

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y construcción de una extrusora de ceras
parafinas para uso en impresoras 3D**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Sang Woo Shin Ji
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Diseño y construcción de una extrusora de ceras
parafinas para uso en impresoras 3D**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Sang Woo Shin Ji
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

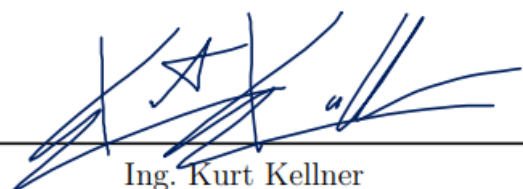
Guatemala,

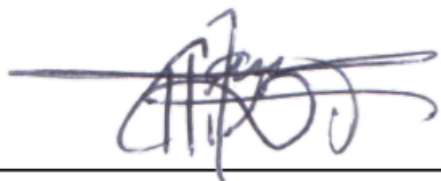
2020


Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
MSc. Carlos Juárez

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

Fecha de aprobación: Guatemala, 2 de octubre de 2020.

Agradecimientos

Dedico esta sección a mis padres por haberme apoyado no solo en este proyecto, pero en toda mi vida estudiantil. Siempre han sido mi inspiración y cada día me motivan a seguir adelante sin importar las dificultades. A mi hermana por creer en mis habilidades y por ser una fuente constante de sonrisas y felicidad. Agradezco a todos mis amigos, dentro y fuera de la Universidad por todos los momentos que hemos tenido juntos.

A todos mis profesores de la carrera que han trabajado duro, especialmente durante la pandemia, para continuar dando la mejor educación para los estudiantes. Finalmente, dedico esto a mi asesor por confiar en mí y hacer posible este trabajo de graduación.

Agradecimientos	III
Lista de figuras	VI
Lista de cuadros	IX
Resumen	X
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. Justificación	3
4. Marco teórico	4
4.1. Manufactura aditiva	4
4.2. Tecnologías de impresión 3D	4
4.3. Firmware y microcontroladores	7
4.4. Slicer	8
4.5. Motor stepper	9
4.6. Extrusoras	10
4.7. Cera parafina	12
5. Antecedentes	15
6. Alcance	17
7. Características de la impresora	18
8. Diseño y construcción de la extrusora	20
8.1. Prototipos	21
8.1.1. Placa base	21
8.1.2. Cilindro de presión	22
8.1.3. Tornillo	23
8.1.4. Diámetro de la boquilla	23
8.2. Diseño final	24

9. Modificación del firmware	27
10. Calibración	29
11. Manual de uso	34
12. Evaluación de resultados	35
13. Conclusiones	42
14. Recomendaciones	43
15. Bibliografía	44
Anexos	46
A. Planos	46
B. Manual de uso	55
B.1. Configuración de material	55
B.2. Parámetro de impresión	56
B.3. Configuración en la impresora	57
B.4. Preparación de la impresora	58
B.5. Calibraciones adicionales	59
C. Construcción de la extrusora	60
D. Impresiones realizadas	67

Lista de figuras

1.	Proceso SLA[33]	5
2.	Proceso DLP[22]	5
3.	Proceso FDM[21]	6
4.	Comparación de diseños para impresoras FDM [21]	6
5.	Movimiento CoreXY [29]	7
6.	Motor Stepper Creality 42-40 [2]	9
7.	Estator de dos fases de un motor stepper [8]	10
8.	El cold-end y el hot-end en una extrusora tipo Bowden [28]	11
9.	Diseño Bowden(izquierda) y Direct Drive(derecha) [28]	11
10.	(a) Filamento, (b) Jeringa, (c) Tornillo [24]	12
11.	Ejemplo de una extrusora por tornillo [24]	12
12.	Gráfica de la viscosidad y densidad a diferentes temperaturas [9]	13
13.	Granos de cera parafina marca SASOL	14
14.	Impresión 3D en hielo en la Universidad McGill [10]	15
15.	Impresora de chocolate creado por Hershey [13]	15
16.	Proceso de moldeado a la cera perdida [11]	16
17.	Creality Ender 3 Pro [3]	18
18.	Grano de cera parafina SASOL	21
19.	Prototipo inicial de la placa base de la extrusora	21
20.	Diseño final de la placa base de la extrusora	22
21.	Diseño inicial para introducir la cera	22
22.	Iteraciones de diseños para el tornillo	23
23.	Boquillas de latón de diferentes diámetros internos	23
24.	Impresora con la extrusora instalada	25
25.	Ensamblaje de la extrusora	25
26.	Construcción física de la extrusora	26
27.	Placa del controlador de 32 bits	27
28.	Firmware en Visual Code Studio	28
29.	Impresora con Marlin instalado	28
30.	Extrusión de parafina a 55°C	30
31.	Extrusión de parafina a 75°C	30
32.	Impresión de un cilindro a 75°C	31

