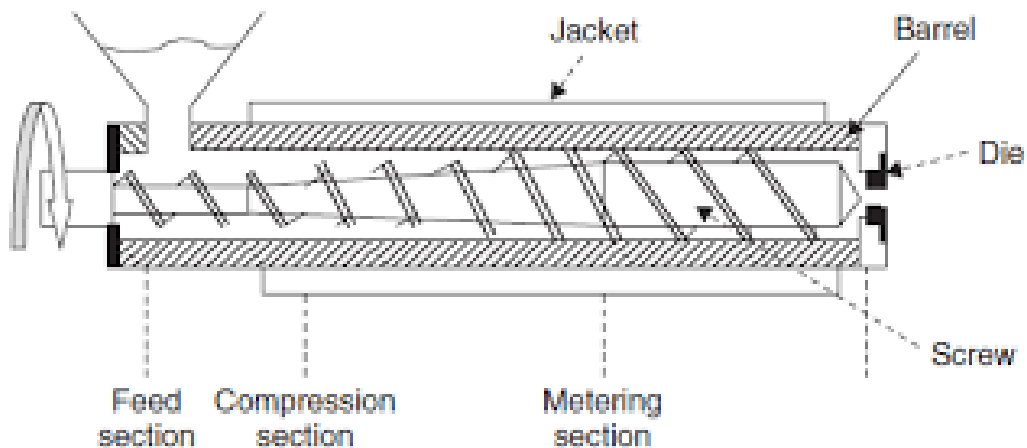


Figura 8. Tornillo extrusor [39].

Lo que puede afectar su funcionalidad son: La velocidad de giro, es decir que mientras más revoluciones tenga

el sistema el material se fundirá en menor tiempo pero mayor presencia de presión. La temperatura debe fundirse adecuadamente para que cruce por la zona de compresión sin problemas. El material debe considerarse a las condiciones a las que trabaja por ejemplo el PLA se puede fundir y extruir a una temperatura de 185°C a pesar de que en impresoras 3D ese proceso lo cumple con 210°C promedio. Las condiciones expuestas ayuda a prevenir situaciones como atascos de material en la boquilla, avances en sentido contrario del material, desgastes el husillo provocando dobleces que provoquen daños irreparable y pérdidas de torque o velocidad. [40]

El husillo cumple con 2 procesos los cuáles son la zona de alimentación y de compresión, las razones es que cumple con un proceso simple y para ellos lo ideal es que sea menos largo y menos complejo no quiere de mucho torque, es decir que un tornillo de 3 zonas tiene más longitud, más torque para comprimir y mas fricción, por lo que este sistema ocupa de mas energía que realmente no la necesita [41].



Figura 9. Tornillo extrusor de acero inoxidable D12 x 215mm [42].

#### *IX-I. Boquilla extrusora 1.75mm*

La boquilla extrusora o nozzle, es el componente que finaliza el sistema de extrusión, es por donde sale el plástico triturado y fundido para adaptar la forma de filamento. Está conectada al extremo del sistema de calentado y su función es moldear el flujo del material anteriormente fundido en un hilo cilíndrico constante y con dimensiones establecidas por el diámetro del orificio de la boquilla. Se selecciona la boquilla de 1.75mm para que el filamento reciclado al ser extruído contenga ese diámetro, ya que es el diámetro estándar más usado para las impresoras 3D, permitiendo que el filamento reciclado se reutilice sin problemas, siendo compatible en la mayoría de las impresoras 3D disponibles en el mercado. [43].



Figura 10. Boquilla extrusora 1.75mm [44].

#### IX-J. Cámara de extrusión

Los residuos almacenados, se desplazan por la cámara de extrusión diseñada como un conducto metálico (de aluminio o acero inoxidable) donde el plástico es fundido y pasado por el tornillo extrusor que impulsa la masa de filamento hacia la boquilla y genere presión en la mezcla para ser posteriormente extruida por la boquilla por el diámetro ya estandarizado de 1.75mm. Es de señalar que los soportes de la extrusora son un chasis desarrollado con perfiles de aluminio, que proporcionen rigidez y estabilidad, evitando vibraciones que alteren el desarrollo del filamento [45].

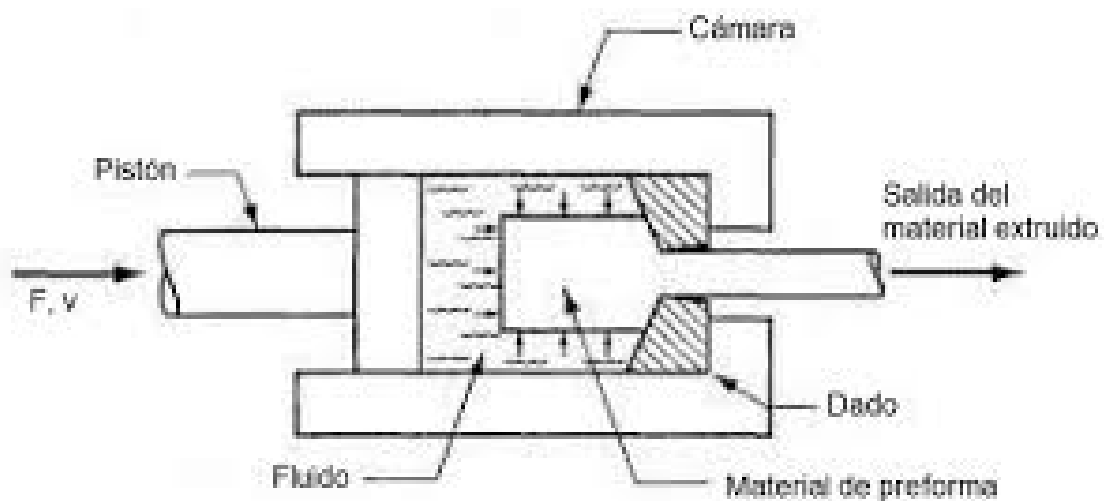


Figura 11. Cámara de extrusión [46].

Es importante saber que la eficacia del proceso de extrusión depende significativamente del sistema electrónico y de control implementados [45].

#### *IX-K. Pantalla LCD*

La Pantalla LCD muestra los parámetros de funcionamiento, imágenes y textos de manera visual en diversos componente electrónicos. Este dispositivo incluye un encoder rotativo para navegar por las configuraciones, sumado a un sistema de almacenamiento (microSD) para el registro de datos de temperatura, duración y fallos. [47].

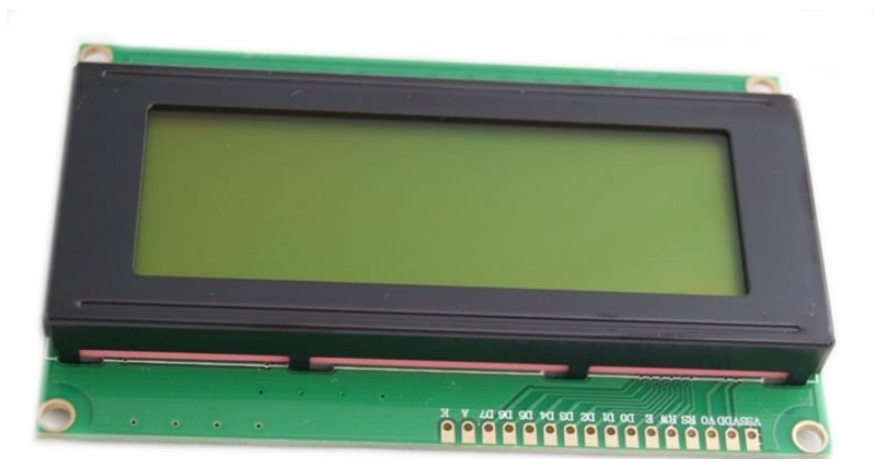


Figura 12. Pantalla LCD Smart 2004 [48].

La extrusión de PLA reciclado es un reto para el diseño de una extrusora, por lo que se debe tener la garantía que la temperatura sea estable y homogénea (una correcta fusión del plástico sin impurezas o burbujas) con la ayuda de la pantalla LCD se obtiene visualización de estos parámetros en la zona de calentamiento y que se evite que la temperatura sea excesivamente alta y degrade el polímero, además de controlar otros factores como las revoluciones de los motores en general y ventiladores. [47].

#### *IX-L. Cartucho calefactor 24V/40W*

Los cartuchos calefactores son resistencias eléctricas encapsuladas que transforman la energía eléctrica en calor por medio de conducción a través de zonas metálicas, es decir que están diseñados para generar y transferir calor por medio del efecto Joule y para lo que corresponde la extrusora ese conductor de calor es por medio de un sistema desarrollado con acero inoxidable perfecto para conducir por todo el sistema el calor generado por los cartuchos. El cartucho consta de resistencias encapsuladas en un cuerpo de metal de forma cilíndrica instalado en el bloque metálico de extrusión para la fundición de PLA a sus condiciones requeridas de temperatura. Este tipo de cartucho es esencial porque combinado con un termistor NTC 100K, junto al controlador PID del firmware, además los 40W permite tener un consumo eléctrico controlado, convirtiéndolo en un sistema de escritorio que no requiera de protecciones adicionales y circule sin riesgos de incendios [49].



Figura 13. Cartucho calefactor 24V/40W [49].

Las recomendaciones a considerar del uso de este tipo de cartuchos calefactores son: Evitar encenderlo sin material por mucho tiempo por lo que puede dañar el material residual y provoque daños en el aislamiento interno. Asegurar el sistema con bloques calefactores ajustados a abrazaderas para mangueras para evitar desfases en el sistema y evitar perder esa transferencia de calor. Tener mucho cuidado la fuente que lo alimentará, una tomacorriente de 110V es una buena alternativa pero si se utiliza de 220V el cartucho se quema inmediatamente [49].

#### *IX-M. Fuente de alimentación 24V/15A*

Es el encargado de convertir la corriente alterna de los enchufes en corriente continua para energizar los componentes electrónicos del sistema y sus terminales se componen por medio de tornillos ajustables en donde circula el voltaje y transforma la energía proporcionada. Para este caso por compatibilidad se utiliza la placa MKS ideal para ser energizada con una fuente de alimentación, la cuál proporciona suficiente energía que sostiene la carga térmica y mecánica y aporta una mejor distribución de voltaje a través del sistema en donde actúan diversos componentes eléctricos. En los sistemas de extrusión de filamento, la fuente de alimentación permite que la temperatura sea constante tanto en el extrusor como en los elementos térmicos de calefacción. Por lo general las fuentes usadas en estas aplicaciones trabajan en rangos de 12-24V dependiendo de la potencia requerida por los componentes, además de generar movimientos seguros y precisos de los motores, proporcionando la capacidad suficiente para asegurar operaciones sin sobrecalentamientos o caídas de tensión. La importancia de la fuente de alimentación radica en garantizar que el voltaje y la corriente eléctrica sean estables, sin fluctuaciones que ocasionen fallos en el sistema o afectar la calidad del proceso [50].



Figura 14. Fuente de alimentación 24V/15A [50].

Como recomendación es importante considerar la potencia de carga y verificar si su capacidad de corriente es igual o superior al valor sugerido, estabilidad de voltaje de salida para reducir inconveniente en dispositivos sensibles y la eficiencia de la fuente para mejorar la precisión [50].

#### *IX-N. Ventilador axial de 24V*

El ventilador se encarga de la refrigeración del sistema en partes que generen mucha temperatura y no se sobrecalienten. En la extrusión de filamento, suele mantener la separación térmica entre la zona de alimentación y de fusión para impedir obstrucciones de un fundido anticipado. Mantiene un declive en la temperatura ya establecida y ayuda a que el tornillo sin fin cumpla con su funcionalidad de dirigir el material correctamente sin que se generen taponos. También ayuda al enfriamiento de los drivers que están afectados por la exigencia del resto de componentes eléctricos, lo que tiene como misión principal el evadir el sobrecalentamiento de los mismos y de ayudar a moldear debidamente el filamento reciclado, también sirven como sistema de enfriamiento en donde al extruir el material reciclado, el filamento pasa por los ventiladores para conseguir ingresar al bobinado y de esta manera produce el nuevo rollo de filamento sin necesidad de que el cuerpo humano interactúe con el filamento y provoquen deformaciones o imperfecciones. El elegir ventiladores axiales de 24V ayuda a un enfriamiento idóneo para el proceso que cumple la extrusora debido a la potencia generada al enfriar [51].



Figura 15. Ventilador axial de 24V [52].

#### *IX-Ñ. Microcontrolador (PLACA MKS)*

La placa MKS (Makerbase) es un microcontrolador que ayuda a la unidad principal de procesamiento, encargada de la ejecución del programa de control de la extrusora y opera según los sensores y actuadores en el sistema. Su integración simplifica el desarrollo en la extrusora y permite que el control sea manejable y preciso. Las MKS son placas controladoras utilizadas en las impresoras 3D o maquinaria CNC y se encarga de recibir instrucciones, controlar motores y componentes electrónicos y funciona como el cerebro que orquesta el sistema eléctrico. La placa integra en un solo dispositivo diversas funciones como la compatibilidad con diferentes firmware (como Marlin), la capacidad de poder controlar varios motores paso a paso de manera simultánea, además de los componentes calefactores, ventiladores y sistema de monitoreo. Una característica importante de la placa MKS es que busca simplificar el armado y operación de equipos electrónicos, utilizando un solo módulo compacto, traduciendo en mayor comodidad, menor espacio ocupado y una instalación sencilla, las placas están pensadas para ser usadas en principiantes para mayor personalización en proyectos. Su diseño compacto y facilidad de integración convierte a la placa MKS como una herramienta muy usada en proyectos de impresión 3D y automatización gracias al control preciso, confiable y flexible el sistema y es un componente personalizable mediante firmware, ofreciendo a los usuarios poder ajustar los parámetros en función de las necesidades específicas del proyecto por desarrollar. [53].



Figura 16. Placa MKS [54]

Entre los múltiples firmwares disponibles para impresión 3D, Marlin es destacado por su compatibilidad, no requiere de un hardware especial para que funcione con drivers de los motores paso a paso, termistores y finales de carrera, este firmware permite configurar casi todo sin necesidad de cambiar el sistema electrónico como las velocidades, temperaturas, sentidos del motor, control del ventilador, sensores de filamento. Además es el firmware más utilizado en impresión 3D porque es abierto, estable, muy compatible y configurable, no requiere de la ayuda de un fabricante como suele pasar con firmwares cerrados [53].

#### *IX-O. Sensor de temperatura (termistor NTC 100k)*

Es un sensor de temperatura desarrollado con materiales semiconductores el cuál su valor de resistencia eléctrica suele ser variable en base a su temperatura. Existen 2 tipos de termistores los cuáles son los NTC que contienen un coeficiente de temperatura negativo, es decir que su resistencia disminuye cuando la temperatura aumenta y por otro lado los PTC que contienen un coeficiente de temperatura positivo que por el contrario del NTC su resistencia aumenta cuando la temperatura aumenta. Los termistores son muy sensibles tienen la capacidad de cambiar mucho la resistencia con variaciones leves de temperatura pero para la extrusora se utiliza el NTC 100K, está delegado a medir la temperatura del bloque calefactor y de esta manera envíe los datos al microcontrolador para saber como debe administrar la temperatura. Se encuentra ubicado cerca del cartucho calefactor y ayuda a medir con precisión la temperatura generada, permitiendo al microcontrolador el ajuste de sus valores y mantener la temperatura que se desea alcanzar. Es muy importante evitar sobrecalentamientos o temperaturas que alteren la forma del material [55].



Figura 17. Termistor NTC 100k [56].

#### *IX-P. Motor paso a paso Nema 23*

Los motores paso a paso suelen dividir revoluciones completas en un número de pasos, es decir que el motor en cuanto a su eje se mueve en incremento discreto controlable. El motor paso a paso al aplicar señales en sus bobinas se mueve en ordenes específicos y mientras mas pulsos eléctricos se envíen a través del sistema el motor avanza un paso. El motor nema 23 es un motor eléctrico que rota en pasos discretos, convirtiéndolo en un componente ideal para ser empleado en un control preciso de movimiento. Permite controlar con precisión la velocidad, posición y aceleración angular independientemente del uso de sensores, ideal para fresadoras, extrusoras, plotters y otros dispositivos que requieren ser controlados electrónicamente. Es un tipo de motor usado en aplicaciones industriales, impresión 3D y máquinas CNC, además de ser muy versátil y puede entrear un toque mayor al de motores más pequeños como el nema 17, permitiendo mover piezas pesadas o realizar trabajos que requieren mayor fuerza sin perder precisión. Es compatible con la mayoría de los drivers y placas de control, lo que facilita su integración en proyectos y puede funcionar con diferentes corrientes y tensiones de alimentación, permitiendo ajustar a las necesidades específicas del sistema en que se usa. Al ser un estándar muy difundido, su información técnica y soporte es muy amplia lo que facilita la implementación incluso para usuarios novatos [57].



Figura 18. Motor paso a paso Nema 23 [58].

#### *IX-Q. Motor Nema 17*

Es un motor utilizado en el ámbito industrial por su fiabilidad y precisión ya que, proporciona movimientos uniformes y suaves, consta de un rotor constituido por un imán permanente, el cuál funciona de acuerdo a el principio de paso electromagnético y un estátor con múltiples bobinas. Al ejecutar los pulsos eléctricos a las bobinas del motor se crean campos magnéticos y alinean el rotor con los polos cargados de energía del estátor, generando rotaciones angulares. Sus dimensiones permiten la compatibilidad en los sistemas y soportes de montaje ya que alcanza entre los 20 a 50Nxcmm y es mas ligero, siendo el componente indicado para colocar en ejes que soporten cargas axiales [59].



Figura 19. Motor paso a paso Nema 17 [59].

### IX-R. Driver de motor nema 23

Es un dispositivo electrónico que recibe señales de un dispositivo externo que controle señales como la placa MKS y convierte las señales de corriente, alimentando velocidades, posición y torque del motor nema. EL Modelo utilizado es el TB6600 Encargado de regular la corriente del motor de acuerdo a las órdenes del microcontrolador, dividiendo sus movimientos en micro-pasos y conseguir una mejor precisión. En la extrusora, controla todo mecanismo que pueda arrastrarse como el tornillo extrusor, permitiendo el ajuste de velocidad, torque y una mejor dirección del motor paso a paso. La alimentación del controlador es de 9-50 VDC con una corriente ajustable entre 1 y 4.2A RMS y para el nema 23 se necesita mas corriente eléctrica y este driver es el que mejor proporciona la corriente para el motor que incluye caja reductora, el driver da la libertad de ajustar la corriente exacta y prevenir que el motor se sobrecaliente por exceso de revoluciones y facilite el trabajo a bajas revoluciones con un torque alto facilitando la movilidad del tornillo sin fin [60].



Figura 20. Driver de motor nema 23. [61].

### IX-S. Driver de motor nema 17

Son componentes que permiten el control preciso de los motores paso a paso más comunes en impresión 3D, máquinas CNC y sistemas automatizados. Cumplen con la función principal de regular y suministrar la corriente eléctrica debida a las bobinas del motor en función a las señales enviadas desde la placa de control, traduciendo movimientos ordenados, suaves y exactos. Su uso es indispensable, los motores paso a paso (nema 17) requieren de una alimentación en pulsos eléctricos secuenciales de administración compleja directamente desde una tarjeta base. El driver es un intermediario inteligente que recibe ordenes de dirección, velocidad/cantidad de pasos y energiza las bobinas del motor sincronizadamente para lograr el desplazamiento deseado. Para que los motores nema 17 de la extrusora tengan una funcionalidad adecuada es importante utilizar un driver, ya que hay una gran variedad de

drivers pero para la extrusora se utiliza el driver A4988 el cuál es un driver para motores paso a paso bipolares debido a su bajo costo y fácil de manipular, siendo muy compatible con la MKS por lo que está basado mayormente su firmware en Marlin, encargado de recibir señales de control desde la placa MKS traduciéndola en pulsos de corriente eléctrica para proporcionar energía al motor nema 17, este motor al no solicitar tanto torque lo convierte en un driver compatible para la extrusora [62].

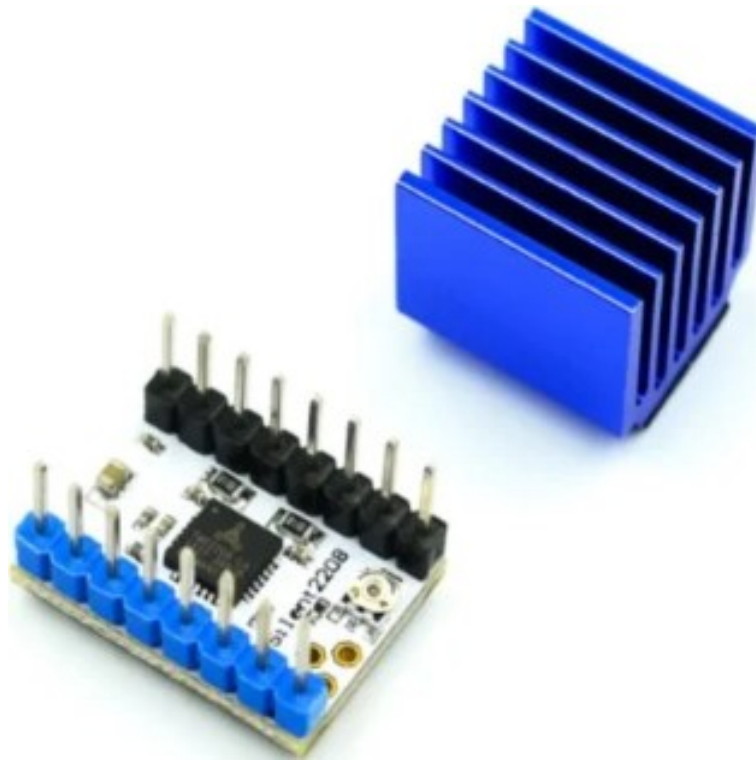


Figura 21. Driver de motor nema 17. [63].

#### *IX-T. Rodamientos*

Son elementos mecánicos usados en la mayoría de sistemas de movimiento y transmisión y cumplen con la función principal de reducir fricción en las superficies de contacto, encargado de otorgar movimientos suaves y controlados entre piezas que ayuden a disminuir la fricción y soportar cargas tanto radiales como axiales, por lo tanto, a medida que se reduce la fricción, entonces se disminuye el desgaste, consumo de energía y calentamiento. En el sistema de extrusión soporta el eje del tornillo sin fin, el cual reduce la fricción y mantiene alineado el tornillo con el tubo extrusora aumentando la vida útil del sistema mecánico y generando un desgaste mínimo. Existen diversos tipos de rodamientos, entre ellos los rodamientos de bolas, rodillos y lineales, cada uno con aplicaciones específicas de acuerdo a las necesidades del sistema. Los equipos de extrusión o impresión 3D resultan indispensables por lo que aseguran la precisión del desplazamiento de ejes y piezas desplazables, ayuda a evitar desalineaciones y minimiza el desgaste de los componentes. Su incorporación contribuye al ahorro de energía y disminuye las pérdidas por fricción, permitiendo una funcionalidad eficiente de motores y elementos mecánicos. [64].



Figura 22. Rodamientos [65].

Generalmente los rodamientos son representados como componentes esenciales en maquinarias que requieran movimientos repetitivos, confiables y duraderos, convirtiéndolo en un componente mecánico esencial en la optimización del rendimiento y reducción de costos de mantenimiento [64].

## X. MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo de la máquina extrusora de filamento reciclado de PLA esta dividida en varias etapas claves en donde se combinan sus fases: Diseño, mecánica, electrónica, control, software, fabricación y pruebas. Se describe el proceso a detalle. En la siguiente figura se muestra el ciclo de funcionamiento de la extrusora:

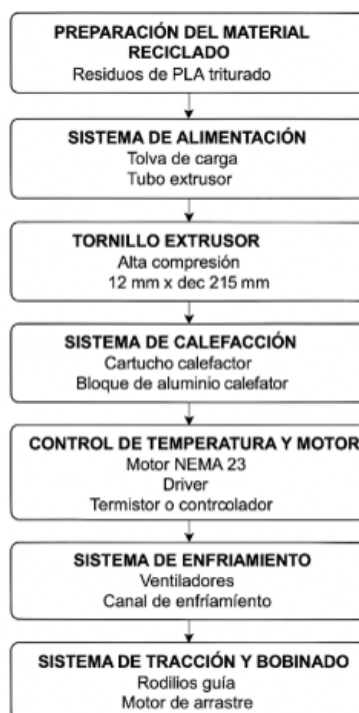


Figura 23. Diagrama por bloques del funcionamiento de la extrusora de filamento. Fuente propia.

### X-A. *Diseño conceptual y planificación*

Su fase principal se encuentra constituida en la producción del diseño conceptual de la máquina extrusora, donde se definen los elementos electrónicos, mecánicos y de control que trabajan en conjunto. Su diseño es realizado utilizando software CAD como fusion 360 o SolidWorks en donde se planifican los siguientes subsistemas: La primera parte importante es el diseño del barril de extrusión, esta parte tiene la responsabilidad de calentar y posteriormente derretir el PLA reciclado [66]. El sistema mecánico implementa un sistema sin fin que ayude a la trituración, movilización y a las condiciones de presión y fusión del PLA para su posterior extrusión. El sistema electrónico y de control en donde se implementan sensores, controladores y actuadores que ayuden al gestionamiento del proceso de extrusión y bobinado. La programación se implementa un firmware de Arduino y un algoritmo que ayude al monitoreo de la temperatura de la cámara calefactora y la velocidad de los motores [67].

### X-B. *Sistema mecánico de la extrusora*

Al obtener el diseño en CAD, se procede con la fabricación del prototipo usando manufactura aditiva que en este caso se desarrolla por medio de impresión 3D, junto a la manufactura subtractiva que en este caso es el fresado y corte CNC de los componentes. Para la optimización de costos las piezas que no son cruciales como soportes o carcasas son creadas por medio de impresión 3D, enfocada en optimizar material y asegurar calentamiento uniforme [68].

Las piezas fabricadas se ensamblan al sistema mecánico y el tornillo extrusor se posicionan dentro del barril, lo motores de paso son acoplados para controlar rotaciones tanto del tornillo extrusor como del sistema de bobinado [69].

#### *X-C. Sistema electrónico*

Esta parte se constituye por varios elementos que son diseñados y ensamblados para que garantice un buen funcionamiento del sistema. Los sensores de temperatura son termopares o PT100 en puntos cruciales del barril de extrusión que monitorean y controlan la temperatura con precisión sin quemar el PLA y cumpliendo su función de únicamente derretirlo [70].

Los motores son de paso para que controlen tanto husillo como bobinado del filamento y están controlados por drivers de motor, su razón de implante es que ajuste velocidades de acuerdo con las condiciones y necesidades de la extrusión de filamento. Se emplean resistencias calefactoras para el barril de extrusión que están conectadas al sistema de control de temperatura para mantener condiciones idóneas. La máquina extrusora contiene una fuente de alimentación regulada que proporcione la energía necesaria todos los componentes electrónicos (motores, sensores, resistencias, etc)

#### *X-D. Sistemas de control*

La parte de control es muy importante, asegura que la extrusión sea eficiente y precisa. Este sistema principalmente se basará en microcontroladores como el Arduino en donde gestione el control de temperatura en donde se aplica un controlador PID que mantiene la temperatura del barril de extrusión estable. Los datos que recibe el controlador PID son en tiempo real, estos datos los envía los sensores de temperatura y ajusta las resistencias para que garanticen un calentamiento óptimo [71].

Por otro lado, el mismo controlador también regula la velocidad del motor del tornillo extrusor y lograr que el flujo de PLA derretido sea constante. Esto se realiza por medio de la variación del voltaje y frecuencia enviadas al motor. Para la velocidad del bobinado se utiliza sensores ópticos o encoders para facilitar las mediciones del diámetro del filamento al ser extruido. Esta parte es delicada por lo que se hacen ajustes de velocidades del motor de bobinado para impedir estiramiento o deformaciones del filamento

#### *X-E. Configuraciones del Firmware*

El Firmware ejerce un papel muy importante en la monitorización y control de la extrusora de filamento. Como anteriormente se mencionó el sistema de control es basado en Arduino en donde todo el proceso que corresponde desde el calentamiento hasta el bobinado es gestionado. El firmware incluye un control de procesos que monitoricen la temperatura en tiempo real, la velocidad de extrusión y bobinado. Además elabora algoritmos de control PID y velocidad para ajustar el calentador y motores en base a las lecturas de los sensores [72].

Se emplea la interfaz de usuario que lo refleja la pantalla LCD y permite al operario ingresar parámetros como la temperatura deseada, velocidad de ajuste de la extrusión y velocidad del bobinado. Sus datos de rendimiento de temperatura, velocidad y calidad del filamento extruido son almacenados para posteriores análisis de eficiencia y calidad. El lenguaje de programación es C++ por lo que se trabaja con la placa MKS, posteriormente se utilizan bibliotecas de control que manejen los motores, sensores y actuadores [73].

Firmware embebido (desarrollado en el MKS) es el código que controla todos los componentes de la extrusora, mientras que el algoritmo del control PID es el encargado de regular precisamente la temperatura y la potencia del cartucho calefactor, en base a la diferencia entre la temperatura que se desea alcanzar y la temperatura real. La interfaz de usuario permite visualizar las condiciones y parámetros de la extrusora como la temperatura y la velocidad de impresión. Una vez obtenidas todas las pruebas de ajuste mecánica y electrónica. El software se actualiza de acuerdo con los resultados logrados y la interfaz de usuario es adaptado a los parámetros de control [74].

El proceso desarrollado testifica que la máquina extrusora de filamento sea un solución viable, eficiente y accesible para reciclar filamento de PLA para las pequeñas empresas, generando un impacto de reducción de costos que fomente una práctica sustentable en la industria de la impresión 3D [75].

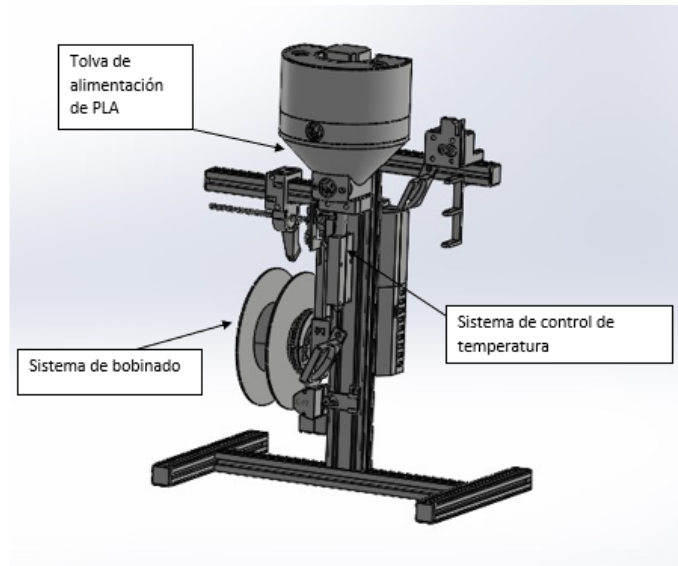


Figura 24. Extrusora de filamento reciclado. Fuente propia.

#### X-F. Elaboración de la extrusora

Para la elaboración de la extrusora y verificación de los componentes por utilizar se desarrollan varios cálculos: Inicialmente se determina si el motor nema 23 contiene el torque suficiente para que rote debidamente con el tornillo extrusor. El torque depende de la presión dentro del tubo extrusor que genere el tornillo sin fin para empujar el material reciclado fundido y pasado a la boquilla, el radio proporcionado del tornillo extrusor y el coeficiente de fricción del PLA con el acero inoxidable. Se toma en cuenta que la viscosidad del PLA en función de su temperatura de 185°C es de 150 a 300 Pa.s, la presión de extrusión entra en un rango de 3-6 MPa dependiendo de la anchura del tornillo extrusor y su diámetro [76]. Para estos datos se utiliza el promedio de presión de 3 MPa y se utiliza el siguiente procedimiento:

$$T = F * r$$

$$F = P * A$$

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0.008)^2$$

$$A = 2.01 \times 10^{-4} m^2$$

$$F = 3 * 10^6 * 2.01 \times 10^{-4}$$

$$F = 603 N$$

$$T = 603 * 0.008$$

$$F = 4.82 N * m$$

Figura 25. Calculo de Torque. Fuente propia.

Se tiene también la designación del tornillo sin fin: Diámetro:16mm. Paso: 16mm. Longitud: 300mm. Zonas de

alimentación y compresión. Material: Acero inoxidable.

Al ser un tornillo simple con estas características se tiene un relación  $L/D = 18.75$ , compresión a una relación de 2:1 considerando el acero inoxidable.

La deformación del tornillo sin fin depende de: Límite elástico en función de una temperatura ambiente: 215-290 MPa. Coeficiente de dilatación de  $0.000173/K$  y Pérdida de las resistencias, es decir que a partir de  $300^{\circ}C$  pierde un 30 % de resistencias pero en este caso la temperatura máxima de la extrusora es de  $260^{\circ}C$  por lo tanto no se considera este dato [77].

Al tomar en cuenta estos parámetros se concluye que no hay una deformación significativa pero si hay dilatación, por ende:

$$\begin{aligned}\Delta L &= L * \alpha * \Delta T \\ \Delta L &= 0.3 * 0.000173 * (230 - 25) \\ \Delta L &= 1.06mm\end{aligned}$$

Figura 26. Calculo de dilatación. Fuente propia.

Este valor de dilatación quiere decir que el tornillo extrusor al ser sometido a trabajar con temperatura por uso se estira 1mm aproximadamente [77]. El proceso que cumple la extrusora es que el material reciclado plástico es ingresado en la tolva y pasa por el tornillo extrusor encargado de movilizar el material a la zona de calentamiento donde es fundido. El calor es automáticamente regulado por el termistor y el microcontrolador. Por último el filamento fundido se extruye y es enfriado con un ventilador y poder ser enviado para bobinarse y ser utilizado. Con los datos obtenidos es seguro desarrollar la extrusora.

Primero se procura el ajuste inicial del tubo extrusor en los perfiles de aluminio, para esto se procede a usar los tornillos cilíndricos M6X60 mm, arandelas M6 y tuercas en T y se fija en el tubo extrusor sobresalga un poco el tubo de los soportes, cabe mencionar que el tubo extrusor junto al soporte son parte inicial de la cámara calefactora en donde se cumple todo el proceso de fundido para la previa obtención del filamento reciclado que se desea obtener. Al realizar la unión del tubo extrusor con los soportes y realizar el debido ajuste de los tornillos, se ubica en todo en el perfil de Aluminio 30x60x500 mm (el más grande). Se comienza a colocar los bloques calefactores, el material elegido para cumplir el proceso de fundición es el Aluminio gracias a su alta conductividad térmica, es decir que distribuye el calor a través de toda su estructura, además de ser ligero y fácil de mecanizar, pensado para resistir temperaturas de hasta  $250^{\circ}C$ . En estos bloques calefactores se ingresarán los cartuchos calefactores y el termistor. Se inserta los cartuchos en los agujeros de los bloques calefactores de manera que al unirlos queden en forma paralela y el termistor de igual manera se coloca en uno de los orificios en la parte inferior del bloque calefactor. Al unir los componentes, se juntan ambos bloques calefactores de manera que envuelva todo el tubo extrusor y se asegura con una abrazadera.



Figura 27. Cámara calefactora. Fuente propia.

A continuación, se usa el cojinete de empuje y se aplica grasa de silicona para garantizar su correcto funcionamiento y por último se ingresa su chaveta en la ranura donde se aplicó la grasa para después ingresar el rodamiento en la pieza impresa de la figura 28 conectada al motor nema 23.



Figura 28. Pieza Impresa 1. Fuente propia.

Una vez conectadas las piezas se procede a colocar la tolva impresa (figura 29) junto a su respectivo soporte (figura 30) y se lo ajusta con tornillos de cabeza cilíndrica quedando de la siguiente manera:

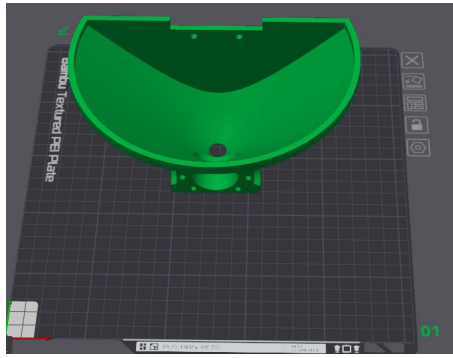


Figura 29. Pieza Impresa 2. Fuente propia.

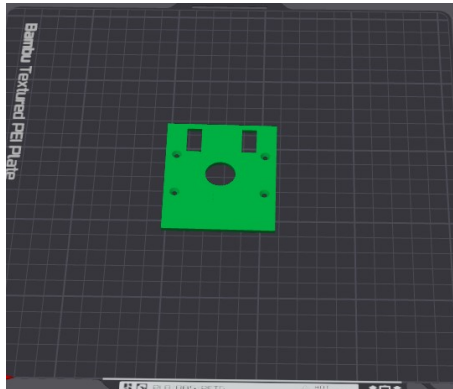


Figura 30. Pieza Impresa 3. Fuente propia.



Figura 31. Receptáculo de filamento. Fuente propia.

El motor es insertado en su correspondiente soporte, el cuál ayuda a ser ajustado en el perfil de aluminio. Se coloca el tornillo extrusor en el motor nema, de modo que ingrese junto al rodamiento con la pieza impresa, ajustándolo al soporte del motor nema y al tornillo extrusor para evitar errores y desfases al momento de enviar material reciclado a la cámara calefactora. Por último, se ajusta el soporte del motor al perfil de aluminio de tal modo que el tornillo extrusor pueda ingresar en el tubo extrusor y se compruebe que el tornillo extrusor pueda

girar normal y fácilmente, cabe destacar que no es necesario ingresar todo el tornillo, además de que la unión de los componentes no debe verse inclinada o desfasada si se desea un torque correcto sin errores.



Figura 32. Modulo de extrusión. Fuente propia.

Ambas piezas se juntan con tornillos y se usan con tuercas en T para ajustarlas al perfil de Aluminio para evitar desfases y por último unirlo con el tubo extrusor conectado al soporte, de esta manera se garantiza que el material triturado ingrese correctamente dentro en el tubo extrusor sin orificios por lo cuáles pueda salir.

Es clave recalcar que se cuenta con una sección en donde se puede percibir la abertura del embudo, esta parte esencial porque corresponde al acoplamiento del embudo y el cuerpo del extrusor encargado de conectar y guiar el material triturado hacia el husillo de forma controlada y centrada, el diseño este hecho para que garantice un flujo de material constante y centrado para evitar contaminaciones, obstrucciones, delineaciones y pérdidas del material. Este acoplamiento asegura una estabilidad entre el embudo y el cuerpo del extrusor muy importante para su funcionalidad para el tornillo sin fin que transporta y comprime en la cámara calefactora todo el material para su futura extrusión.

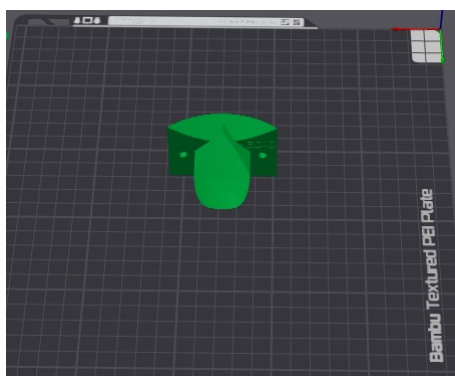


Figura 33. Pieza impresa 4. Fuente propia.