33.	Impresión de un cilindro grande a 80°C	31
34.	Impresión de un Benchy a 80°C	31
35.	Impresiones de Benchy de mayor a menor temperatura (85°C a 65°C)	32
36.	Logo de la UVG en cera parafina	32
37.	Impresiones de cera parafina	35
38.	Impresión de un Benchy a 75°C	36
39.	Impresión inferior de un Benchy a 75°C	36
40.	Impresión inferior de un Benchy a 65°C	37
41.	Impresión de un Benchy a 65°C	37
42.	Impresiones con detalles a diferentes temperaturas	37
43.	Proceso de Impresión con exceso eliminado	38
44.	Exceso de cera durante una impresión	39
45.	Un cohete de cera(40 % infill)	39
46.	Un pequeño florero de cera(0 % infill)	40
47.	Hexágono angulado(0 % infill)	40
48.	Prueba de ángulos de impresión de 30°a 80°	41
49.	Impresión de un florero en forma de dos pescados	41
50.	Plano del ensamblaje	47
51.	Plano de la placa base	48
52.	Plano de la entrada de los granos	49
53.	Plano del bloque para el motor	50
54.	Plano del tornillo	51
55.	Plano del bloque de presión	52
56.	Plano de la extensión de la alimentación de los granos de cera	53
57.	Plano del soporte para el Hot-end y el bloque de presión	54
58.	Configuraciones de materiales en Cura	55
59.	Configuración de parámetros de impresión para Cura	56
60.	Prevista del movimiento que tendrá la impresora	57
61.	Configuraciones avanzadas en la impresora	57
62.	El tornillo de la extrusora con granos de cera parafina	58
63.	Desarmar toda la extrusora, los ventiladores y el hot-end	60
64.	Separar el disipador de calor del bloque de aluminio	61
65.	Todas las piezas impresas	61
66.	Unir la placa base con la entrada de los granos	62
67.	Montar la placa a la impresora	62
68.	Usar los tornillos del bloque de aluminio para unirlos al bloque de presión	63
69.	Colocar el soporte del hot-end	63
70.	Usar los tornillos M3x30 para asegurarlo a la impresora	64
71.	Se coloca el motor stepper con tornillos M3x8	64
72.	Se agrega el tornillo al eje del motor	65
73.	Colocar el bloque del motor a la parte superior de la placa	66
74.	Regresar los ventiladores a su posición original	66
75.	Benchy a 70°C	67
76.	Benchy V2	68
77.	Benchy V3	68
78.	Benchy V4	68
79.	Cilindro con superficie hexagonal	69
80.	Impresión de detalles	69
81.	Pulpo impreso	70
82.	Pulpo con exceso	70

83.	Proceso de impresión del cohete	71
84.	Florero de cera vacío	71
85.	Logo UVG en cera	72
86.	Logo UVG en cera B	72
87.	Objeto de cera con puente	72
88.	Objeto de cera con puente B	73
89.	Florero de pesados	73
90.	Vela de cohete	73
91.	Cohete encendido	74
92.	Cráneo de cera A	74
93.	Cráneo de cera B	74
94.	Cráneo de cera C	75
95.	Cráneo de cera encendido	75
96.	Florero de cera vacío	75
97.	Conjunto de impresiones de cera creadas	76
98.	Conjunto de impresiones de cera encendidos	76

Lista de cuadros

1.	Especificaciones técnicas del Ender 3 Pro [3]	19
2.	Especificaciones del Stepper Creality 42-40 [2]	19
3.	Configuración de Cura para PETG	20
4.	Listado de partes completo	24
5.	Cuadro comparativo entre PLA,ABS, PETG y la cera parafina [1][5][6][7]	29
6.	Configuración de Cura para la cera parafina	33

La cera parafina es un material que continúa utilizando procesos de manufactura tradicionales, pero el crecimiento de la manufactura aditiva abre las puertas a nuevas oportunidades. El presente trabajo contiene el desarrollo de una extrusora para ceras parafinas que permite usar este material en impresoras 3D.

Una de las formas más comunes que se puede obtener la cera parafina es en forma de granos. Por esta razón se diseñó una extrusora de tornillo que transfiere los granos y genera la presión necesaria para que la cera fluya por la boquilla. Se utilizó el sistema mecánico y electrónico de la impresora Ender 3 Pro y se modificó con nuevas partes impresas en el termoplástico PETG(Tereftalato de polietileno glicol). Se modificó el firmware para adaptar las configuraciones a este nuevo método de extrusión.

Los resultados fueron exitosos con impresiones de buena calidad. Se lograron generar estructuras que no serían posibles con las técnicas tradicionales. La cera parafina tiene sus propias limitaciones a comparación de materiales como el PLA debido a que la parafina es más frágil y se maneja en su forma líquida. También tiene problemas al extruir piezas verticales muy pequeñas. Este proyecto muestra resultados muy prometedores y aún existe un gran espacio para continuar mejorando el diseño de la extrusora y la calidad de la impresiones. Se formó un listado de partes con los planos de todas las piezas diseñadas en CAD para facilitar la reproducción del trabajo o hacer mejoras en el futuro. También se incluyó un manual de uso en para que cualquier individuo logre utilizar la impresora correctamente.

CAPÍTULO 1

Introducción

En las últimas décadas, la manufactura aditiva se ha desarrollado a una industria con grandes oportunidades de innovación. Desde termoplásticos hasta metales, la lista de materiales en la manufactura aditiva continúa creciendo. Empresas y universidades alrededor del mundo continúan investigando nuevas formas de aplicar esta tecnología como impresoras 3D de hielo, chocolate, cemento, etc.

La cera parafina es un material que aún no se ha adaptado a esta tecnología con técnicas simples que se han usado por cientos de años. Por esta razón, este trabajo tuvo como objetivo lograr modificar una impresora 3D para extruir cera parafina y crear objetos de este material. Se buscó investigar la viabilidad de la cera parafina como material de impresión y la calidad de los resultados. Para este fin, el desarrollo del proyecto requirió el diseño de las partes para la extrusora, la construcción de la impresora, la modificación del firmware y la calibración de los parámetros de impresión.

El diseño inicial de la extrusora tenía como meta transferir el material a la boquilla de forma efectiva. Debido a que el comportamiento de la cera parafina en este tipo de aplicación aún era desconocida, se requirió realizar varias modificaciones en el diseño antes y durante la fase de calibración. Luego de la edición e instalación del firmware, se efectuaron pruebas para determinar los parámetros que permitirían un flujo de material controlado. Debido a la cantidad de parámetros influyentes, se llevo acabo un gran rango de pruebas con el propósito de encontrar la combinación que obtuviera los mejores resultados. Primero se buscó lograr crear una buena primera capa, luego imprimir sobre esta capa y por último crear un cilindro completo. Para la última etapa se corrieron varios experimentos para determinar los límites que tiene la cera parafina en la impresión 3D como los ángulos de impresión, arcos y "vase mode".

2.1. Objetivo general

Diseñar un método de extrusión de cera parafina para ser utilizados en impresoras 3D.

2.2. Objetivos específicos

- Hacer un cuadro comparativo entre la cera parafina y los materiales comunes en la impresión 3D (PLA, ABS, PETG).
- Diseñar la extrusora en un software de diseño asistido por computadora.
- Crear un listado de partes para la construcción de la extrusora de parafina.
- Construir la extrusora y utilizar un firmware modificado para controlarla con un código G estándar.
- Escribir un manual/videos de las configuraciones y calibraciones necesarias para poder imprimir con la extrusora de parafina.