A continuación, se procede a utilizar los otros perfiles de aluminio para generar la base que sostiene la extrusora y se usa los dos perfiles de aluminio de 30x30x300mm y el de 30x30x400mm y posteriormente es unido con los conectores para perfil de aluminio de 90°C. El perfil de aluminio más largo de 400mm se ubica en el centro para que soporte todo lo peso y estabilice la extrusora, seguido de los otros perfiles de aluminio de 300mm de largo los cuales están por los costados para evitar que se caiga la extrusora, esto es lo que mantiene en equilibrio la extrusora y los conectores están en las esquinas que generen los perfiles al juntarlos.



Figura 34. Base de la extrusora. Fuente propia.

Para la MKS como controlador principal, detrás del perfil de aluminio principal se une al soporte impreso que lo sostiene (figura 35):

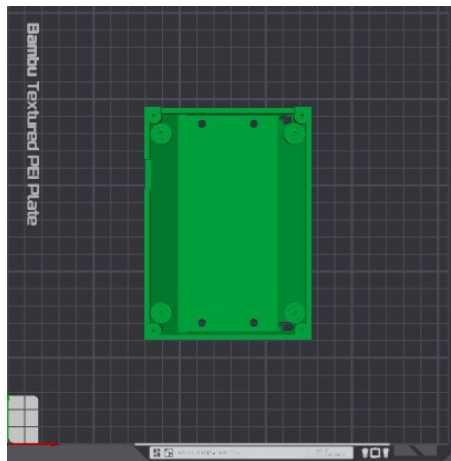


Figura 35. Pieza impresa 5. Fuente propia.

Se ajusta con tornillos de cabeza cilíndrica y tuercas en T que pasen hasta el perfil de aluminio y se hace lo mismo con la otra pieza impresa que es el soporte del controlador para el motor nema 23 (figura 36):

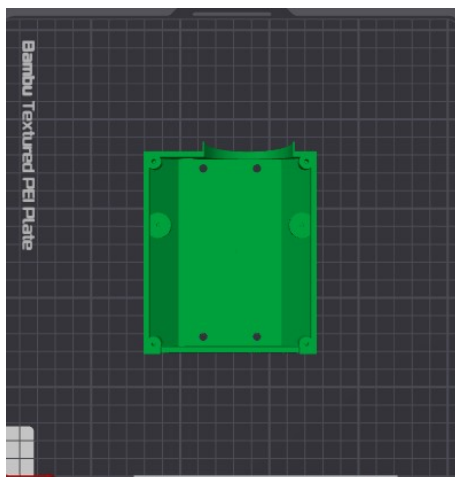


Figura 36. Pieza impresa 6. Fuente propia.

En estas secciones es donde están todas las conexiones y cableados correspondientes para la correcta funcionalidad de los motores, sistema de enfriamiento, sistema de calentamiento y hardware del extrusor.

Para las piezas impresas de la figura 31 y figura 32, tiene como tarea ser guía principal del cable de control, ajustada en la parte inferior del perfil de aluminio.

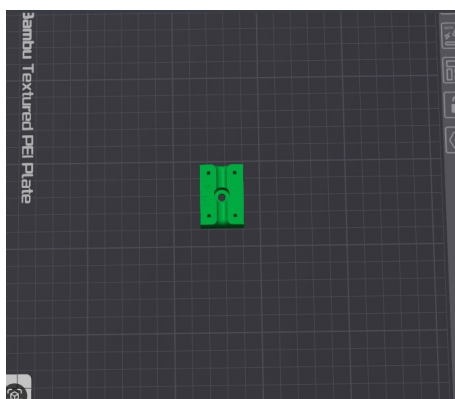


Figura 37. Pieza impresa 7. Fuente propia.

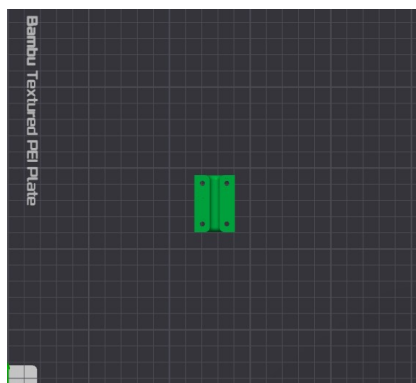


Figura 38. Pieza impresa 8. Fuente propia.

Para esto se utiliza una tuerca en T. El cable de control se pasa por la pieza impresa reciente y se le colocan abrazaderas para cables para evitar realizar soldaduras, puesto que aseguran buenos contactos eléctricos y evitan falsos contactos o cortocircuitos, además de que protegen de los contactos accidentales. La finalidad de las abrazaderas en estas extrusoras es conectar los cables del motor nema 23, los cartuchos calefactores y los del termistor con la fuente de poder o placa de control, generando seguridad, orden y fácil de montar y desmontar. En el cable de control se distribuyen ambos cables en los 2 terminales de la abrazadera es decir que uno va en un extremo de una abrazadera y otro va en el otro extremo, por consiguiente, se añaden 2 cables rojos en una de las abrazaderas y en otra de las abrazaderas se agrega 2 cables negros de la siguiente manera:

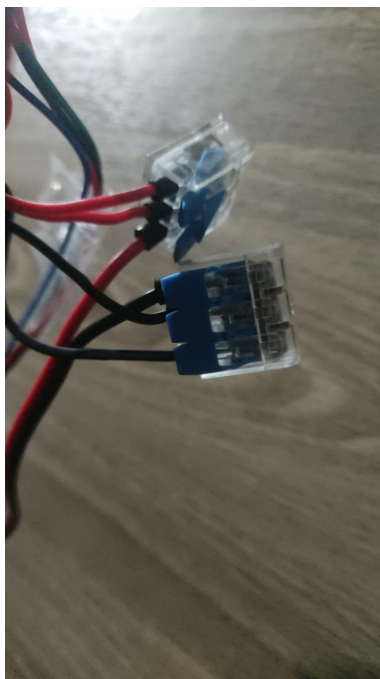


Figura 39. Conexiones de alimentación. Fuente propia.

Luego se coloca el cable de control en la pieza impresa de la figura 38 anteriormente en el perfil de aluminio. Se procede a usar la MKS y a aflojar todos los tornillos de esta para las conexiones:



Figura 40. Placa MKS. Fuente propia.

Se muestra el dataset de la MKS para mejor ilustración de como realizar las conexiones:

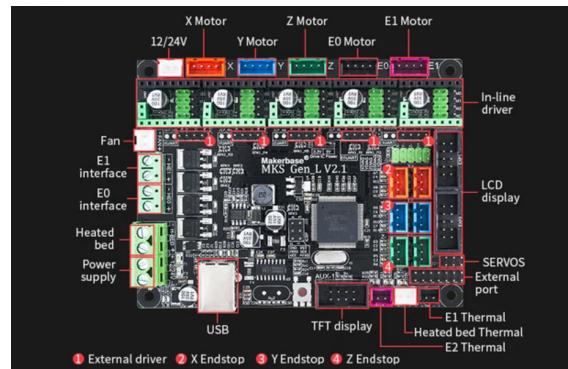


Figura 41. Dataset MKS [78]

Una vez aflojados los tornillos, se toma el cable plano perteneciente a la pantalla LCD y se conecta en los puertos inferiores de la MKS y por consiguiente se ajusta la pantalla LCD a su soporte (figura 43).



Figura 42. Conexión pantalla LCD. Fuente propia.

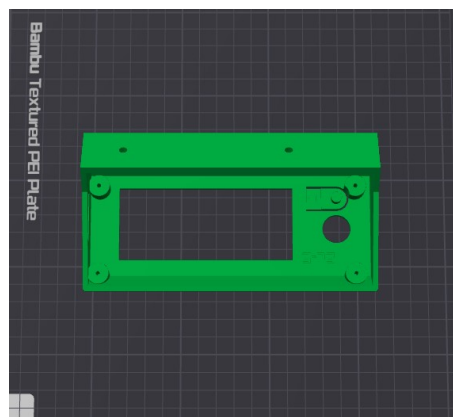


Figura 43. Pieza impresa 9. Fuente propia.

Para los cables de conexión para los motores paso a paso pequeños (motores nema 17) es necesario cambiar la posición de los cables, considerando como guía de izquierda a derecha el orden es el siguiente: Negro, verde,

azul y rojo, este orden es para el motor nema 17 del sistema de bobinado y para el motor del sistema de filtrado de filamento es negro, azul, verde y rojo de izquierda a derecha. Una vez cambiado el orden de los cables, se conectan en la parte inferior derecha, en el último puerto de la MKS y lo mismo los otros conectores, pero en la parte superior derecha en el primer puerto de la MKS (también deben tener el mismo orden de conexión)

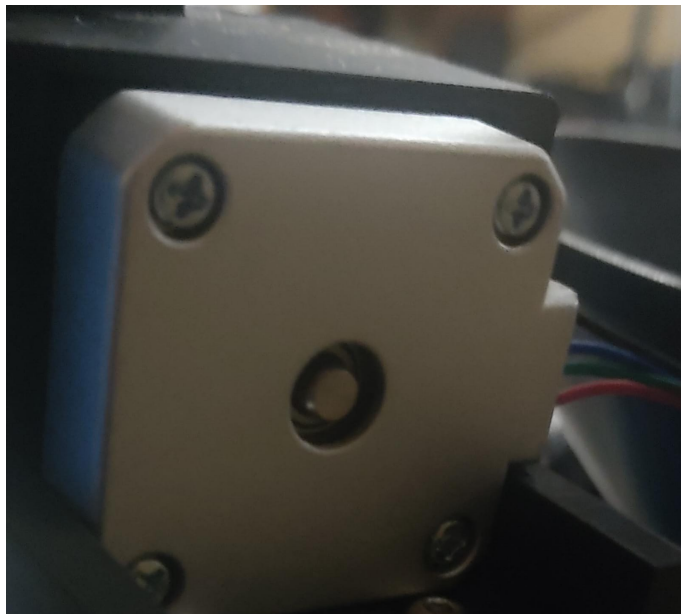


Figura 44. Ajuste de cableado de motor nema 17. Fuente propia.

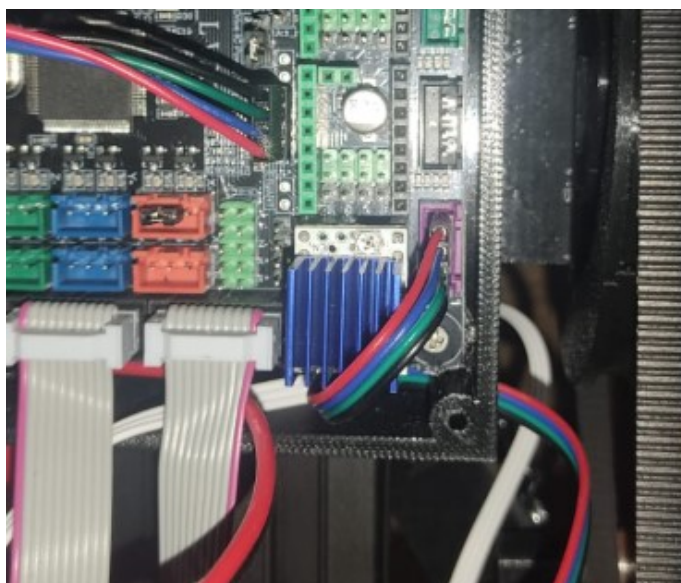


Figura 45. Conexión de filtrado de filamento. Fuente propia.

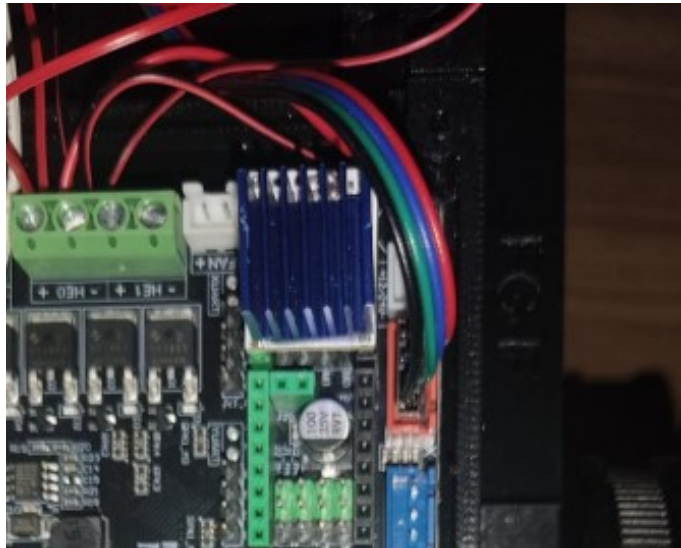


Figura 46. Conexión de bobinado de filamento. Fuente propia.

Al conectar los motores nema 17 en sus correspondientes puertos de la MKS, se conectó los drivers de estos motores para su funcionalidad, de no conectar los drivers los motores no funcionan. Por consiguiente se realiza las conexiones de los ventiladores de 50mm desnudando los hilos para poder ingresarlos en el primer terminal en la parte superior de la MKS (en la sección de los terminales pequeños). Es importante recordar no introducir mucho los hilos porque podrían pinchar el aislamiento y para estas conexiones se puede ingresar varios cables en un mismo terminal, por lo tanto se ingresa en el primer terminal los cables de voltaje positivo (cables rojos) y en el segundo terminal los cables de tierra (cables negro)

A su vez se conectan los cables de los cartuchos calefactores en los terminales grandes justo al lado donde se realizó las conexiones de los ventiladores de 50 y 60mm:



Figura 47. Conexión de los cartuchos calefactores. Fuente propia.

Y las conexiones del termistor se ubican en el puerto blanco en la parte inferior a la izquierda de la MKS

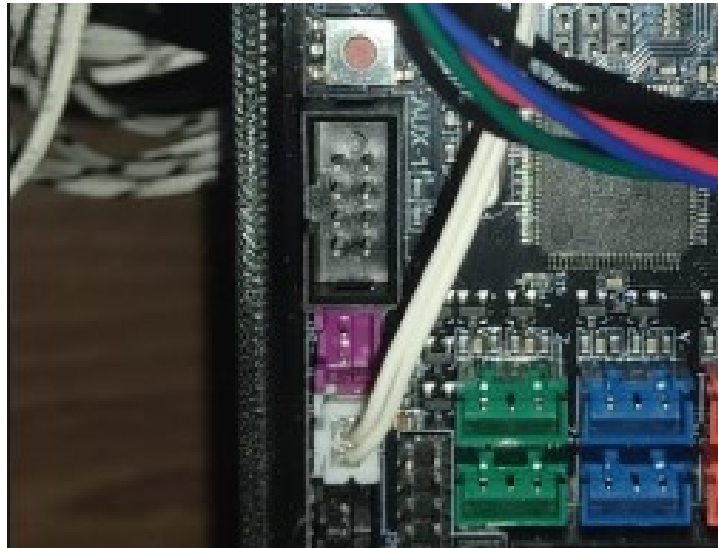


Figura 48. Conexión del termistor. Fuente propia.

Ahora restan los cables de las abrazaderas y su correspondiente lugar que es en el último puerto grande de la parte superior izquierda de la MKS, específicamente el cable negro va a la izquierda y el cable rojo va a la derecha.

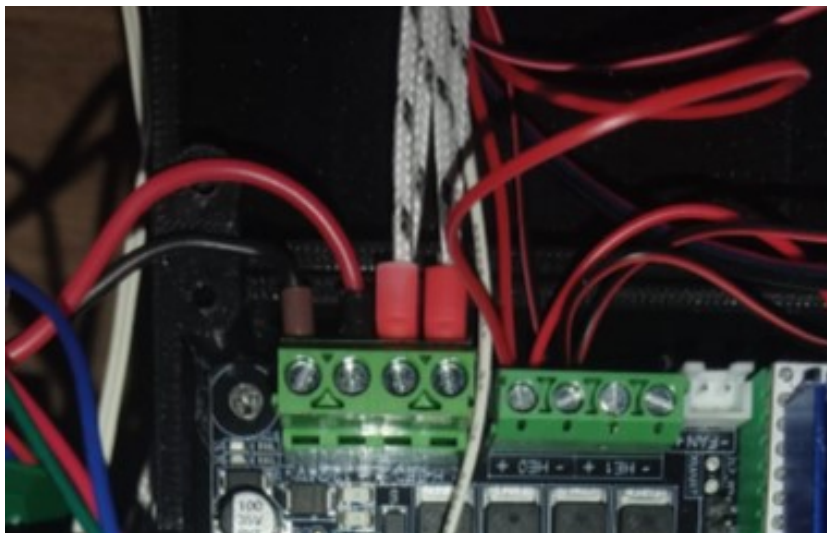


Figura 49. Conexión de la fuente de alimentación a la MKS. Fuente propia.

Posteriormente se usa el controlador del motor nema 23, el cuál es esencial para la extrusora. Primero cuenta con interruptores DIP, esto se utiliza para ajustar el amperaje del motor y las revoluciones por segundo. Los interruptores 1, 2, 4 y 5 se presionan hacia arriba mientras que los interruptores 3 y 6 se mantienen hacia abajo, recomendable es ideal usar un destornillador para asegurar que están al máximo. Los interruptores que están hacia arriba indican que están OFF (apagado) y los que están hacia abajo están ON (encendido).

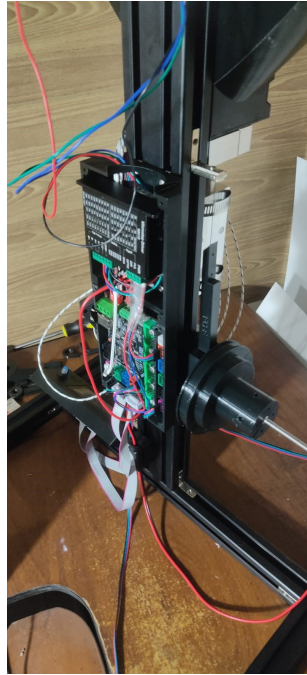


Figura 50. Controlador del motor nema 23. Fuente propia.

Ahora se juntan los cables de tal manera que el controlador al colocarlo y ser atornillado cubra todo ese espacio, pero se asegura de que los cables negros (tierra) y rojo (+Vdc) sobrantes de la abrazadera estén expuestos para poder conectarlos a sus correspondientes puertos.

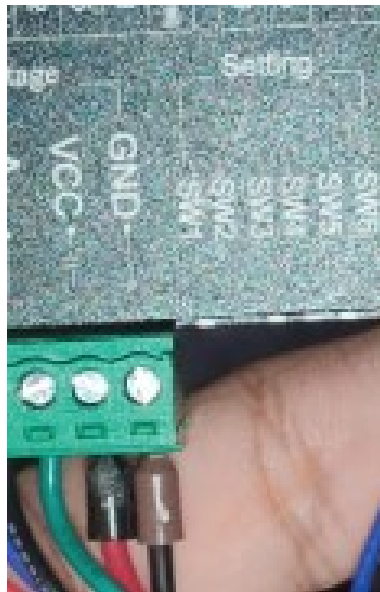


Figura 51. Conexión de la fuente de alimentación al driver. Fuente propia.

Justo al lado de las conexiones del voltaje del controlador, se colocan los cables del motor nema 23. Es importante especificar la posición de cada conexión: De izquierda a derecha el primero es el cable azul conectado al puerto “-B”, siguiendo con el cable rojo al puerto “B+”, el cable negro al puerto “A-” y el cable verde al puerto “A+”.

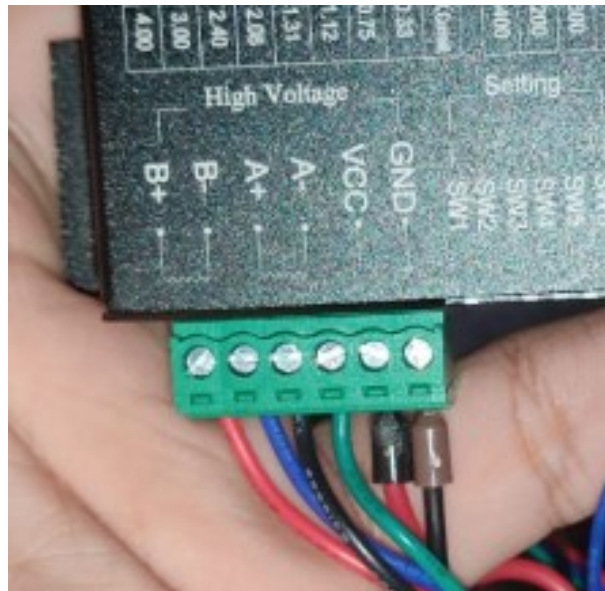


Figura 52. Conexiones del motor nema 23 al driver. Fuente propia.

A continuación, se extrae el otro bloque de terminales verde del controlador del motor nema 23 para facilitar la conexión de nuevos cables dupont (macho-hembra) siguiendo el siguiente orden de izquierda a derecha: Azul, verde, negro y rojo (los cables deben ser ingresados desnudos en los terminales). El lado contrario del cable dupont es utilizado para conectarlo en la parte inferior derecha

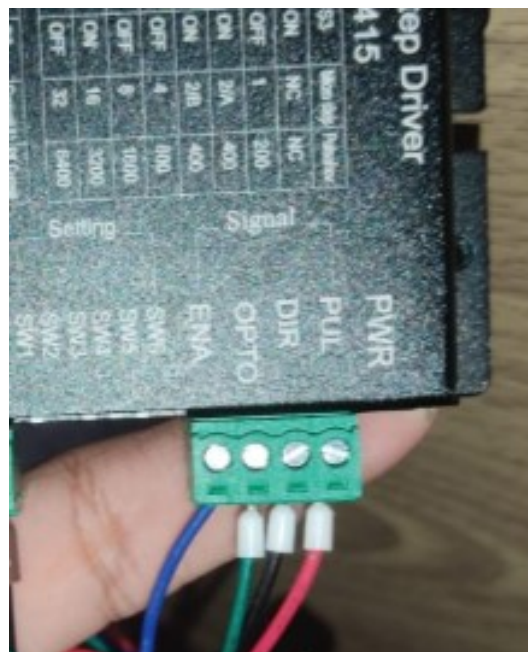


Figura 53. Conexiones del motor nema 23 al driver. Fuente propia.

Se vuelve a ingresar el bloque de terminales verde a su posición original con las conexiones correspondientes del cable dupont.

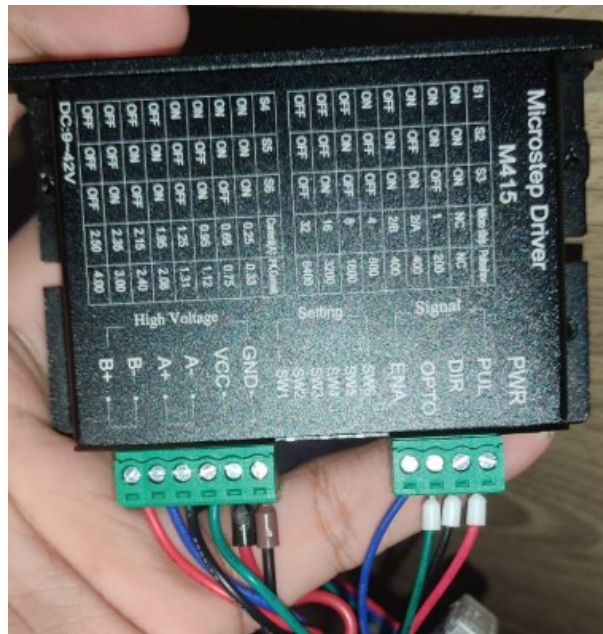


Figura 54. Conexiones del motor nema 23 al driver. Fuente propia.

Por último, se usa la pantalla LCD y se conectan los cables correspondientes ya ingresados en la MKS, específicamente el cable de la izquierda se conecta en “EXP2” y el cable de la derecha se conecta en “EXP1” y se inserta con la pieza impresa diseñada específicamente para la pantalla LCD el cual es el soporte para poder ser manipulada cómodamente.

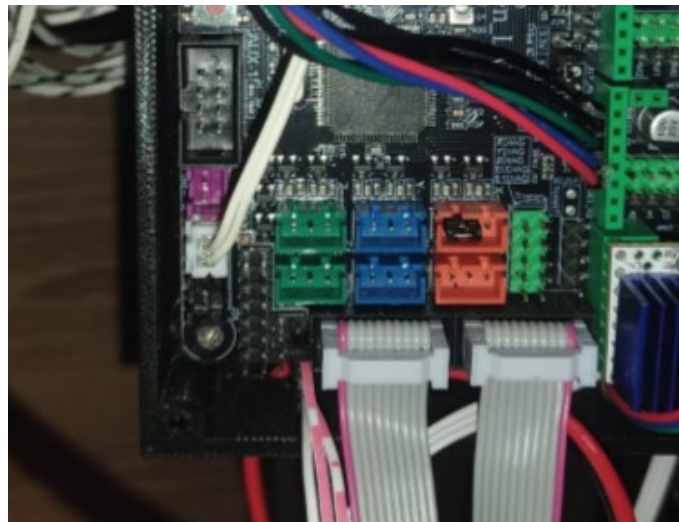


Figura 55. Conexión de la pantalla LCD a la MKS. Fuente propia.

Para esta sección es importante cumplir con especificaciones del diseño para una correcta funcionalidad, para esto se comienza introduciendo un tornillo de cabeza cilíndrica junto a una tuerca en T en la pieza impresa de la figura 56.

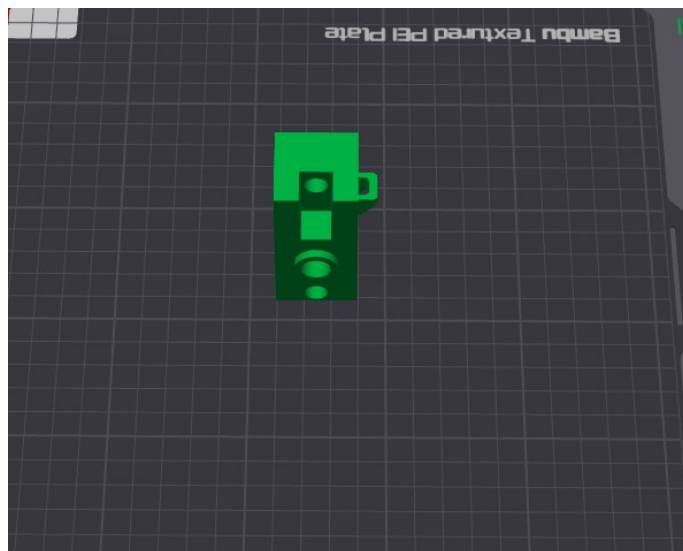


Figura 56. Pieza impresa 10. Fuente propia.

En su parte trasera se ingresa una tuerca M10 con su correspondiente tornillo y seguido de 2 rodamientos 10x26x8mm. Al tener desarrollada la pieza se ajusta en el perfil de aluminio mas grande y se procede a usar la pieza impresa de la figura 57:

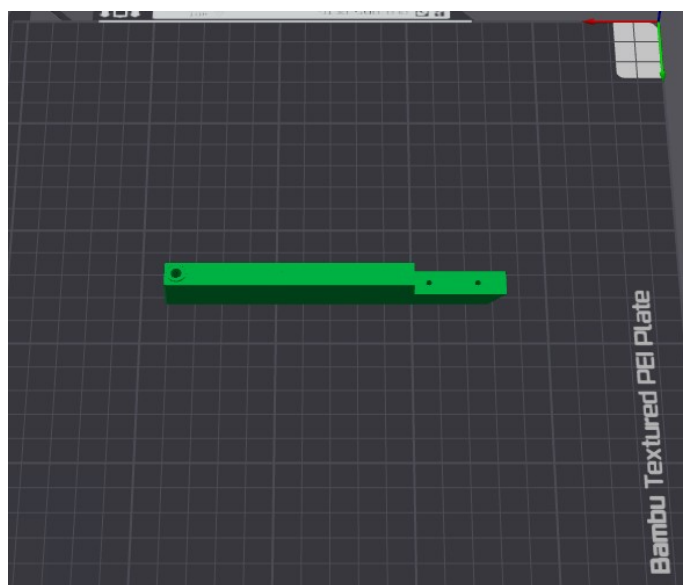


Figura 57. Pieza impresa 11. Fuente propia.

En su orificio de mayor diámetro se coloca un rodamiento de 4x13x5mm y se fija con un tornillo de cabeza cilíndrica y se aparta un momento para usar las piezas impresas de la figura 58:

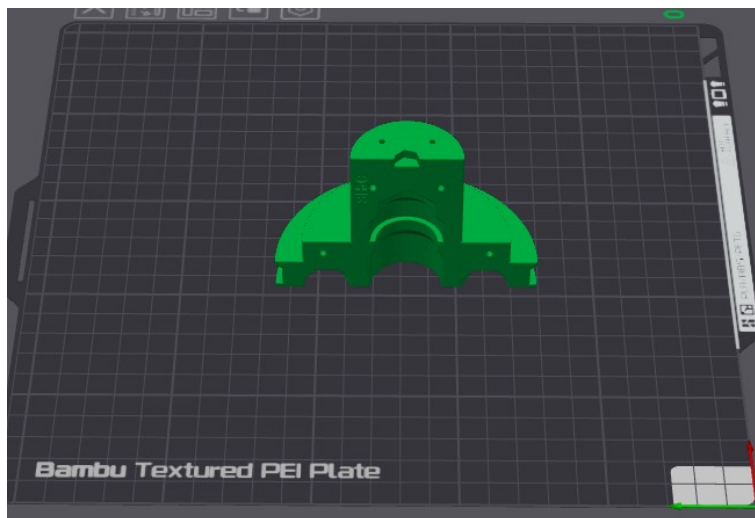


Figura 58. Pieza impresa 12. Fuente propia.

Es importante resaltar que para la pieza impresa de la figura 58 se debe de imprimir 2 veces puesto que esta diseñada para ingresar la pieza desarrollada anteriormente y de esta manera cerrar esta sección de la siguiente manera:

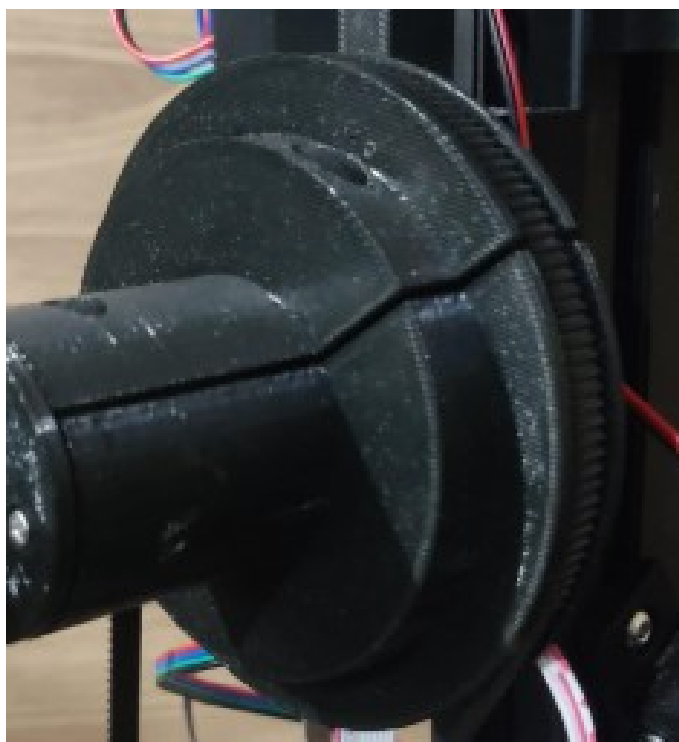


Figura 59. Sección inicial del bobinado. Fuente propia.

Al unir todas las pieza, se procede a cubrir con la otra parte de las piezas impresas de la figura 57 de la siguiente manera:

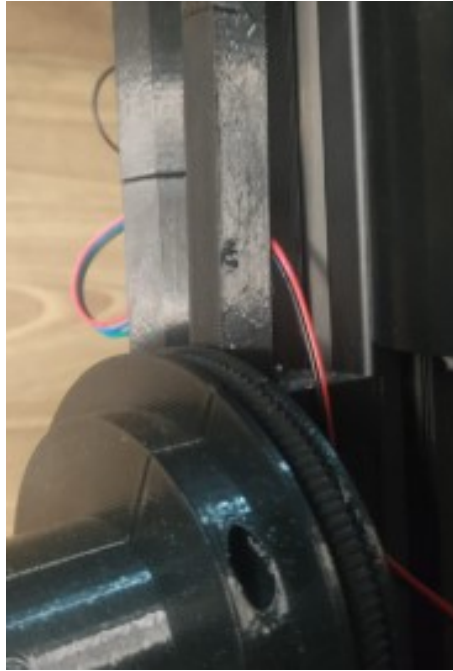


Figura 60. Sección cerrada del bobinado. Fuente propia.

En todos sus orificios se ajusta con tornillos para madera para mayor firmeza y en la parte superior de la unión se ingresa el tornillo hexagonal M5X70 de modo que la cabeza del tornillo encaje con el hueco diseñado y pensado para este paso y se asegura con la pieza impresa de la figura 61:

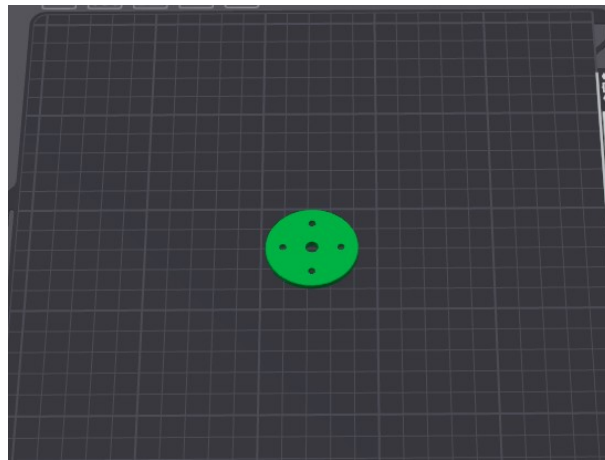


Figura 61. Pieza impresa 13. Fuente propia.

De tal modo al haber ajustado los tornillos se utiliza otra pieza impresa, la cuál es una arandela de sujeción y se ajusta con una tuerca mariposa. La arandela impresa en 3D (figura 61) es importante porque actúa como separador, además de ser una superficie de fricción ajustable entre la misma arandela y la bobina. Su objetivo es estabilizar la bobina y mantenerla centrada en el eje, minimizar desgastes por fricción directa y facilitar el montaje y desmontaje de los rollos de filamento. De no existir la arandela crea un roce directo con la carcasa y genere fricción que perjudique la calidad del bobinado.

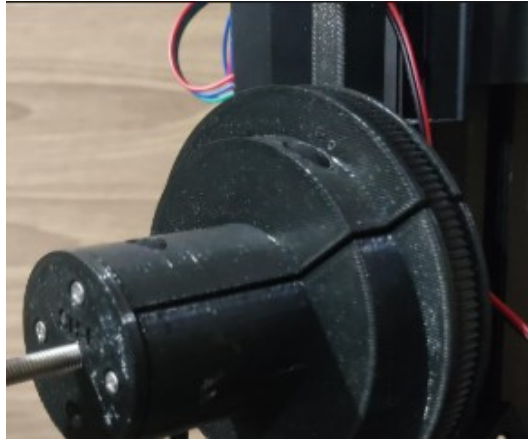


Figura 62. Ajuste del bobinado inicial. Fuente propia.

Finalizada la sección anterior, se toma la pieza impresa (figura 63):

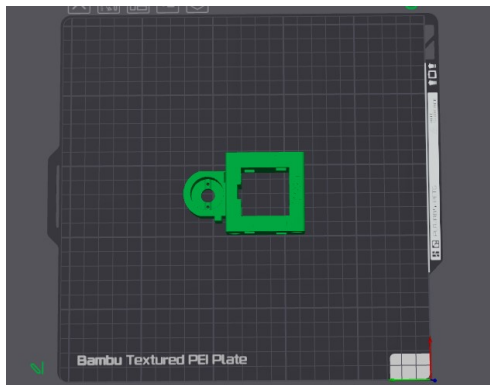


Figura 63. Pieza impresa 14. Fuente propia.

Se ingresan los rodamientos de bolas 4x13x5mm en cada uno de los orificios diseñados para ello y se ajustan con tonillos de cabeza cilíndrica para asegurarlos y se coloca la tuerca de latón junto a su resorte y la pieza roscada en el mismo resorte Ahora encima de la pieza impresa (figura 64):

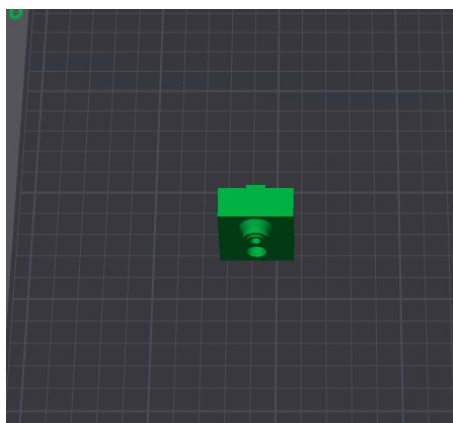


Figura 64. Pieza impresa 15. Fuente propia.

Se coloca un rodamiento de bolas y es ajustado con un tornillo de cabeza cilíndrica M4x10 y por consiguiente se ingresa el husillo de rosca trapezoidal en la pieza impresa (figura 65):

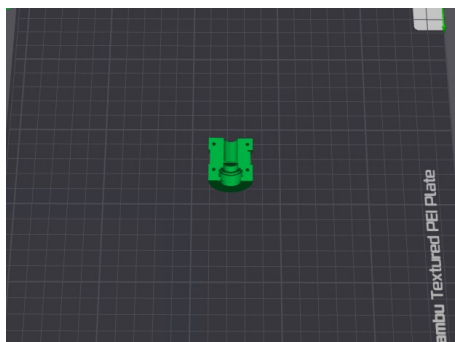


Figura 65. Pieza impresa 16. Fuente propia.

Para la pieza impresa de la figura 65 es importante imprimir 2 veces, ya que una vez realizado este paso se cierra con ambas piezas impresas y se ingresa una tuerca en T y se ajusta con un tornillo de cabeza cilíndrica para así integrarlo cerca del sistema de bobinado.

Terminada esta sección, se procede a insertar rodamientos en las piezas impresas (figura 66 y figura 67):

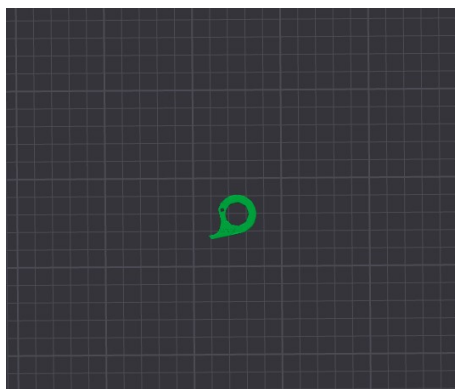


Figura 66. Pieza impresa 17. Fuente propia.