La tecnología de manufactura aditiva no solo ha revolucionado las industrias científicas, pero también se ha vuelto popular en distintos mercados. La gran mayoría de las impresiones 3D utilizan materiales como polímeros termoplásticos, resinas y metales, pero también se han desarrollado impresoras que logran imprimir con hielo, cerámicos e incluso cemento. Esto ha ayudado a expandir las posibilidades para enfrentar diferentes problemas.

Las técnicas de impresión 3D han hecho avances drásticos, especialmente en sus sistemas mecánicos y métodos de control. Por lo que la próxima frontera es crecer la diversidad de materiales disponibles. La Universidad McGill y la Universidad Tecnológica de Tokyo han logrado construido impresoras 3D que funcionan con hielo que son utilizados para crear esculturas de hielo imposibles de crear a mano [10]. También varias empresas alrededor del mundo han comenzado a construir hogares de bajo costo y alta eficiencia utilizando impresoras 3D de cemento.

El propósito de este proyecto fue innovar nuevas formas de utilizar las tecnologías de manufactura aditiva. La cera no es un material común en las impresoras 3D y solamente son utilizadas para el proceso de crear moldes para joyería que continúa siendo un tipo de manufactura sustractiva. Se desea crear una impresora capaz de funcionar utilizando ceras en forma de granos para la construcción de velas. Esto significa que se desea usar materias primas con diferentes colores o fragancias. La manufactura de velas se ha mantenido utilizando procesos simples y tradicionales como moldes. La impresión 3D podría abrir las puertas a una mayor creatividad en esta industria.

4.1. Manufactura aditiva

Con los avances en el diseño digital CAD(Computer Aided Design), la manufactura aditiva se ha desarrollado como una alternativa a los procesos de remoción de material. Los diseños son construidos a través de la inyección de material en un plano 2D en capas sucesivas creando un objeto tridimensional. Se han desarrollado varias técnicas para este proceso donde las capas son generadas utilizando materiales en diferentes formas como filamentos, polvos de metal o resinas líquidas. Aunque es común confundir la manufactura aditiva con la impresión 3D, la manufactura aditiva es el termino general para describir todas las tecnologías que construyen objetos por capas. Uno de los primeros usos para esta tecnología fue para construir prototipos rápidos, pero con los avances en la tecnología, ha comenzado a ser utilizado para fabricar productos finales [27].

Existen muchos beneficios de esta tecnología que han mejorado la forma en la que se crean partes. Como se mencionó anteriormente, esta tecnología permite crear prototipos de forma rápida y a un menor costo. También se logran crear partes mucho más complejas y livianas sin la necesidad de más herramientas, moldes o múltiples pasos. Estas figuras complejas también se logran formar como una sola pieza sin tener que soldar o unir partes lo que incrementan su costo y reducen su durabilidad. Todas estas ventajas junto a la alta calidad que pueden tener las piezas, se ha vuelto una muy buena alternativa para producciones de bajo volumen [19].

4.2. Tecnologías de impresión 3D

Se han desarrollado varias técnicas y métodos de manufactura aditiva que tienen sus propias ventajas, desventajas y usos. SLA o estereolitografía es un proceso en donde se tiene un tanque de resina que se cura al ser expuesto a un láser ultravioleta. El láser se encuentra debajo del tanque y el material se solidifica en una superficie móvil que se eleva el grosor de una capa en cada ciclo. Este fue la primera tecnología de manufactura aditiva con la habilidad de crear piezas con altas tolerancias [33].

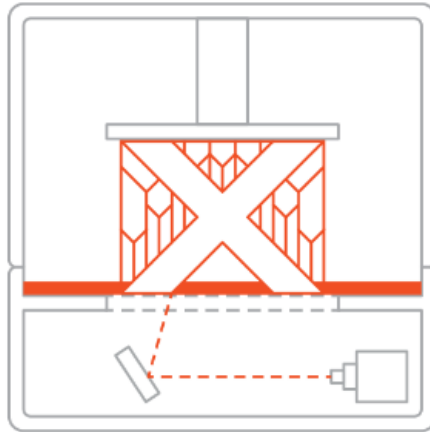


Figura 1: Proceso SLA[33]

El proceso DLP (Digital Light Processing) fue desarrollado como una evolución del SLA con un proceso muy similar. La única diferencia se da por la fuente de luz donde el DLP utiliza una pantalla que proyecta luz ultravioleta en la forma de una capa completa. Esto hace que el proceso sea mucho más rápido debido a que trabaja la capa completa en un instante. La desventaja de estos procesos es el material. La resina no solo es peligrosa, pero también requiere post-procesamiento de las piezas para eliminar el exceso de material y terminar de curarse completamente [22].

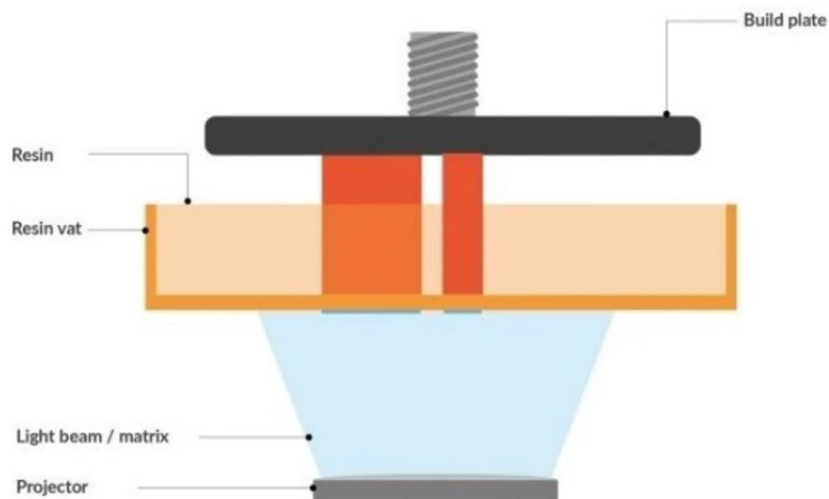


Figura 2: Proceso DLP[22]

La tecnología de SLS o Selective Laser Sintering es un proceso que se creó para lograr crear objetos con materiales más diversos como metales, cerámicos e incluso vidrio. En cada ciclo, se crea una pequeña capa del material en forma de pequeñas partículas que se derriten con un láser para formar y unir cada capa. Al finalizar el proceso, se puede quitar el exceso de material. Este tiene el beneficio de no requerir de material de soporte porque la pieza está suspendida en el material no derretido [19][27].

El proceso más común es conocido como FDM o Fused Deposition Modeling donde se utilizan termoplásticos que se le aplican calor en una boquilla para inyectarlos a cada capa del modelo. Debido

a su bajo costo, flexibilidad de materiales y facilidad de usar, ha llegado a ser una herramienta común para todo tipo de personas [21].

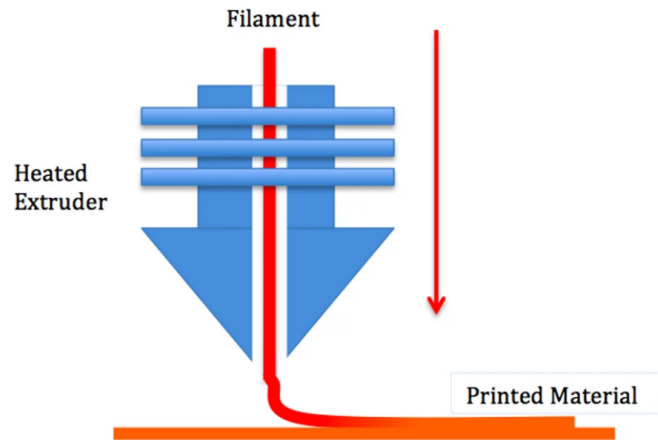


Figura 3: Proceso FDM[21]

Debido a la popularidad de la tecnología FDM, se han desarrollado variaciones que modifican diferentes aspectos de la impresora. Existen varios diseños de movimientos diferentes como cartesiano, CoreXY, y delta. El diseño cartesiano es el más común y el más simple donde cada motor corresponde a uno de los ejes de movimiento [32]. El CoreXY es similar al diseño cartesiano, pero se crea un patrón más complejo de bandas para generar el movimiento en los ejes X y Y para incrementar la robustez de la impresora [29]. Las impresoras delta funciona por una extrusora sujeta por tres brazos que se mueven verticalmente para definir su posición. Este fue diseñado para ser rápido, pero sufre en la calidad de sus piezas [34].

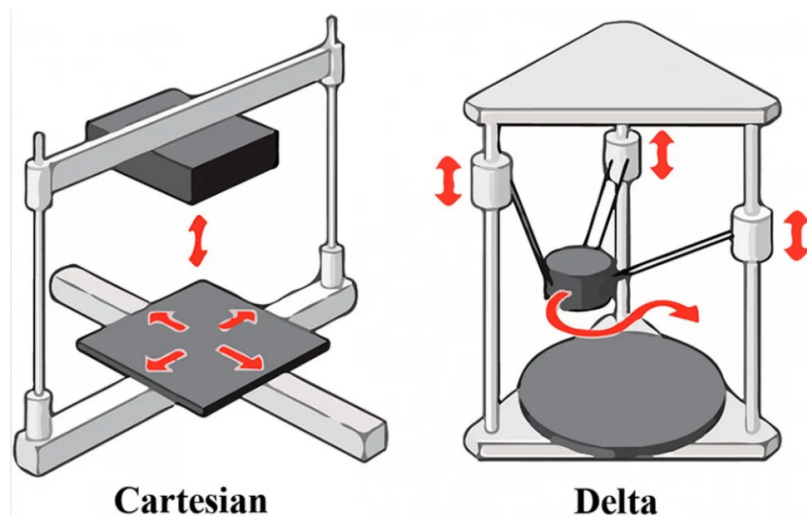


Figura 4: Comparación de diseños para impresoras FDM [21]

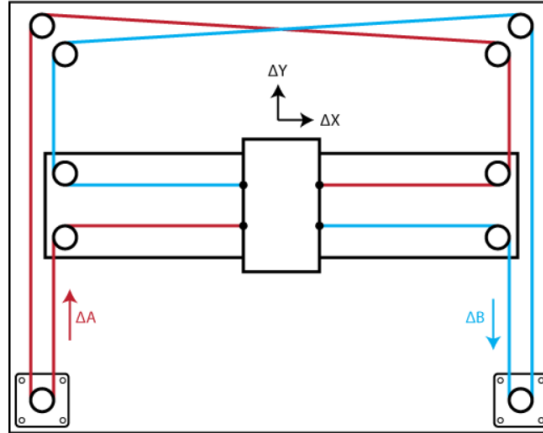


Figura 5: Movimiento CoreXY [29]

4.3. Firmware y microcontroladores

Un microcontrolador es una computadora simple que contienen un procesador, memoria y periféricos programables. Estos dispositivos son programables y de bajo costo para controlar sistemas simples [14] [12].

Los controladores de las impresoras 3D tienen procesadores de diferentes arquitecturas. Muchas impresoras de bajo costo tienen procesadores de 8 bits pero limita lo que puede lograr la impresora [31]. Las ventajas de los controladores de 32 bits:

- Son más rápidos porque logran implementar más y mejores sistemas de control como PIDs para las temperaturas.
- Logra mejorar la resolución y calidad de las piezas que imprime porque no solo planea mejor los movimientos, pero minimiza la probabilidad de errores.
- Puede reducir el sonido de los motores y normalmente estos controladores tienen placas con mejores componentes como drivers. [31].

El programa o software que utiliza el microcontrolador se conoce como un firmware. El firmware contiene el código para comunicarse con todos los componentes de hardware. En el caso de una impresora 3D, el firmware permite controlar la pantalla, los motores y el lector SD. También tiene la habilidad de hacer cálculos complejos como el control de velocidades y el control de temperatura [4].