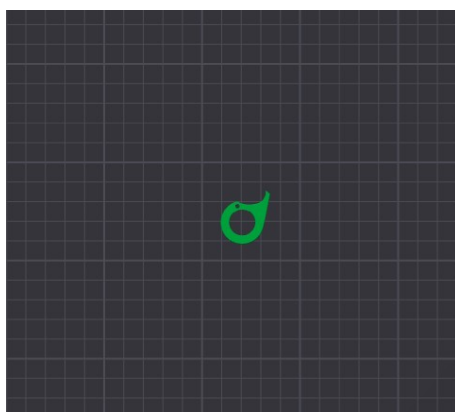


Figura 67. Pieza impresa 18. Fuente propia.

Y posteriormente es fijado en la pieza impresa de la figura 68:

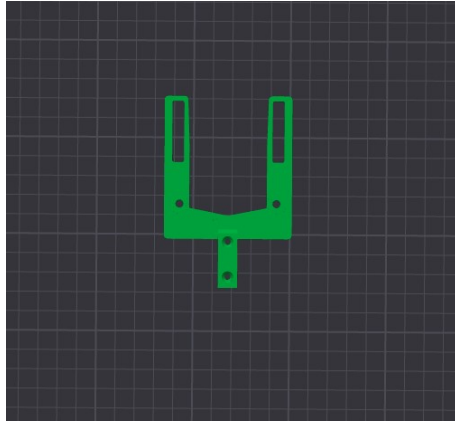


Figura 68. Pieza impresa 19. Fuente propia.

Una vez atornilladas las piezas se procede a utilizar 2 tornillos para madera y se ingresa el resorte de tensión el cual tiene un ojal en ambos extremos y se colocan en los orificios justo al lado de las piezas recientemente atornilladas en la figura 68.

Ahora en la misma sección hay que incluir las siguientes piezas impresas (figura 69 y figura 70):

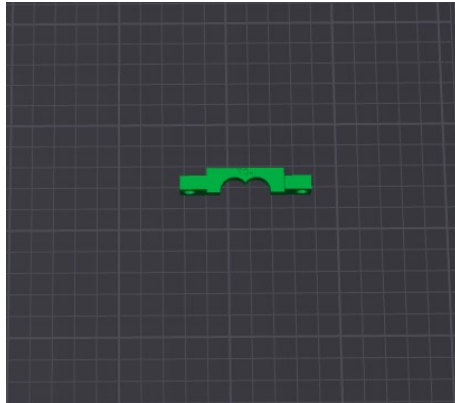


Figura 69. Pieza impresa 20. Fuente propia.

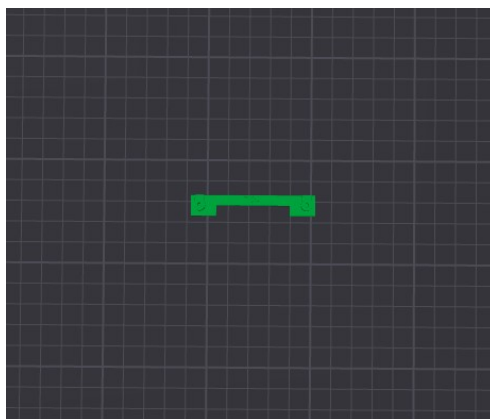


Figura 70. Pieza impresa 21. Fuente propia.

Estas piezas son unidas en los orificios rectangulares de la pieza impresa 19 y posteriormente son ajustadas con tornillos para madera. Esta sección contiene dos posiciones de conmutación por lo que si es empujado adelante y hacia atrás este se bloquea por lo que se debe de empujar en función de la fuerza del resorte.

Ahora insertamos 2 cojinetes de bolas en la pieza impresa (figura 71):

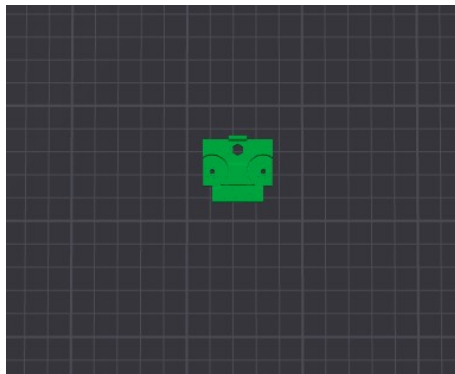


Figura 71. Pieza impresa 22. Fuente propia.

Y se atornillan firmemente con tornillos para madera 2x5x12mm y en la parte trasera se inserta un tornillo de cabeza junto a una tuerca en T. Ahora se coloca otro rodamiento de bolas, un tornillo de madera y un resorte de compresión de 6x35mm en las piezas impresas:

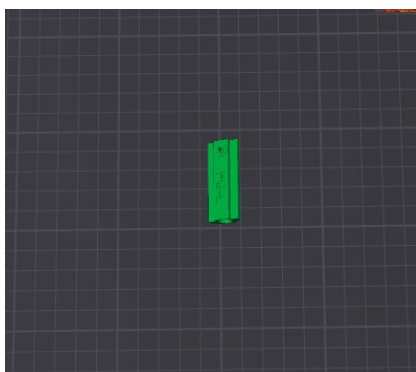


Figura 72. Pieza impresa 23. Fuente propia.

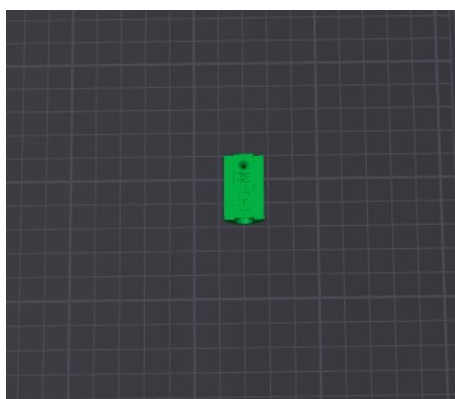


Figura 73. Pieza impresa 24. Fuente propia.

Usando el perfil de aluminio 30x30x210mm, se insertan ambas piezas y las piezas ensambladas recientemente y se coloca en el perfil de aluminio uno de los conectores perfil de aluminio y posteriormente se ajusta el tornillo quedando de la siguiente manera:



Figura 74. Conexión del perfil de aluminio. Fuente propia.



Figura 75. Sección de oscilación del bobinado. Fuente propia.

Para completar se ajustan los tornillos con la sección del rollo de filamento:

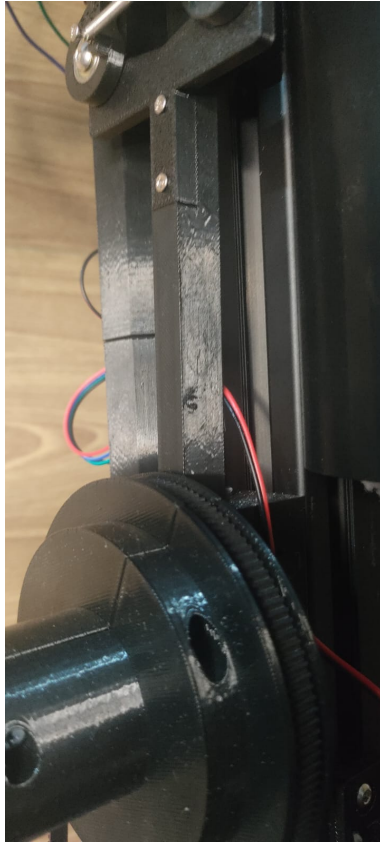


Figura 76. Unión del bobinado. Fuente propia

A continuación se ingresan tornillos de cabeza cilíndrica en la pieza impresa (figura 77):

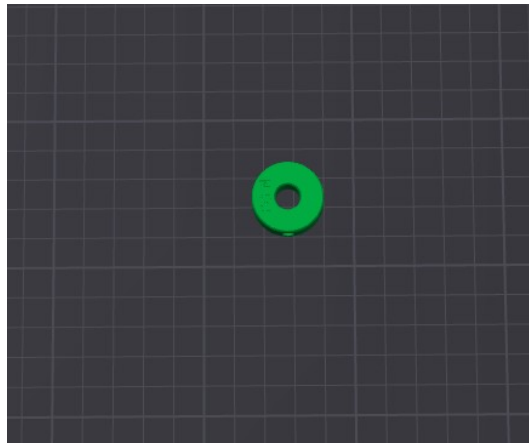


Figura 77. Pieza impresa 25. Fuente propia

Para esta pieza son 2 impresiones para realizar y se ingresa en el husillo de rosca trapezoidal. Se comienza a ingresar la corredera ya ensamblada, es de tomar en cuenta que el husillo de rosca trapezoidal debe enroscarse la tuerca de latón, los rodamientos de bolas deben insertarse en el perfil de aluminio y el brazo oscilante debe moverse únicamente hacia adelante o hacia atrás de acuerdo con el sentido en que rote el husillo de rosca trapezoidal y se ingresa hasta la mitad toda la sección.

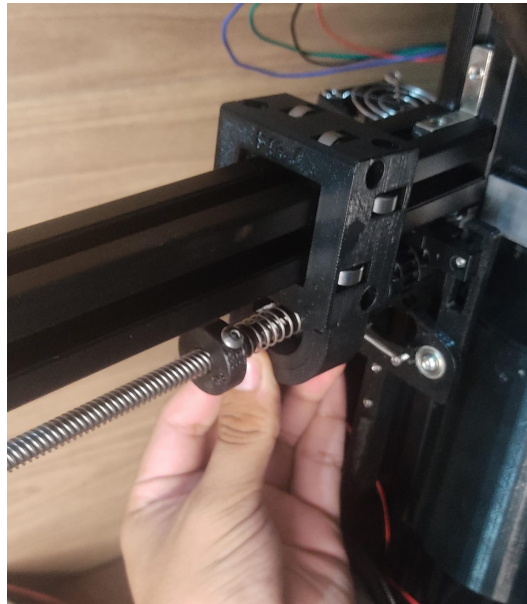


Figura 78. Corredera del bobinado. Fuente propia

Además, se ingresan ambas piezas (figura 77). en ambos extremos para ser fijada en el husillo de rosca trapezoidal engrasado para reducir la fricción.

Una vez realizadas las conexiones el balancín debe moverse hacia arriba y hacia abajo, de tal modo que gire en el husillo de rosca trapezoidal y el carro empieza a desplazarse de izquierda a derecha. Cuando el carro alcanza los límites de izquierda y derecha, el balancín automáticamente cambia su posición lo que hace que modifique el sentido del giro. En caso de que el cambio sea producido sin que el carro alcance el límite, hay que aumentar la tensión del resorte, de manera en al desplazar el carro hacia un lado en que el pequeño tornillo de sujeción este expuesto y en caso de algún problema de movilidad se puede aflojar y aumentar la tensión del resorte moviendo los componentes.

Para completar esta sección se integra el motor nema 17 el cuál da movilidad a toda la sección del bobinado y para eso se comienza colocando la polea GT2, 6mm de 20 dientes en el eje del motor y se colocan tornillos en los orificios de la polea de modo que toque la superficie del eje y se mantenga ajustado, es importante mencionar que la superficie superior de la polea debe estar a 2cm de distancia de la superficie superior del montaje del motor. Ahora el motor nema 17 es integrado a la pieza impresa de la figura 79:

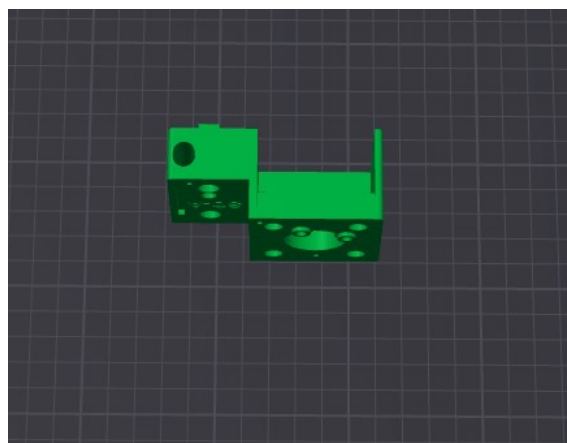


Figura 79. Pieza impresa 26. Fuente propia

Se ajusta con tornillos de cabeza cilíndrica al igual que dos rodamientos de bolas agregados justo en los orificios ubicados al lado del eje con la polea y después de ajustarlos, se incorpora la correa de distribución de modo que cubra los alrededores de la polea y pase por los rodamientos de bolas. En la parte baja de la pieza impresa se colocan 2 tornillos de cabeza cilíndricas junto a tuercas en T para poder ensamblarlo al perfil de aluminio justo por debajo del bobinado. La correa de distribución se dobla de modo que pase por los alrededores de ambos rodamientos y se rodea la correa en la sección del bobinado:

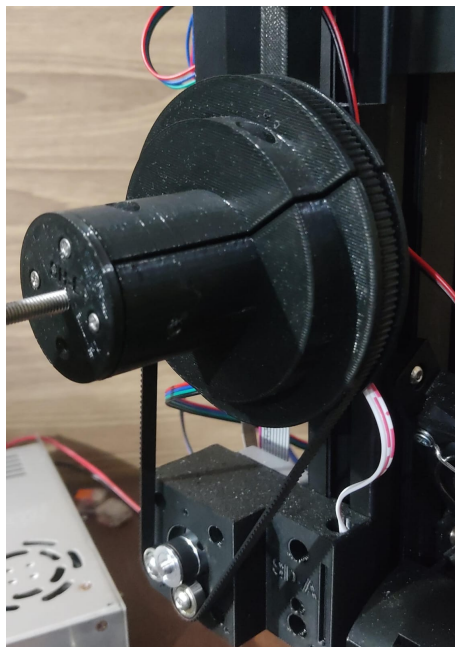


Figura 80. Inclusión de motor nema 17. Fuente propia

Para mejor direccionamiento y presión del bobinado se utiliza la pieza impresa de la figura 81:

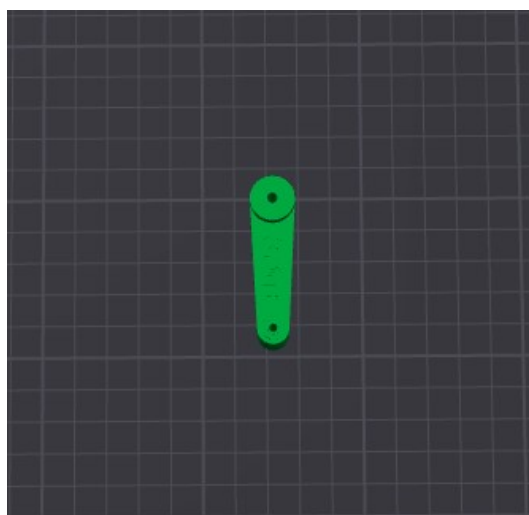


Figura 81. Pieza impresa 27. Fuente propia

Esta pieza es un brazo el cuál tiene incorporado 2 rodamientos de bolas en su parte inferior ajustados con un tornillo de madera y en la parte superior únicamente en ambos lados (delantero y trasero), tiene ajustados 2 tornillos cabeza cilíndrica de modo que ingrese en la pieza impresa de la figura 82:

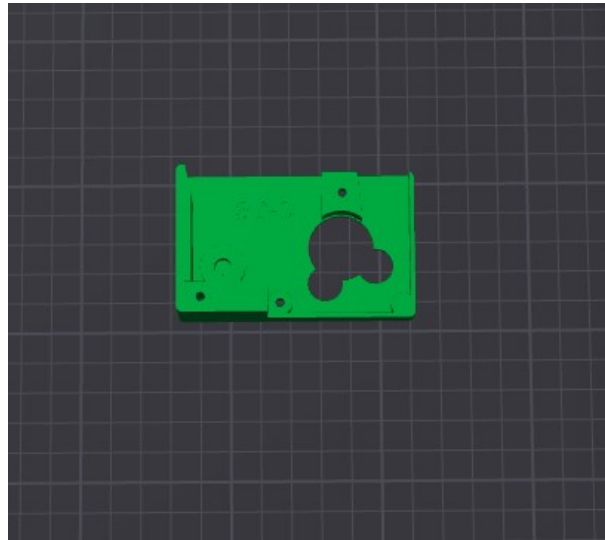


Figura 82. Pieza impresa 28. Fuente propia

La pieza 28 es la que cierra el sistema del motor y sostiene el brazo de la pieza 27 y ejerce un poco de presión entre la correa y el rodamiento para darle mejor movilidad al bobinado y finalmente se realiza la conexión del motor para comenzar a operar todo el sistema de bobinado:

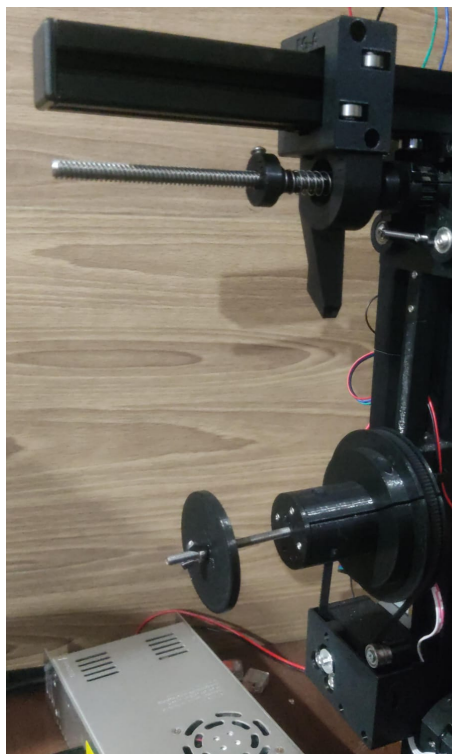


Figura 83. Sistema de bobinado. Fuente propia

Ahora para la estructura de aislamiento de la cámara calefactora hay que usar la pieza impresa de la figura 82 la cual cubre toda esa sección:

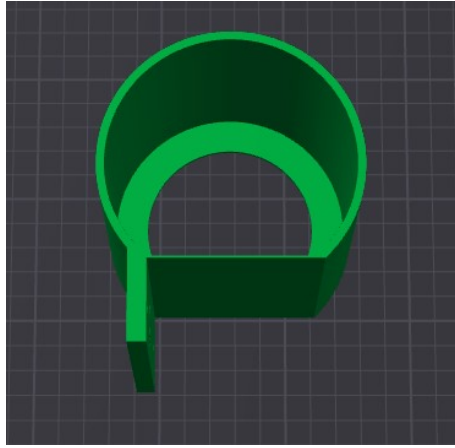


Figura 84. Pieza impresa 29. Fuente propia

Además se incorpora la lana de roca que es la que rodea y abraza la cámara calefactora y para mantenerla ajustada se inserta por debajo la pieza 29 y se ajusta en el perfil de aluminio con tornillos de cilíndrica y tuercas en T para permitir el desplazamiento a través de esta sección y por último se ingresan las piezas impresas de la figura 85 y 86 para cerrar por arriba la cámara calefactora, permitiendo que se concentre mejor el calor:

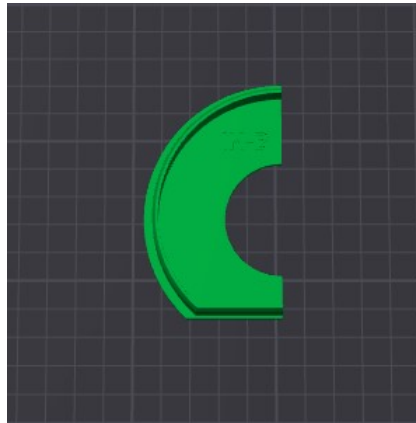


Figura 85. Pieza impresa 30. Fuente propia

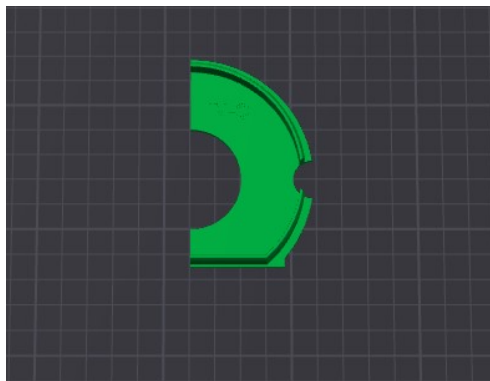


Figura 86. Pieza impresa 31. Fuente propia

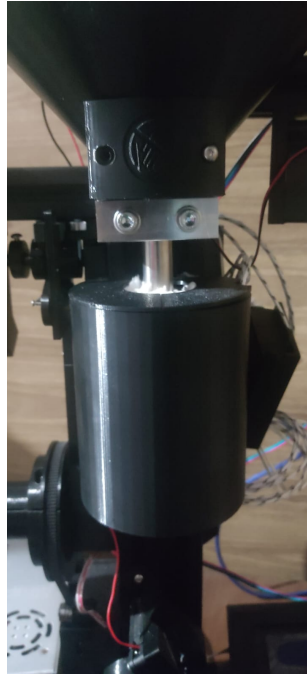


Figura 87. Filtro de fusión. Fuente propia

Para finalizar la zona de extrusión simplemente se coloca la boquilla en el tubo extrusor y se lo enrosca hasta que quede un poco ajustado, es importante que tenga esta presión de ajuste para evitar fugas de filamento en las que pueda sobresalir el material.