El firmware más común para las impresoras 3D se conoce como Marlin. Marlin es un firmware gratis y completamente open-source que los usuarios pueden usar libremente para mejorar, modificar y adaptarse a cualquier tipo de configuración. Este es el producto de la comunidad en línea que ha actuado en conjunto para crear el software más accesible y completo [4].

Algunos de las características de Marlin son:

- Aceleración lineal y sistemas de movimiento inteligentes.
- Tiene soporte para diferentes tipos de movimientos cinemáticos como cartesianas, delta y SCARA.

- Tiene acceso a 250 comandos diferentes para el código G.
- Sistemas de control PID para el control de temperaturas.
- Nivelación automática de la cama caliente.
- Sistemas de seguridad como protección térmica [31].

4.4. Slicer

Un slicer es un programa que convierte un diseño 3D a un conjunto de instrucciones para la impresora 3D de los pasos necesarios para construir el objeto. Este conjunto de instrucciones es conocido como código G que contiene información como coordenadas y velocidades para cada motor en la impresora. Este programa esta apropiadamente nombrado 'slicer' debido a que el modelo 3D se corta en un conjunto de capas dos dimensionales. El slicer también acepta una gran cantidad de parámetros que modifican la técnica de impresión o las características del producto final [17].

Los parámetros de impresión más comunes son:

- Altura de capa(Layer Height): Determina la distancia que se mueve el eje Z para la impresión de cada capa. Una altura de capa mayor resulta en un tiempo de impresión menor pero con una perdida en la calidad del producto final y vice versa.
- Ancho de linea(Line Width): El ancho de capa depende del diámetro de la boquilla que deposita el material. Se recomienda utilizar una boquilla más pequeña si se requieren muchos detalles pequeños.
- Grosor de pared(Wall Thickness): Este determina el grosor de las superficies del diseño debido a que no es común que el interior de una impresión este relleno completamente de material. Un grosor más alto provee más rigidez al producto final.
- Grosor superior e inferior(Top/Bottom Thickness): Al igual que el grosor de pared, este determina el grosor de las superficies inferiores y superiores de una impresión.
- Densidad de relleno(Infill Density): Rellenar una estructura completamente de material puede ser increíblemente caro no solo en material pero en el tiempo de impresión. Muchas piezas son completamente funcionales sin tanto material por lo que se puede ajustar la densidad de material en el interior.
- Patrón de relleno(Infill Pattern): La forma en la que el relleno se distribuye en el interior de un diseño puede afectar su rigidez e incluso su funcionalidad como en materiales flexibles.
- Temperatura de impresión(Printing Temperature): La temperatura del 'hot-end' que derritirá el material para ser depositado.
- Temperatura de la cama caliente(Build Plate Temperature): La temperatura de la cama caliente es crítica para muchos materiales para adherir el material correctamente y tener una buena base para el resto de la impresión.
- Flujo(Flow): Determina la cantidad de material que se estará empujando por la extrusora.
- Velocidad de impresión(Print Speed): Este determina la velocidad en la que los motores se mueven durante la impresión para el eje X, Y y la extrusora. Si se imprime muy rápido o muy lento se pueden generar una variedad de problemas como deformaciones, mala adhesión y sub-extrusiones.

- **Retracción(Retraction):** Las retracciones son movimientos en reversa en la extrusora que alivian la presión en el efector final. Esto elimina la extrusión de material en recorridos vacíos que mejora la calidad de impresión.
- **Distancia de retracción(Retraction Distance):** Esta es la distancia que la extrusora jalará el material.
- **Velocidad de retracción(Retraction Speed):** La velocidad de retracción determina que tan rápido se jala el material. Tiene que estar bien ajustado para obtener los beneficios de las retracciones.
- **Z-Hop:** Este parámetro hace que el efector final suba en el eje Z antes de hacer un movimiento que reduce la posibilidad de colisionar con la pieza.
- **Velocidad del ventilador(Fan Speed):** El ventilador se utiliza para enfriar el material depositado para prevenir deformaciones.
- **Adhesión a la cama(Build Plate Adhesion):** Para asegurar que la base se adhiera a la superficie de la cama, se coloca material adicional en la primera capa de la pieza. Es importante especialmente para piezas con poco contacto con la cama [25].

4.5. Motor stepper



Figura 6: Motor Stepper Creality 42-40 [2]

La extrusora para impresoras 3D esta controlada por un motor stepper(motor paso a paso) al igual que el resto de los motores para los ejes. Los motores stepper permiten movimientos precisos a un bajo costo a comparación de otros motores como servos. Los motores stepper se mueven en pasos(ángulo de movimiento) donde la resolución de estos pasos dependen de la cantidad de dientes que tiene el estator. Para generar un movimiento continuo, se le envían señales PWM que alternan el campo magnético en cada diente y atraer el rotor. La ventaja de estos motores es que son simples de controlar con una alta precisión y no existe la necesidad de calibrarlo o efectuar cálculos. Las desventajas son que no tienen un torque muy alto a altas velocidades y tienden a calentarse debido a su baja eficiencia [8]. En un extrusora de filamento, este se calibra dependiendo de los pasos por milímetro o la cantidad de unidades de movimiento del stepper hacer consumir 1mm de filamento.

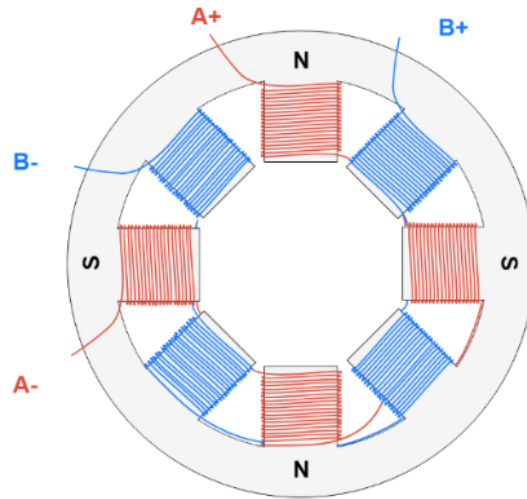


Figura 7: Estator de dos fases de un motor stepper [8]

4.6. Extrusoras

La extrusora de una impresora 3D mueve el material (normalmente filamento) hacia la boquilla o 'hot-end'. No solamente alimenta a la impresora con el material, pero también genera la presión necesaria para empujar el material derretido de la punta. El movimiento se hace utilizando un motor stepper con engranajes que sujetan el filamento. Esta parte de la extrusora se conoce como el 'cold-end' porque maneja el material en su forma sólida y lo dirige hacia el 'hot-end'.