Figura 88. Sistema de extrusión. Fuente propia

Para la sección que transporte el filamento al bobinado, se usa el otro motor nema 17 y se junta con la pieza impresa (figura 89) y se atornilla:

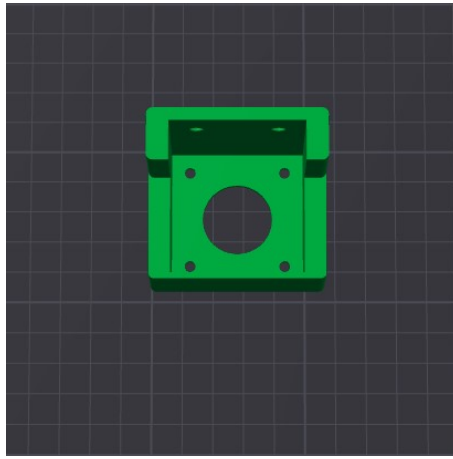


Figura 89. Pieza impresa 32. Fuente propia

Para la siguiente pieza impresa (figura 90) se ingresa un rodamiento y se lo atornilla con un tornillo de cabeza cilíndrica al igual que el orificio por el costado de la pieza cerca del rodamiento:

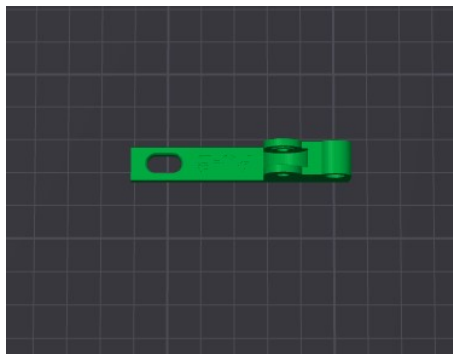


Figura 90. Pieza impresa 33. Fuente propia

Ahora con la pieza impresa (figura 91), se encarga de cubrir el motor nema 17 y ejercer presión en la pieza impresa 33 de modo en que choque con la polea y gire con el rodamiento y se ingresa en los orificios restantes tornillos de cabezas cilíndricas con sus respectivas tuerca en T para el ajuste en el perfil de aluminio:

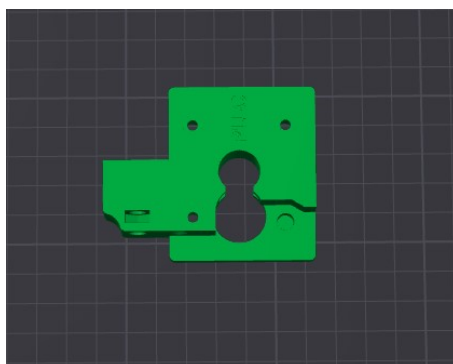


Figura 91. Pieza impresa 34. Fuente propia

Al juntar todo en la pieza 33 se ingresa en el orificio ovalado un tornillo hexagonal M5x40mm y en el tornillo se coloca un resorte de compresión de 6x35mm y una arandela M5. Su finalidad es que cuando no se encuentre

circulando ningún filamento se mantenga cerrada la sección pero en caso de que si lo haya se abre el brazo en función del tornillo hexagonal y se coloca el filamento por el orificio colocado en la parte inferior del soporte del motor nema 17. Para finalizar esta sección idealmente para mantener un ingreso constante y seguro del filamento se ingresa la pieza impresa (figura 92):

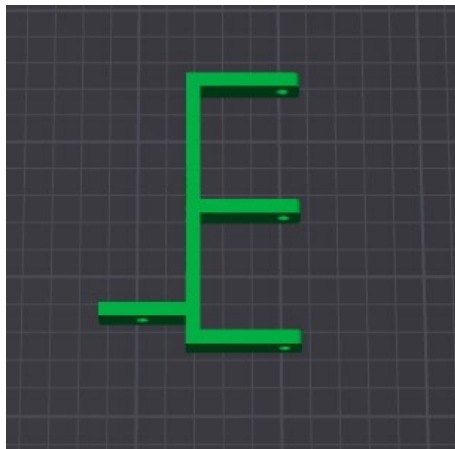


Figura 92. Pieza impresa 35. Fuente propia

Para esta pieza se ingresa en el orificio en la parte izquierda un tornillo de cabeza cilíndrica con una tuerca en T y se ajusta en el perfil de aluminio de modo que este alineada con el orificio del soporte del motor nema 17, la pieza da continuidad y evita que se rompa el filamento.



Figura 93. Sistema de filtrado del filamento. Fuente propia

Si se desea llegar con normalidad al bobinado del filamento es muy importante considerar el sistema de enfriamiento y para esto se utilizan soportes impresos para los ventiladores:

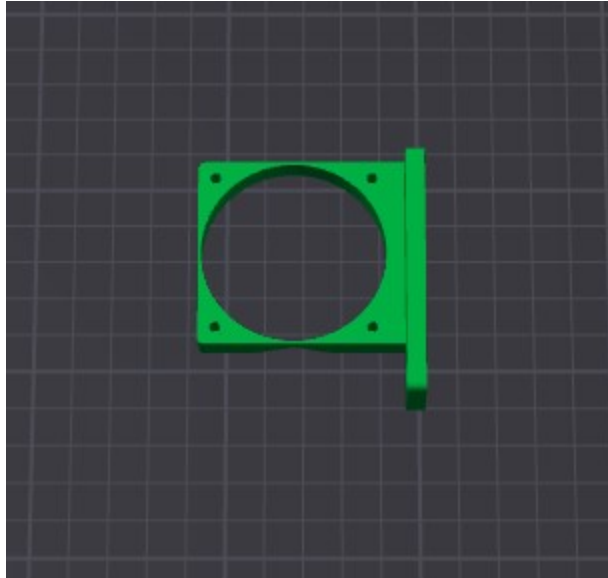


Figura 94. Pieza impresa 36. Fuente propia

Es de considerar que 2 de los ventiladores son de 50mm y uno es de 60mm, pero el diseño es el mismo solo cambian sus dimensiones. Todos los ventiladores son atornillados a sus soportes y sus respectivas rejillas. Los ventiladores de 50mm ubicados por debajo de la cámara de extrusión donde pasa el filamento y es enfriado, de modo que pasa por la sección de filtrado conectando con el motor nema 17 con la polea encargados de transportar el filamento hacia la bobina. El ventilador de 60mm es ubicado por encima del controlador del motor nema 23 por lo que se calienta al momento de operar la extrusora y mantiene regulada su temperatura.

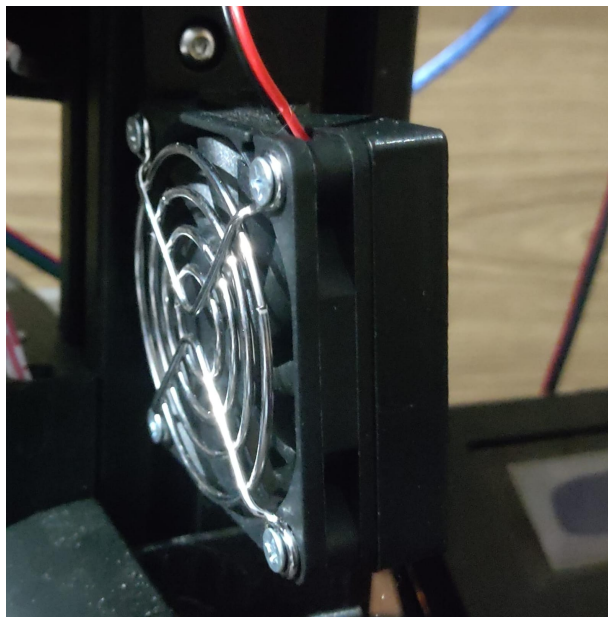


Figura 95. Ventilador de enfriamiento 1. Fuente propia



Figura 96. Ventilador de enfriamiento 2. Fuente propia

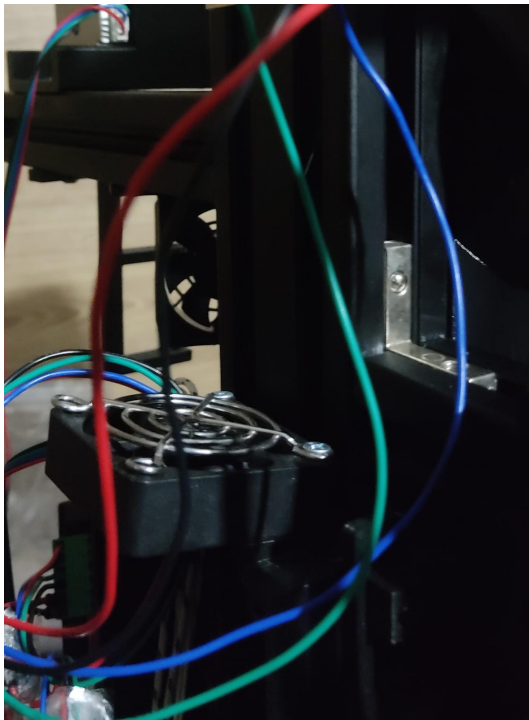


Figura 97. Ventilador de enfriamiento 3. Fuente propia

Para el final de carrera óptico se utiliza la pieza impresa (figura 98):

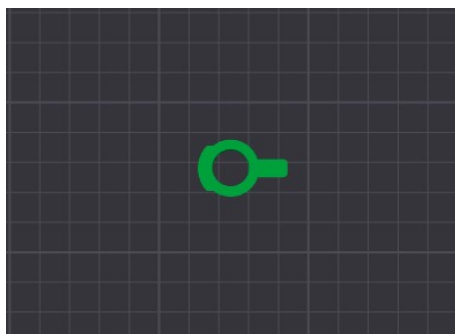


Figura 98. Pieza impresa 37. Fuente propia

Se inserta un rodamiento de bolas en el orificio el cuál esta diseñado a la medida para que cuando el rodamiento ingrese este muy ajustado. En el lado izquierdo se utiliza pegamento para pegar la pieza impresa (figura 99):

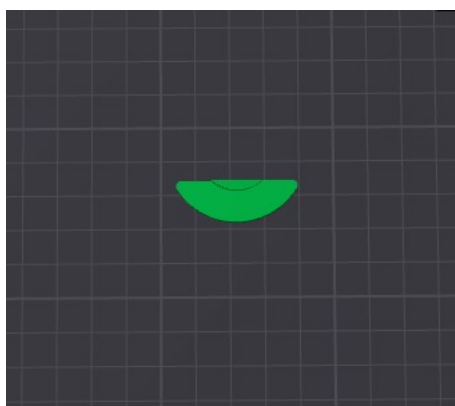


Figura 99. Pieza impresa 38. Fuente propia

En el lado derecho de la pieza hay un pequeño orificio en donde se coloca el alambre y se usa la siguiente pieza impresa (figura 100):

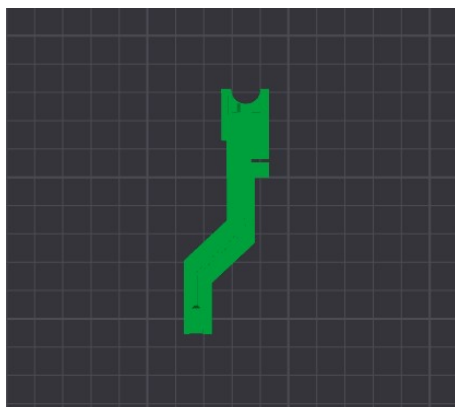


Figura 100. Pieza impresa 39. Fuente propia

La pieza 39 da forma al alambre, su finalidad es determinar si hay circulación del filamento y que evite que roce con otras superficies por razones como perder la forma en la que sale el filamento o se ensucie con tierra o

polvo de las superficies generando imperfecciones. El final de carrera se ingresa en la pieza impresa (figura 101) y se atornilla en los orificios de la parte superior:

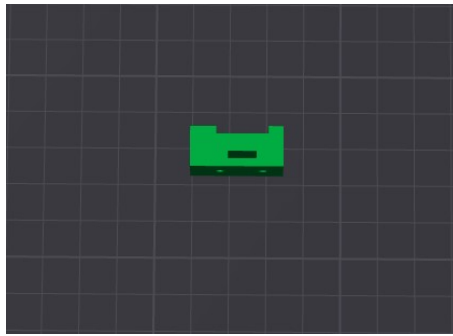


Figura 101. Pieza impresa 40. Fuente propia

Por consiguiente se ajusta a la pieza impresa (figura 102):

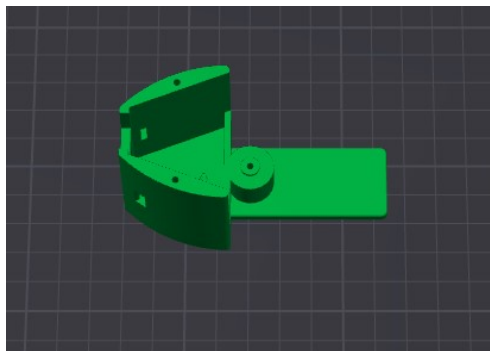


Figura 102. Pieza impresa 41. Fuente propia



Figura 103. Final de carrera. Fuente propia

Y se cierra la sección con la pieza impresa (figura 104):

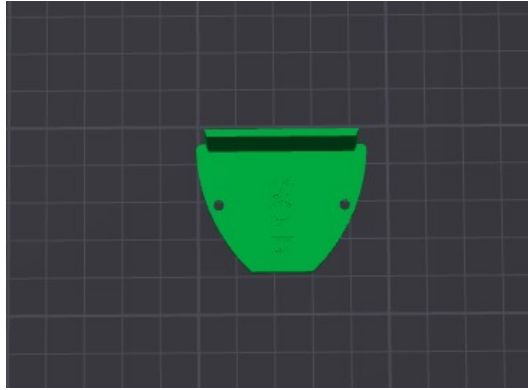


Figura 104. Pieza impresa 42. Fuente propia

El final de carrera es colocado en el perfil de aluminio con la ayuda de la pieza impresa (figura 105) y ubicando las conexiones en la placa MKS:

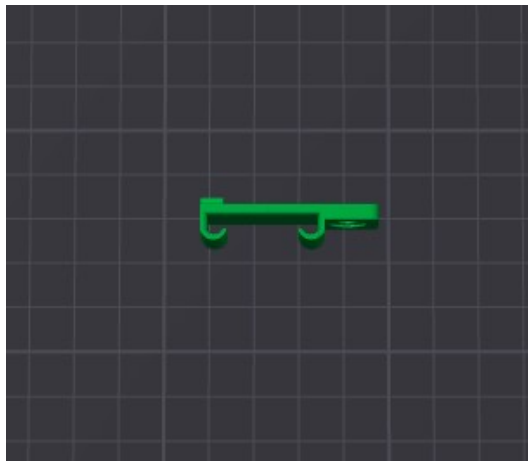


Figura 105. Pieza impresa 43. Fuente propia

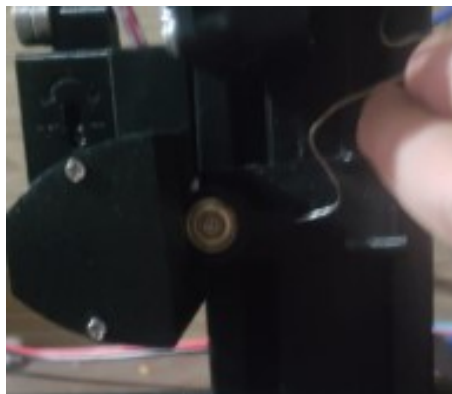


Figura 106. Sección del final de carrera. Fuente propia

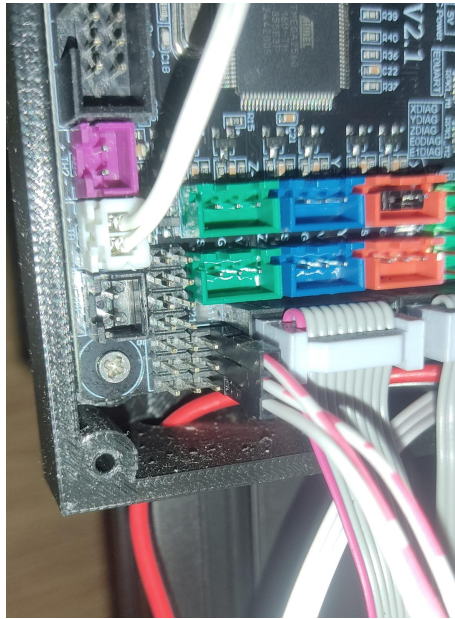


Figura 107. Conexión de final de carrera. Fuente propia

### X-G. Firmware y programación

El firmware Marlin implementado en la extrusora de filamento cumple con la función de controlar el motor paso a paso, la temperatura de la cámara calefactora y extrusión del material precisamente en la configuración del archivo Configuration.h, en donde se pueden definir todos los parámetros de la extrusora como el termistor, temperatura de operación y la relación de pasos en milímetros que es la que decide el material por extruir. El controlador del motor nema 23 (driver A4988) controlado por el firmware regula los micro-pasos y permite movimientos estables y blandos del tornillo sin fin, incluyendo un establecimiento de control PID de temperatura que da estabilidad térmica en la boquilla y evita que afecten la calidad del filamento. Además, las configuraciones límites de seguridad sirve como protecciones por exceso de temperatura. El código Marlin se comporta como el núcleo de control inteligente en la extrusora y garantiza un proceso de extrusión de escritorio confiable, eficiente y seguro.

```
#define TEMP_SENSOR_0 1
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_BED 0
// This makes temp sensor 1 a redundant sensor for sensor 0. If the temperatures difference between these sensors is to high the print will be aborted.
//#define TEMP_SENSOR_1_AS_REDUNDANT
#define MAX_REDUNDANT_TEMP_SENSOR_DIFF 10
// Actual temperature must be close to target for this long before M109 returns success
#define TEMP_RESIDENCY_TIME 30 // (seconds)
#define TEMP_HYSTERESIS 2 // (degC) range of +/- temperatures considered "close" to the target one
#define TEMP_WINDOW 1 // (degC) Window around target to start the residency timer x degC early.
// The minimal temperature defines the temperature below which the heater will not be enabled It is used
// to check that the wiring to the thermistor is not broken.
// Otherwise this would lead to the heater being powered on all the time.
#define HEATER_0_MINTEMP 5
#define HEATER_1_MINTEMP 5
#define HEATER_2_MINTEMP 5
#define BED_MINTEMP 5
// When temperature exceeds max temp, your heater will be switched off.
// This feature exists to protect your hotend from overheating accidentally, but *NOT* from thermistor short/failure!
// You should use MINTEMP for thermistor short/failure protection.
#define HEATER_0_MAXTEMP 275
#define HEATER_1_MAXTEMP 275
#define HEATER_2_MAXTEMP 275
#define BED_MAXTEMP 150
```

Figura 108. Códigos Marlin 1. Fuente propia

```

243 #define PIDTEMP
244 #define BANG_MAX 255 // limits current to nozzle while in bang-bang mode; 255=full current
245 #define PID_MAX 255 // limits current to nozzle while PID is active (see PID_FUNCTIONAL_RANGE below); 255=full current
246 #ifndef PIDTEMP
247 // #define PID_DEBUG // Sends debug data to the serial port.
248 // #define PID_OPENLOOP 1 // Puts PID in open loop. M104/M140 sets the output power from 0 to PID_MAX
249 #define PID_FUNCTIONAL_RANGE 10 // If the temperature difference between the target temperature and the actual temperature
250 // is more than PID_FUNCTIONAL_RANGE then the PID will be shut off and the heater will be set to min/max.
251 #define PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX 255 //limit for the integral term
252 #define K1 0.95 //smoothing factor within the PID
253 #define PID_DT ((OVERSAMPLER * 8.0)/(F_CPU / 64.0 / 256.0)) //sampling period of the temperature routine
254
255 // If you are using a pre-configured hotend then you can use one of the value sets by uncommenting it
256 // Lyman Filament Extruder
257 #define DEFAULT_Kp 59.08
258 #define DEFAULT_Ki 2.33
259 #define DEFAULT_Kd 375.12
260
261 // Ultimaker
262 // #define DEFAULT_Kp 22.2
263 // #define DEFAULT_Ki 1.08
264 // #define DEFAULT_Kd 114
265

```

Figura 109. Códigos Marlin 2. Fuente propia

```

#define LYMAN_EXTRUDER
//comment the next line out if there is no filament sensor
#define FILAMENT_SENSOR

#define DEFAULT_EXTRUDER_RPM 7 //define default extruder RPM
#define EXTRUDER_RPM_MAX 25
#define EXTRUDER_RPM_MIN 0.5
#define DEFAULT_PULLER_FEEDRATE 12.0 //default puller feedrate when turned on
#define PULLER_FEEDRATE_MIN 2.0 // min feedrate in manual control, 1 mm/sec min feed - limited by max pulse rate of 50,000
#define PULLER_FEEDRATE_MAX 70.0 // max feedrate in manual control 15mm/sec max feed - limited by max pulse rate of 50,000
// #define PULLER_WHEEL_CIRC 34.56 //circumference of urethane puller wheel in mm.
#define DEFAULT_PULLER_WHEEL_CIRC 37.70 // default circumference of puller wheel in mm.

#define DEFAULT_SENSOR_RUNOUT_MIN 1 // default sensor runout min
#define DEFAULT_SENSOR_RUNOUT_MAX 5 // default sensor runout max

#define DEFAULT_WINDER_RPM_FACTOR 100 //factor for converting winder PW to rpm - reflects rpm of motor at 12v
#define DEFAULT_WINDER_SPEED 0 //default winder speed (0-DEFAULT_WINDER_RPM_FACTOR)

#define DESIRED_FILAMENT_DIA 4.0 //define the default desired Filament diameter
#define PREHEAT_EXTRUDER_TEMP 180 //Set to 185 deg C based on Hugh's suggestion

#define DEFAULT_fwidthKp 22.000 // 0.005 with hall sensor, 35.00 with optical sensor
#define DEFAULT_fwidthKi 0.009 // 0.002 with hall sensor, 0.008 with optical sensor
#define DEFAULT_fwidthKd 0.009 // 0.098 with hall sensor, 0.008 with optical sensor
#define DEFAULT_fFact1 16300

```

Figura 110. Códigos Marlin 3. Fuente propia

Con el código generado y con la correcta funcionalidad de la extrusora se procede a determinar el control PID del sistema de temperatura. Para este paso se utiliza el software Pronterface el cuál es el encargado de determinar las variables Kp, Kd y Ki (Proporcional, derivativa, integradora) de la extrusora de filamento reciclado y para aquello es necesario realizar una conexión manual desde la placa MKS hasta la computadora del usuario. Al conectar y vincular la extrusora con el software se presentan los siguientes datos:

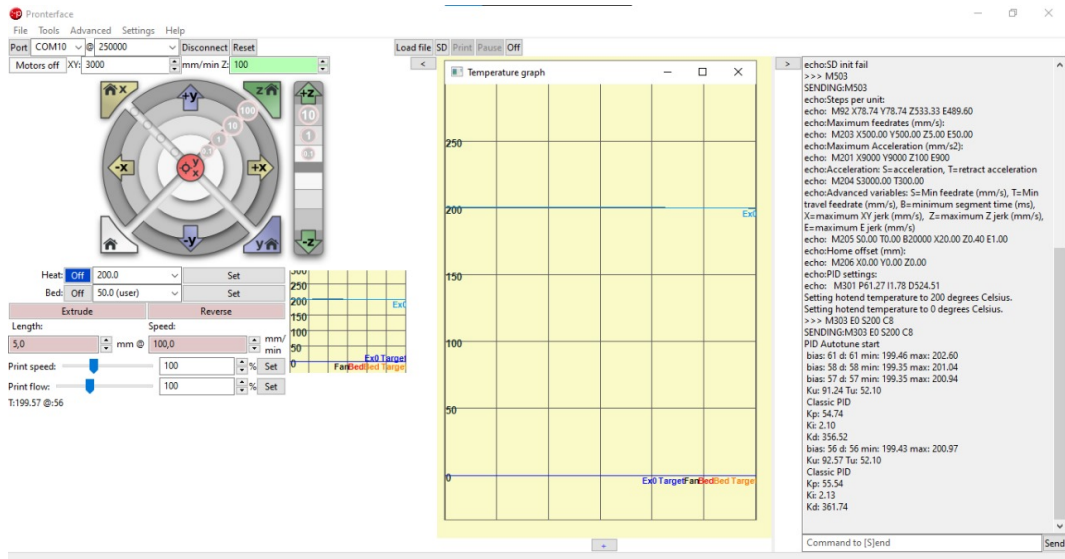


Figura 111. Datos de PID de la extrusora de filamento reciclado. Fuente propia

Se muestra el software con los parámetros requeridos para su funcionalidad y se ejecuta.

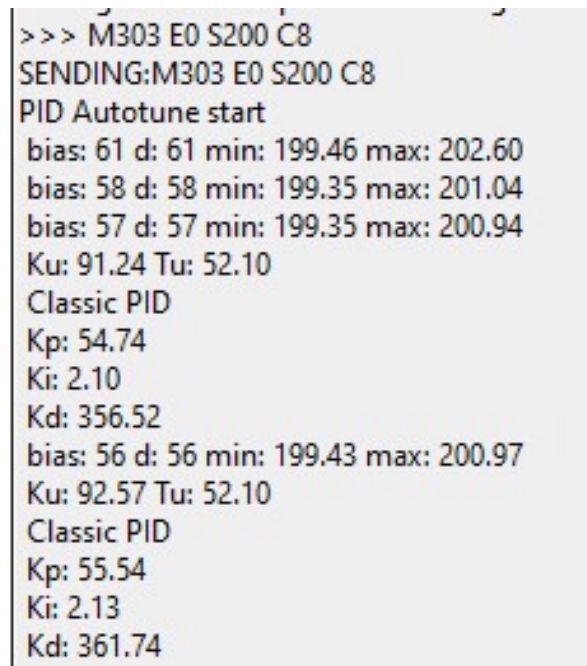
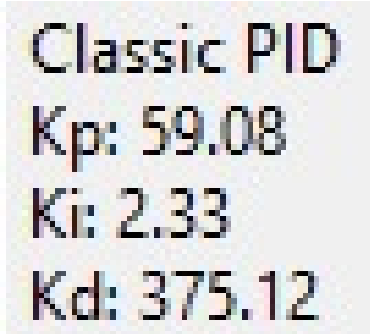


Figura 112. Autotune Start de la extrusora de filamento. Fuente propia

El software con la extrusora operando muestra los valores generales que utiliza para el PID de temperatura por medio del Autotune, el cuál es un proceso automático que realiza en este caso la extrusora para ajustar los parámetros del controlador PID del hotend.



Classic PID  
Kp: 59.08  
Ki: 2.33  
Kd: 375.12

Figura 113. PID de la extrusora de filamento. Fuente propia

El PID específico que utiliza la extrusora de acuerdo a los parámetros establecidos es mostrado. El  $k_p$  indica que tan fuerte responde la extrusora al determinar una diferencia entre la temperatura actual y la deseada;  $K_d$  es la reacción de los cambios rápidos de temperatura en donde ayuda a frenar cuando la temperatura tiende a exceder el límite de temperatura establecido;  $K_i$  corrige los errores acumulados en el tiempo que varía la temperatura, por lo tanto los valores establecidos son los ideales para el hotend sin oscilaciones que afecten el sistema.

## XI. RESULTADOS

El funcionamiento de la extrusora es basado en procesos mecánicos, térmicos y de control que funden el material y formen el filamento de manera uniforme, el proceso que cumple inicialmente es pasar por la alimentación del material introducido en la tolva para este caso se utiliza material reciclado de PLA, en dónde descende por gravedad hasta el tornillo sin fin, el motor nema 23 controlado por driver al accionarlo hace girar al tornillo extrusor y el tornillo se encarga de transportar el material reciclado desde la tolva hasta la cámara calefactora en donde se comprime el material poco a poco por la forma del tornillo generando presión que es fundamental para que el material este fluyendo normal y constantemente al fundirse. La cámara calefactora a lo largo del barril, se encuentran los cartuchos calefactores que son los encargados de elevar la temperatura a las condiciones requeridas para fundir el material y el termistor es el que ayuda a regular el calor, evitando sobrecalentamientos y oscilaciones de temperatura no deseadas. El PLA pasa de estado sólido a estado viscoso para ser moldeado y empujado hacia la boquilla de diámetro de 1.75mm, en el cuál se da la forma de filamento deseada con ayuda del tornillo, de acuerdo al torque y presión proporcionados se extruye el material y garantiza un flujo continuo y uniforme del filamento. Al salir por la boquilla, el filamento aún contiene una contextura blanda por la temperatura y para cambiarlo se utiliza un ventilador axial colocado cerca de la boquilla, este es el sistema de enfriamiento del filamento que permite solidificarlo gradualmente y evita deformaciones. El filamento solidificado es llevado por el sistema de rodillos de tracción que regula el diámetro manteniendolo constante para finalmente ser enrollado por el sistema de bobinado y dejándolo listo para el uso de impresión 3D.

Para operar la extrusora se utiliza la pantalla LCD



Figura 114. Main de la extrusora. Fuente propia.

Con ayuda del encoder rotativo se selecciona la opción preparar y después temperatura de extrusión presionando el encoder, una vez dentro se gira el mismo encoder hasta la temperatura deseada.

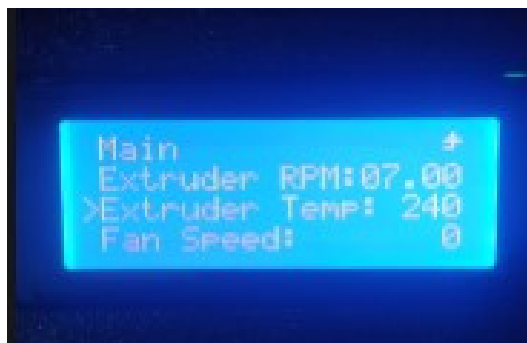


Figura 115. Condiciones de extrusión. Fuente propia.

Se vuelve al main principal en dónde se puede visualizar como poco a poco aumenta la temperatura de la cámara calefactora.

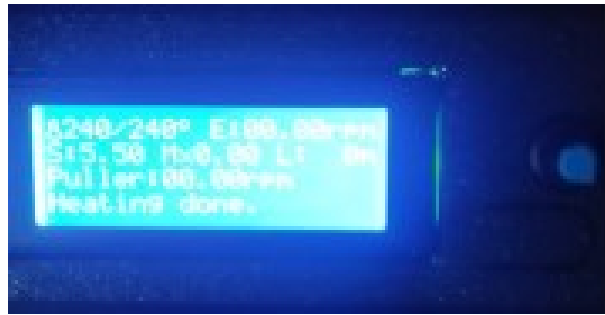


Figura 116. /Main de extrusión. Fuente propia.

Al finalizar y alcanzar la temperatura deseada se puede ingresar el material reciclado en la tolva y se dirige poco a poco a la cámara calefactora para que comience a precalentarse. Al cumplir estos pasos se elige la opción de iniciar extrusión y se acciona todo el sistema, es decir todo el sistema de extrusión, el sistema de enfriamiento y el sistema de bobinado y comienza a extruirse el material.

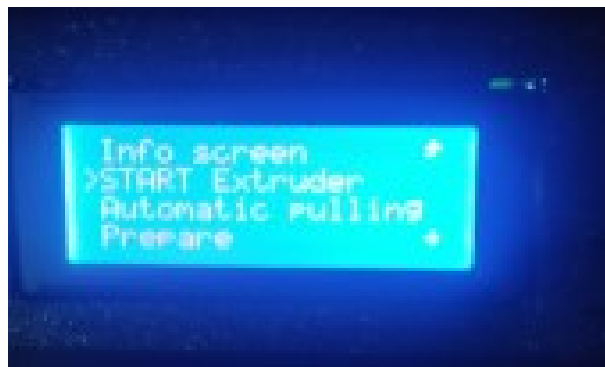


Figura 117. Inicio de la extrusión. Fuente propia.

En las configuraciones se puede cambiar la velocidad del motor nema 23, el cuál es el que dice que tan rápido se desea extruir el material y si en caso de que la temperatura no sea la indicada para la extrusión del filamento también se puede aumentar o disminuir.

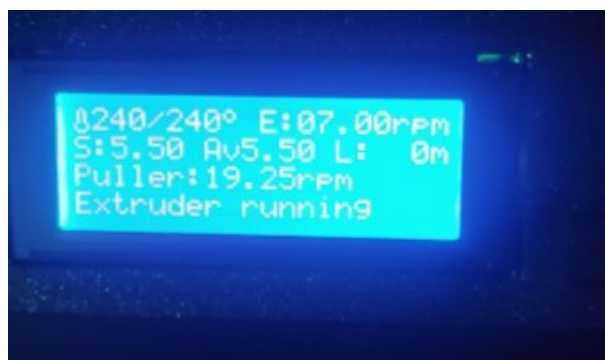


Figura 118. Parámetros de la extrusión iniciada. Fuente propia.



Figura 119. Extrusión de filamento reciclado. Fuente propia.

Para controlar las velocidades del bobinado se realiza en el main de los parámetros de extrusión cuando esta operando la extrusora, solo con mover el encoder rotativo de la pantalla LCD se puede configurar las revoluciones a las que requiere el sistema de bobinado para el rollo de filamento en caso de que se denoten deformaciones o no hay una debida constancia y uniformidad en el rollo, este punto es importante para cuando se manipule la velocidad de extrusión.



Figura 120. Filamento bobinado. Fuente propia.

En este proyecto se desarrolló la validación de los costos ligado al diseño, fabricación y arranque de la extrusora de filamento, con el fin de determinar su viabilidad económica en el negocio de impresión 3D en donde se administra unitariamente con un socio familiar. La empresa cuenta con varias impresoras 3D en operación. La validación de costos es un proceso importante, permite conocer si el desarrollo de la extrusora de filamento representa ser económicamente favorable en cuanto a la compra de filamento comercial. Se consideran los gastos de materiales y

la energía consumida en el proceso de extrusión. Estos valores se compararon con los precios de mercado de los insumos usados en el negocio regularmente como el rollo de filamento de PLA y el de producir el mismo rollo mediante la extrusora desarrollada; el rollo de PLA de 1kg contiene un precio en el mercado de \$35 dólares [79], mientras que producirlo con la extrusora requiere del costo del material reciclado junto al consumo energético, esto se explica mejor en la siguiente tabla:

Parametro	Valor	Notas
Moneda (referencial)	USD	Cambia a tu moneda
Precio pellets/kg	2.2	Pellets PLA/ABS u otro
Precio pigmentos+aditivos/kg	0.2	Pigmentos, desecante, aditivos
Potencia extrusora (kW)	1.5	Consumo promedio trabajando
Producción nominal (kg/h)	1	Ajusta a tu máquina real
Horas operación por semana	30	Horas efectivas
Semanas/año	48	Semanas laborables
Disponibilidad (%)	85	Uptime efectivo
Rendimiento (mermas %)	3	Scrap/mermas de proceso
Costo kWh	0.15	Tarifa eléctrica
Mano de obra por hora	6	Operador(a) por hora
Mantenimiento variable por kg	0.05	Rodamientos, limpieza, etc.
Empaque: costo carrete/spool	1.2	Costo del spool y bolsa
Peso por spool (kg)	1	Spool típico de 1 kg
Transporte y logística por kg	0.1	Envío interno/externo

Figura 121. Costos de la extrusora. Fuente propia.

En la tabla presenta parámetros económicos y técnicos que ayudan a calcular el costo de producción de filamento usando la extrusora desarrollada: El precio de pellets y aditivos establecen un costo, material y pigmentos; la energía que consume (1.5kW promedio operando) junto a su costo eléctrico de 0.15 USD/kWh (por producción son 6 USD/h); la producción nominal basado en la capacidad real de la máquina; la disponibilidad y rendimiento contemplados en un 85 % ; los empaques de carretes contienen un costo de 1.2 USD/spool (rollo de plástico) y 0.1 USD/kg. el peso neto por rollo es de 1kg. Estos valores obtienen un costo de producción por kg de filamento, permitiendo comparar precios del mercado y validar la viabilidad financiera de fabricar rollos de filamento.

La validación de los costos además de respaldar la pertinencia de la extrusora de filamento, ayuda a la optimización de recursos disponibles y a afianzar un modelo productivo más sostenible. Al generar un filamento reciclado, se reduce la dependencia de proveedores externos, lo que disminuye costos operarios y abre la posibilidad de emplear material reciclado, aportando un valor agregado en el ámbito económico como el ambiental.

Equipo	Horas_semana	Consumo_material_g_h	Notas	kg_semana	kg_mes
Bambu Lab (alta)	40	20	Ajusta según tu uso real	0.8	3.464
Artillery 1	35	15	Modelo grande	0.525	2.27325
Artillery 2	35	15	Modelo grande	0.525	2.27325
Artillery 3	30	15	Modelo grande	0.45	1.9485
Artillery 4	30	15	Modelo grande	0.45	1.9485
				TOTAL kg_mes	11.9075

Figura 122. Costos de la extrusora. Fuente propia.

Se aprecia el cálculo del consumo por mes del filamento en las impresoras 3D disponibles en el negocio, dimensionando la producción y validar el ahorro esperado al fabricar filamento propio. La impresora BambuLab

de alta gamma, opera promedio 40 horas a la semana con un consumo de 20 g/h y representa 3.464 kg/mes; mientras que las impresoras Artillery cada una trabajan entre 30 a 35 horas a la semana consumiendo promedio 15 g/h y genere un consumo mensual entre 1948 y 2273 kg mensuales por impresora, con estos datos la suma total generada por operación es de 11.9 kg de filamento constituyendo una demanda interna mínima que cubre la extrusora; tomando en cuenta todos estos datos la producción de filamento con la extrusora crea un costo de 7.65 dólares/kg únicamente reciclando material. El filamento propio producido reduce el costo por kilogramos en comparación a la compra en el mercado, asegurando disponibilidad constante del material para las impresoras del taller, convirtiéndolo en una inversión estratégica para optimizar los costos de operación.