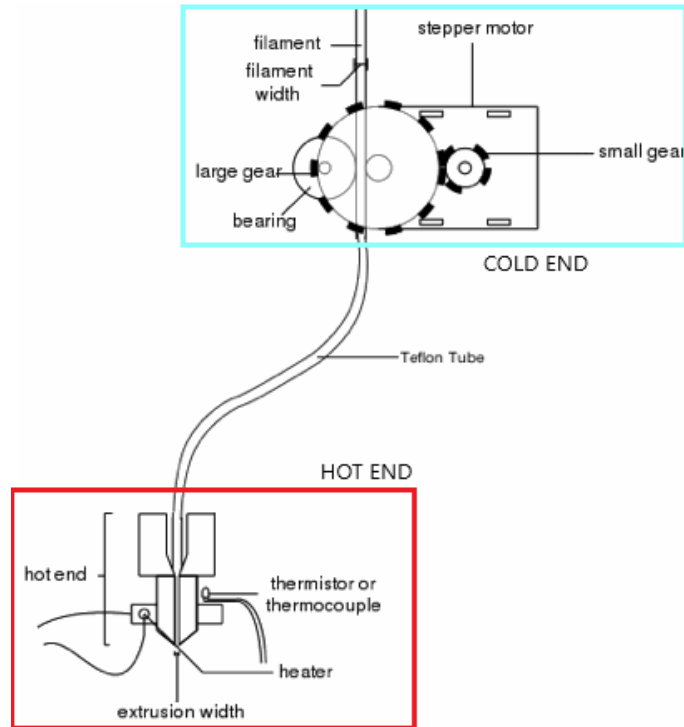


Figura 8: El cold-end y el hot-end en una extrusora tipo Bowden [28]

Existen dos formas de posicionar el motor conocidos como Direct Drive y Bowden. El Direct Drive está sujeta justo directamente sobre la boquilla mientras el sistema Bowden tiene el motor separado y transporta el material a la boquilla a través de un tubo. El Direct Drive tiene la ventaja de tener más control sobre la extrusión del material porque la distancia entre el motor y la boquilla es corta. El sistema Bowden tiene la ventaja de ser más ligero al movimiento del efector final que puede afectar la calidad de las impresiones [28].

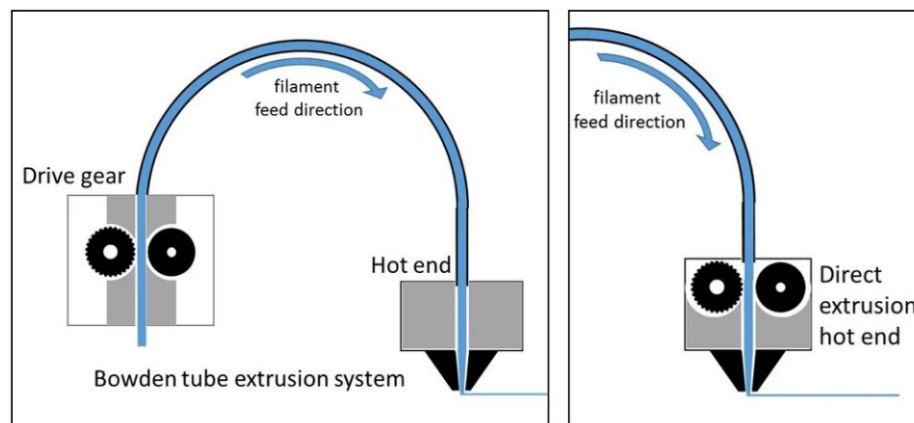


Figura 9: Diseño Bowden(izquierda) y Direct Drive(derecha) [28]

La extrusión por jeringa y extrusión con tornillo son otros tipos de extrusión que no utilizan filamentos. Estas técnicas son utilizadas en procesos industriales y se han modificado para ser utilizadas a menor escala en impresoras 3D [24]. En vez de filamentos, a estos sistemas se les alimentan el

material en forma de granos o 'pellets' que tienen una mayor selección de materiales a una fracción del costo [23]. La ventaja de la extrusión con la jeringa es el simple diseño. Dependiendo del material utilizado, este puede tener sus desventajas, pero la principal limitante es el volumen disponible en la jeringa. Solo se podrá crear objetos pequeños o se requerirá rellenar la jeringa constantemente [24].

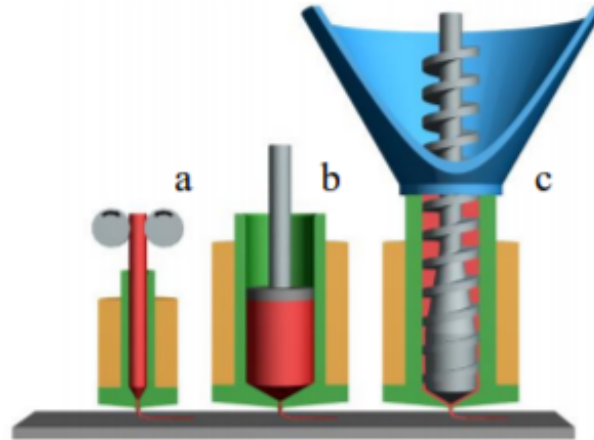


Fig. 1. Overview extrusion based 3D printing principles: (a) Filament based extrusion, (b) Syringe based extrusion, (c) screw based extrusion

Figura 10: (a) Filamento, (b) Jeringa, (c) Tornillo [24]

La extrusión por tornillo tiene un diseño más complejo, pero ofrece una gran cantidad de beneficios. Los granos se alimentan a una tolva y el tornillo transporta el material hacia la boquilla. El tornillo también genera la presión necesaria que permite que el material salga de la boquilla. A diferencia de la jeringa, este extrusor tiene más material disponible dado por el tamaño de la tolva [24].