## XII. CONCLUSIONES

El uso de una máquina extrusora de filamento demuestra una solución sostenible y eficiente en la producción de elaboración de materias primas dirigidas a la impresión 3D, permitiendo la optimización de recursos y costos que fomenten la experimentación de la economía circular. En este proyecto se consideró aspectos de control, mecánico y eléctricos, al igual que criterios ergonómicos y de seguridad, con la finalidad de tener una función estable, segura y de mucho rendimiento. El diseño contiene elementos claves como el motor nema 23 con su driver, los cartuchos calefactores, rodamientos, el tornillo si fin, soportes que se consideraron para resistencias y durabilidad para el desarrollo de extrusión de PLA. En la perspectiva ambiental, la extrusora posibilita el reuso de plásticos, el cuál contribuyen a la reducción de residuos y la reutilización de los mismo resultando en un proceso relevante. En resumen la extrusora de filamento cumple con los objetivos propuestos en dónde demuestra que el desarrollo de un dispositivo de escritorio reciclador, utilizando componentes accesibles y un proceso de fabricación simple, dando apertura para investigaciones futuras enfocadas a la optimización de la calidad del filamento y la incorporación de sistemas de control, explorar materiales reciclados nuevo y la ampliación de las capacidades de producción, aportando al progreso de la impresión 3D. Se demuestra que la extrusora de filamento reciclado es técnicamente viable y económicamente justificable.

### XIII. RECOMENDACIONES

La extrusora de filamento es una máquina que transforma el material plástico en un insumo reusable para impresión 3D, es posible la optimización de su rendimiento, durabilidad y eficiencia y para eso recomendablemente se puede implementar un sistema de control de temperatura más preciso con sensores mas sensibles y controladores PID mas seguros en la regulación estable y uniforme del calor en la cámara extrusora, con el fin de evitar fluctuaciones que afecten la calidad del filamento, además de mejorar el diseño del tornillo extrusor en las zonas de compresión diferenciadas, permitiendo un mezclado y homogeneizado eficaz en el material, generando reducción de burbujas e imperfecciones del filamento. Otra recomendación es colocar antiadherentes en el tubo extrusor para evitar el desgastes al igual que del tornillo extrusor. El motor y la transmisión para su mejor se puede incorporar motores paso a paso con mayor torque y sistemas de reducción que reduzcan el esfuerzo de los componentes mecánicos y el uso de un driver más actualizado que contribuya a un control más preciso en la velocidad de extrusión. Las recomendaciones identificadas presentan futuras mejoras y desarrollos tecnológicos que permiten posicionar a la extrusora de filamento como una herramienta segura, confiable y eficiente en la manufactura aditiva aportando a la economía circular.

#### XIV. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de las actividades a realizar:

Tabla I  
CRONOGRAMA

Cronograma						
Actividad	Actividad específica	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Redacción inicial del documento	Título	X				
	Objetivo general y específicos	X				
	Problemática y justificación	X				
	Marco teórico y metodológico	X				
	Cronograma y presupuesto	X				
	Referencia	X				
Diseño	Diseño de maqueta en software 3D		X	X		
	Elección de componentes para el prototipo		X	X		
	Diseño del prototipo en físico		X	X		
	Integración de los componentes en la prototipo		X	X		
	Pruebas de funcionamiento		X	X		
Desarrollo de software	Desarrollo de programación				X	X
	Implementación de firmware				X	X
	Implementación de automatización de autoajustado				X	X
Pruebas e implementación	Pruebas de funcionamiento del software				X	X
	Validación de correcto uso del software				X	X
	Aplicación de funcionamiento del prototipo				X	X

## XV. PRESUPUESTO

A continuación se muestra el presupuesto de los materiales usados:

Tabla II  
PRESUPUESTO

Cantidad	Nombre	Datos	Precio
197	Pernos	Pernos para la extrusora	\$23.76
2	Arandelas	M5, M6	\$1.56
6	Tapa protectora	30x30mm	\$3
1	Correa de distribución	GT2, 6 mm x 500 mm	\$3.5
8	Conector para perfil de aluminio	90°, ranura 8	\$8
4	Planeadores de feltro	22x5mm	\$2
1	Cable para brazo sensor	0,6 x 170 mm, V2A, liso	\$5
24	Rodamientos de bolas	4x12x4 C3	\$29.6
10	Bridas para cables	95mm	\$1
2	Abrazadera de manguera	Abrazadera de manguera	\$2.08
1	Rueda/polea de correa de distribución	GT2, 6 mm, 20 dientes, diámetro de 5 mm	\$3
1	Husillo de rosca trapezoidal	T8x8, THSL-8D, 180 mm de largo	\$10
1	Rueda de alimentación del extrusor	12 mm, 38 dientes	\$16
2	Extractores de resortes de compresión	6x0,5x35mm	\$1
1	Basculante con resorte de tensión	3x0,2x20mm	\$0.5
1	Tubo de PTFE	6x4x750mm	\$4.5
1	Tuerca de latón con resorte anti-retroceso	T8x8, Tuerca de latón con resorte anti-retroceso	\$2.36
2	Rejillas de ventilador y ventiladores	Alambre, 50x50, 60x60	\$15.27
1	Motor paso a paso	Nema23, 15:1, casquillo 4x 0.5	\$96
1	Controlador de motor paso a paso	Leadshine DM332T, 3 amperios	\$4.95
1	Tubo extrusor	16x2x160 (12,15 interior)	\$12
2	Tomillos extrusores	Pieza cnc D12.0h9 x 215 mm	\$45
5	Piezas cnc	Pieza cnc 20x20x100	\$42.9
1	Perfil de aluminio	500, 400, 300, 200, 100mm	\$44
1	Boquillas extrusoras	Boquillas para la extrusora	\$11.64
1	Filtro de fusión	16x100mm, Malla 50 (0,3mm)	\$6
2	Cinta de teflón	250 mm	\$0.75
2	Cartucho calefactor	Cable de 6x20mm 40W/24V, 410mm	\$3
1	Termistor	3x15 mm, NTC 100K, 70ctvs	\$2
4	Cables	1,0 mm² rojo, 110 mm, 2 casquillos 1,0	\$3
1	Línea de control	CL100 2X1.0-100, 2x 1.0mm², 800mm	\$1.5
4	Abrazadera	Wago 221-413 3 pines	\$8
1	Placa MKS Gen L V1	MKS GEN L V1.0	\$15
2	Controlador de motor paso a paso	Tmc 2208	\$5.25
1	Pantalla LCD con 2 cables planos	Controlador de pantalla inteligente 2004 + cable	\$7
1	Final de cámara óptico con cable	Reprap, 3 pines. 3.5 dolares	\$3.5
1	Adaptador de corriente (no incluido)	24Vdc, 6A, 144W, diseño cerrado	\$20
13	Herramientas	6x7mm	\$24.75
TOTAL			\$479.06

## REFERENCIAS

- [1] A. T. Maria Guadalupe Jesus Ruben, «Caracterización fisicoquímica de biopelículas de celulosa bacteriana recubiertas con ácido poliláctico,» 2023.
- [2] H. B. Ariel Riofrio Mauricio Cornejo, «Life cycle and environmental impact evaluation of polylactic acid (PLA) production in Ecuador,» *Springer Science and Business Media LLC*, 2022.
- [3] L. Lázaro Hernández, «Estudio técnico de estrategias de gestión de plástico biodegradable de ácido poliláctico (PLA) en entornos costeros,» *Unidad politécnica de Madrid*, 2024.
- [4] J. G. Erick Durazno Gabriel Salcido, «Impresión 3D - Impacto en la Industria Automotriz,» *Publicaciones en ciencias y tecnologías*, 2020.
- [5] R. C. M. y María Antonieta Riera, «Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones,» *Unidad politécnica de Madrid*, 2022.
- [6] D. Restrepo, «Fundamentación teórica de la recuperación de residuos de (PLA), generados en impresión 3D,» *Universidad Tecnológica de Pereira*, 2022.
- [7] J. S. M. V. ISABELLA HERRARTE LOPEZ, «PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D A PARTIR DEL RECICLADO DE BOTELLAS PET,» *Universidad Autónoma de Occidente*, 2024.
- [8] I. M. Moreno Claudio, «Implementación del área de mantenimiento para el cumplimiento de la producción de la empresa Factory 3d him S.A.C,» *UAP*, 2022.
- [9] M. J. P. Reyes, «Caracterización química, física y mecánica de materiales compuestos con matriz de ácido poliláctico y refuerzo particulado de cáscaras de marañón elaborados a través de la técnica de moldeo por deposición fundida,» *Universidad de Córdoba*, 2022.
- [10] G. P. Nikolaos Lambos George-Christopher Vosniakos, «Low-cost automatic identification of nozzle clogging in material extrusion 3D printers,» *Procedia Manufacturing*, 2021.
- [11] C. P. Díaz Martín, «Estudio de la influencia de los parámetros de impresión 3D FDM (modelo por deposición fundida) en las propiedades del PLA (ácido poliláctico),» *Universidad de la Laguna*, 2022.
- [12] G. A. B. F. Agustín Guzman Cortez Mirna Cuarzo Itzcua, «Diseño y construcción de una extrusora para la obtención de filamento PLA reciclado,» *Universidad Tecnológica de Puebla (UTP)*, 2022.
- [13] C. R. Nelly Bernal, «Transformación de Residuos en Recursos: Filamentos Reciclados de PET y su contribución a una economía circular,» 2023.
- [14] F. D. Ayala, «Caracterización de filamento de PLA reciclado para impresión 3D,» *Universidad de la Laguna*, 2021.
- [15] C. D. Encinoso, «FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PLA RECICLADO,» *Universidad de la Laguna*, 2020.
- [16] J. Hernández, «Implementación de economía circular en la industria de impresión 3D mediante el reciclaje de plástico de un solo uso,» *Servicio Nacional de Aprendizaje*, 2021.
- [17] C. Contreras, «Reutilización y modificación de bolsas biodegradables de PLA para aplicaciones avanzadas en manufactura,» *Universidad de Concepción*, 2025.
- [18] C. Veillón López, «DISEÑO PROTOTIPO DE MÁQUINA RECICLADORA DE RESIDUOS DE IMPRESORA 3D PARA PLÁSTICOS PLA Y ABS,» *Universidad de Tarapacá*, 2020.
- [19] R. T. Oliveros, «Optimización de las propiedades de tenacidad e impacto de formulaciones de ácido poliláctico (PLA), mediante mezclas con polímeros flexibles y optimización de los sistemas de compatibilización,» *Universidad Politécnica de Valencia*, 2023.
- [20] M. P. Giovanni Flechas, «Propuesta de mejora para mitigar desperdicios en el proceso productivo de la empresa Inyectoplast de Colombia S.A.S,» *Uniagustiana*, 2020.
- [21] E. Moreno, «Viabilidad técnica y económica del reciclado mecánico de poli(ácido láctico) (PLA) para impresión 3D,» *Universidad Politécnica de Madrid*, 2020.
- [22] G. B. Agustín Guzmán Mirna Cuatzo, «Diseño y construcción de una extrusora para la obtención de filamento PLA reciclado,» *Congreso Nacional de Investigación Interinstitucional*, 2022.

- [23] J. Toro, «DESARROLLO DE UN BRAZO ROBOTICO DE TIPO SCARA CON ESTRUCTURA DE FIBRA DE CARBONO Y SISTEMA DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA,» *Universidad Politécnica Salesiana*, 2023.
- [24] J. J. M. Avila, «Diseño de elementos mecánicos para extrusora de polímeros para producción de filamento para impresión 3D,» *Universidad del Valle de Guatemala*, 2021.
- [25] D. Toral, «DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONITOREO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO CON CÁMARA REGULADORA DE HUMEDAD USANDO LABVIEW,» *Universidad Politécnica Salesiana*, 2022.
- [26] F. Delgado Ayala, «Caracterización de filamento de PLA reciclado para impresión 3D,» *Universidad de la laguna*, 2021.
- [27] D. N. Segura Alarcón, «Diseño y fabricación de una máquina inyectora de plástico con compresión neumática para reciclaje de PLA,» *Universidad de Concepción*, 2024.
- [28] A. N. Shruti Agrawal Saurabh Singh, *A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer*. Springer, 2023.
- [29] M. Quintana Arévalo, «Reciclado de filamento para impresión 3D,» *Universitat Politécnica de Catalunya Barcelonatech*, 2020.
- [30] clickprinting, «Impresión 3D,» *clickprinting*, 2025.
- [31] J. K. Brenda Croom Andrew Abbott, «Mechanics of nozzle clogging during direct ink writing of fiber-reinforced composites,» *Additive Manufacturing*, 2021.
- [32] M. Tronics, «Filamento de PLA,» *Movil tronics*, 2025.
- [33] SolidWorks, «Software CAD SolidWorks,» *Dassault Systèmes*, 2025.
- [34] Bambulab, «BambuStudio,» *Bambulab*, 2020.
- [35] Impresoras3D.com, «Bambulab,» *Impresoras3D.com*, 2025.
- [36] prusa3d, «Pronterface,» *prusa3d*, 2022.
- [37] Hupasl, «Tolva,» *Hupasl*, 2020.
- [38] Safi, «Tolva,» *Safi*, 2025.
- [39] researchgate, «Tornillo extrusor,» *researchgate*, 2025.
- [40] G. U. Oscar Shingón, «Construcción de una máquina extrusora para plástico,» *Universidad Técnica de Cotopaxi*, 2020.
- [41] Diversiatec, «Husillos,» *Diversiatec*, 2020.
- [42] Made-in-China, «Tornillo extrusor,» *Made-in-China*, 2025.
- [43] Novatronic, «Boquilla de 1.75mm,» *Novatronic*, 2020.
- [44] Impresora3D.com, «Boquilla extrusora,» *Impresora3D.com*, 2025.
- [45] D. T. Helde Solórzano, «Cámara extrusora,» *Universidad Politécnica Salesiana*, 2022.
- [46] Ingemeccánicas, «Camara de extrusión,» *Ingemeccánicas*, 2025.
- [47] naylampmechatronics, «Pantalla LCD 2004,» *naylampmechatronics*, 2022.
- [48] Hardwarelibre, «Pantalla LCD,» *Hardwarelibre*, 2025.
- [49] 3Dtronic, «Cartucho calefactor,» *3Dtronic*, 2025.
- [50] Megatronic, «Fuente de alimentación,» *Megatronic*, 2025.
- [51] fansandblowers, «Ventilador axial 24V,» *fansandblowers*, 2022.
- [52] T. Radlab, «Ventilador Axial,» *Tienda Radlab*, 2025.
- [53] moviltronics, «Placa MKS,» *moviltronics*, 2022.
- [54] Moviltronics, «Placa MKS,» *Moviltronics*, 2025.
- [55] hetpro-store, «Termistor NTC 100k,» *hetpro-store*, 2022.
- [56] novatronic, «Termistor,» *novatronic*, 2025.
- [57] taloselectronics, «Motor nema 23,» *taloselectronics*, 2022.
- [58] cncrepowering, «Motor paso a paso Nema 23,» *cncrepowering*, 2025.
- [59] Hardwarelibre, «motor nema 17,» *Hardwarelibre*, 2025.
- [60] mytectutor, «Driver motor nema 23,» *mytectutor*, 2022.
- [61] novatronic, «Driver de motor paso a paso,» *novatronic*, 2025.
- [62] naylampmechatronics, «Driver motor nema 17,» *naylampmechatronics*, 2022.

- [63] cnc.pe, «Driver A4988 para motor paso a paso,» *cnc.pe*, 2020.
- [64] nsk, «Rodamientos,» *nsk*, 2022.
- [65] C. del rulimán, «Rodamientos,» *casa del rulimán*, 2025.
- [66] J. M. Cruz Rosero Willian Alejandro, «Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos a partir de los residuos plásticos de impresiones 3D para el Grupo de Investigación GIDETER-ESPOCH,» *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO*, 2022.
- [67] E. Moreno Escribano, «Viabilidad técnica y económica del reciclado mecánico de poli(ácido láctico) (PLA) para impresión 3D,» *Universidad Politécnica de Madrid*, 2020.
- [68] D. L. V. R. N. A. P. FREIRE, «Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D,» *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL*, 2022.
- [69] C. A. M. U. S. del Valle Tirado<sup>2</sup> David Volkmar Vélez<sup>3</sup> Luis Frey Zapata Henao<sup>3</sup>, *Fabricación de filamentos de impresión 3D con ácido poliláctico comercial y reciclado rellenos con residuos de café*, 2023.
- [70] L. B. Y. González, «Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamento para impresora 3D en la Universidad Valle del Momboy,» *Universidad Valle del Momboy*, 2024.
- [71] A. F. M. S. J. D. M. Martínez, «Diseño y simulación de una máquina extrusora para la reutilización de material PET en forma de filamento para impresora 3D,» *Universidad Piloto de Colombia*, 2023.
- [72] L. T. W. Fabian, «Diseño y construcción de una máquina para crear filamento para impresora 3D a partir del material reciclado,» *Universidad Técnica de Cotopaxi*, 2024.
- [73] U. S. F. Alexander, «Evaluación de alternativas de fabricación de filamento reciclado para impresión 3D en el laboratorio de Prototipismo UCAB - Guayana,» *UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO*, 2024.
- [74] B. I. A. Hernández, «Diseño de una máquina de materiales termoconformados para la fabricación de filamento ABS y PLA para impresora 3D,» *Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*, 2020.
- [75] E. S. B. G. J. A. F. LATORRE, «Desarrollo de un prototipo de máquina trituradora de plástico reciclado y extrusora de filamentos para impresoras 3D,» *Universidad Mariana*, 2024.
- [76] L. G. Andrés Herrera, «Influencia del aceite de linaza maleinizado (MLO) en la reología del polímero ácido poliláctico (PLA) para aplicaciones de impresión 3D,» *Universidad Politécnica Salesiana*, 2020.
- [77] R. G. Alejandro Meza Eriberto García, «Diseño y construcción de extrusora de PET reciclado,» *Conciencia Tecnológica*, 2022.
- [78] TinyBee, «Dataset MKS,» *TinyBee*, 2025.
- [79] electrostore, «Costo de rollo de PLA,» *electrostore*, 2022.

## XVI. ANEXOS



Figura 123. Anexo 1. Fuente propia



Figura 124. Anexo 2. Fuente propia

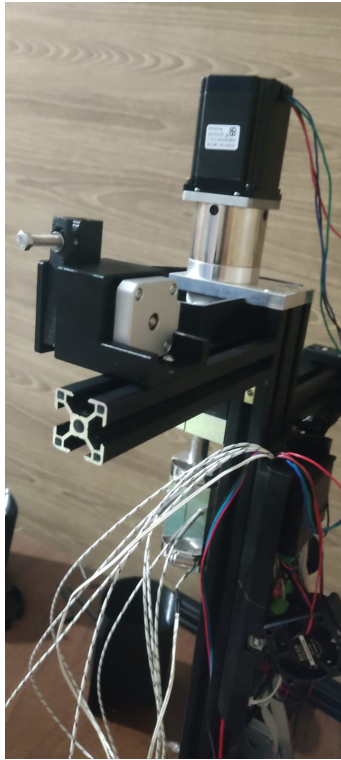


Figura 125. Anexo 3. Fuente propia



Figura 126. Anexo 4. Fuente propia

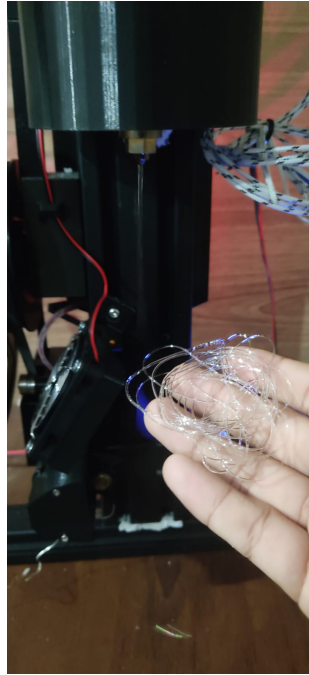


Figura 127. Anexo 5. Fuente propia



Figura 128. Anexo 6. Fuente propia



Figura 129. Anexo 7. Fuente propia



Figura 130. Anexo 8. Fuente propia