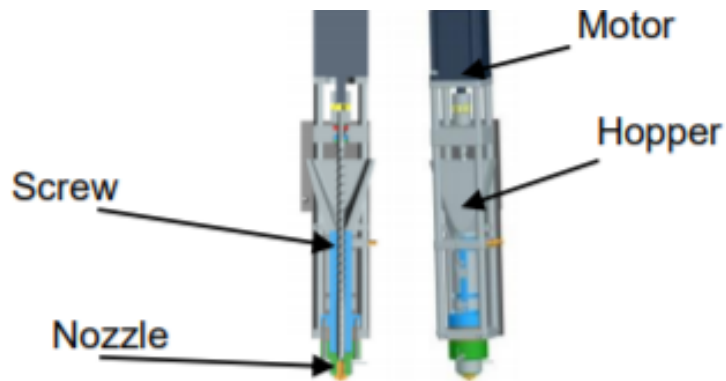


Figura 11: Ejemplo de una extrusora por tornillo [24]

4.7. Cera parafina

La cera parafina es un sólido blanco sin olor que tiene un punto de fusión entre 46 y 68 °C con una densidad de 0.9g/cm³ [30]. Esta tiene una baja conductividad térmica, pero tiene una muy buena

capacidad de calor con un calor específico de $2130 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ [18]. La cera parafina fue descubierta en 1819 donde se comenzó a encontrar en maderas, petróleo y carbón. Antes de su descubrimiento se utilizaban grasas y ceras de abejas para producir velas. Ahora las industrias de velas utilizan principalmente la cera parafina. En el mercado, este se puede encontrar en diferentes calidades de refinamiento que dependen de la cantidad de aceite que contienen. Uno no refinado tiene 5-15 % de aceite, el semi-refinado tiene 0.5-5 % de aceite y uno completamente refinado tiene 0-0.5 % de aceite [26]. En la Figura 12 se puede observar la viscosidad de la cera parafina cae considerablemente junto a su densidad mientras la temperatura incrementa.

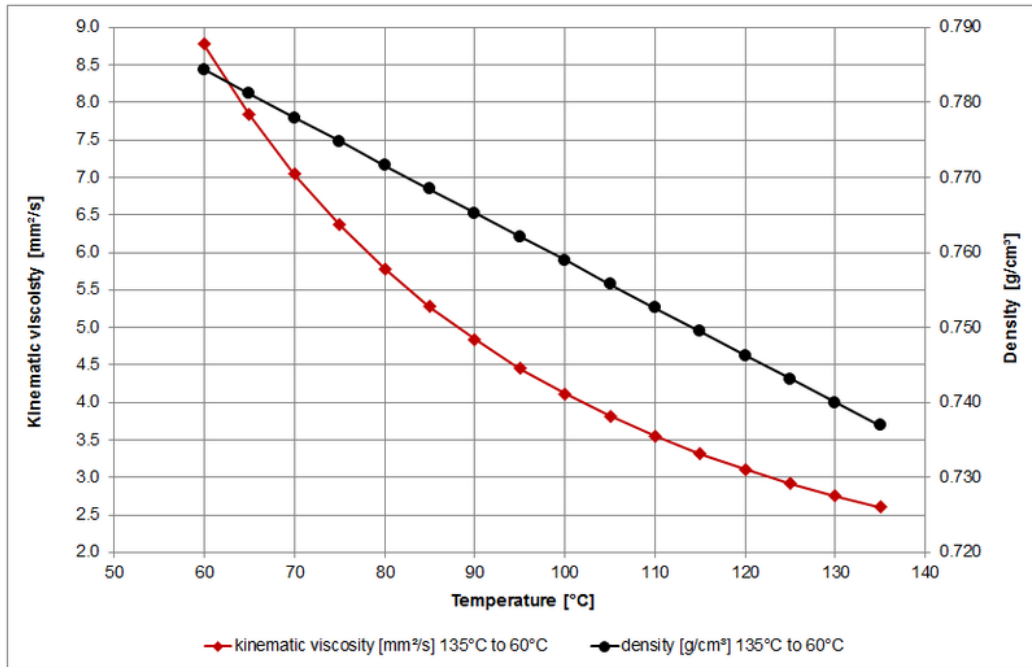


Figura 12: Gráfica de la viscosidad y densidad a diferentes temperaturas [9]

Existen tres métodos con el que se producen las velas actualmente. La técnica más antigua involucra sumergir la mecha de la vela en la cera en forma líquida repetidamente hasta obtener el grosor de la vela deseada. El segundo método usa un molde que se llena con cera líquida para darle una forma deseada cuando se enfría. El último método fue descubierto en los años 60s con el uso de la cera parafina. La cera se puede transformar en un polvo que, al aplicarle una alta presión al molde, se forma la vela [26]. La cera parafina en el mercado está disponible en forma de bloques sólidos, granos o polvos que facilitan su transporte.



Figura 13: Granos de cera parafina marca SASOL

En los últimos 20 años, se han hecho grandes avances en la manufactura aditiva con nuevas técnicas de impresión para acomodar una mayor diversidad de materiales. Los más comunes son termoplásticos como PLA y metales, pero también se han hecho avances en materiales menos esperados. La Universidad McGill han creado impresoras 3D que imprimen estructuras de hielo(Figura 5.1) y compañías como Hershey han creado impresoras para chocolate(Figura 5.2). A una mayor escala, se han creado impresoras de cemento que logran construir hogares de forma autónoma y a bajo costo [10] [13].



Figura 14: Impresión 3D en hielo en la Universidad McGill [10]



Figura 15: Impresora de chocolate creado por Hershey [13]

La cera es uno de los materiales que se ha intentado utilizar para impresoras 3D, pero ha sido

muy limitada. Actualmente existen dos métodos principales para crear objetos 3D de cera: servicios de impresión 3D y el uso de filamentos de cera modificada. El problema con estos métodos es que están diseñados específicamente para ser usados en la creación de joyería por un proceso llamado "Lost-wax casting". La cera en sí solamente es parte de un proceso y no el producto final. No existen impresoras capaces de usar cera parafina en granos para transformarlos en velas o esculturas con la libertad de alimentarlo con diferentes colores y aromatizantes [11].

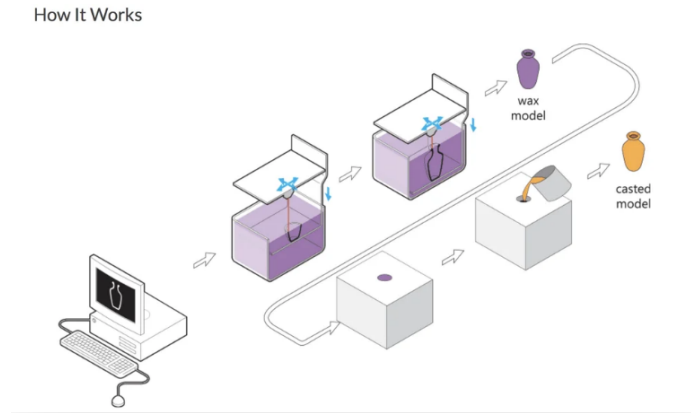


Figura 16: Proceso de moldeado a la cera perdida [11]

Las extrusoras para granos han existido como procesos industriales por muchos años. Estos utilizan un tornillo dentro de un contenedor para empujar y calentar el material a través de un agujero. Aunque se ha preferido el uso de filamentos para materiales como PLA, el uso de extrusoras de tornillo tiene sus propios beneficios. Por ejemplo, el PLA en forma de grano es una fracción de su costo comparado al filamento[20]. También se pueden triturar los materiales de soporte o impresiones falladas y ser reutilizadas en la impresora [28].

Este trabajo explorará la posibilidad de la cera parafina como material para la impresión 3D. Esto incluye el diseño y la construcción de una extrusora capaz de utilizar este material. También será necesario modificar el firmware de la impresora y calibrar sus configuraciones para ser compatibles con la nueva extrusora. Se busca lograr extruir cera parafina y crear impresiones de este material con la mayor calidad posible.

Siendo solamente una persona trabajando en este proyecto completamente nuevo, se enfocará principalmente en el funcionamiento de la impresora y minimizar el costo de construcción. No existe un estándar de calidad que se desea alcanzar, pero se desea lograr ver el potencial que tiene la cera en la impresión 3D. Crear objetos imposibles de construir con técnicas tradicionales y ser una tecnología innovadora en la producción de velas.

Desafortunadamente, debido a la pandemia ocasionada por el COVID-19 el acceso a las herramientas disponibles en la universidad se vio muy limitado. Por este motivo se tomó la decisión de trabajar con una impresora 3D, filamento PETG y herramientas manuales que el autor de este trabajo de investigación tenía a disposición.

Características de la impresora

El objetivo principal de este trabajo de graduación es lograr la extrusión de cera parafina. Por este motivo se decidió modificar una impresora existente. La impresora que se seleccionó fue la Creality Ender 3 Pro debido a varias de las ventajas que tiene sobre otras impresoras como su bajo costo, su disponibilidad en Guatemala y la variedad de recursos en línea. Esta impresora también viene equipada con un controlador de 32 bits que aún no es común en impresoras 3D económicas.

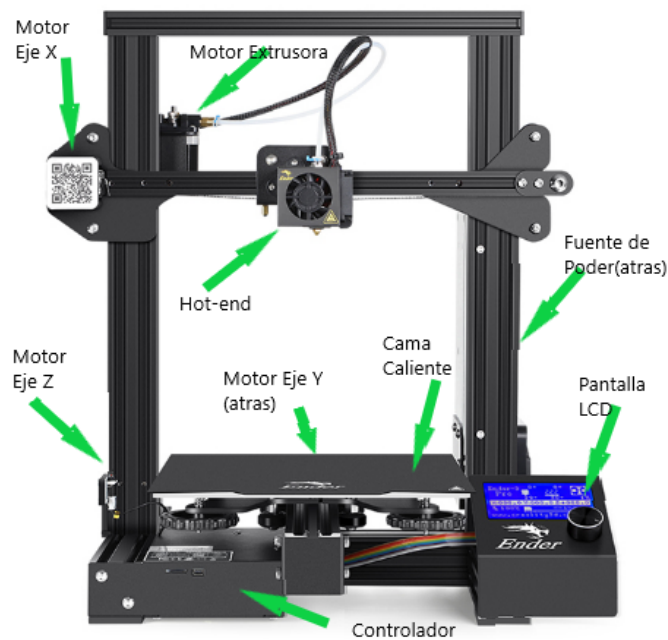


Figura 17: Creality Ender 3 Pro [3]

Tabla 1: Especificaciones técnicas del Ender 3 Pro [3]

Tipo	FDM(Fused Deposition Modeling)
Materiales	PLA, ABS, PETG, TPU etc.
Espacio de impresión	220 x 220 x 250 mm
Dimensiones	440 x 440 x 465 mm
Fuente de poder	AC120V@6.8A
Tolerancia de impresión	$\pm 0.1mm$
Velocidad de impresión	MAX: 180mm/s
Temperatura del Hotend	MAX: 240°C
Temperatura de la cama	MAX: 110°C

La impresora Ender 3 Pro controla sus ejes de forma cartesiana donde un motor stepper controla un eje independientemente. El eje X controla el movimiento de la boquilla a través de fajas . El eje Z utiliza una varilla roscada que al girar mueve la pieza que contiene la extrusora y el eje X. Finalmente el movimiento del eje Y se logra con el movimiento de la cama caliente en la base de la impresora. La extrusa también utiliza un motor stepper para mover el filamento.

Tabla 2: Especificaciones del Stepper Creality 42-40 [2]

Voltaje nominal	4.83V
Ángulo de paso	1.8 grados
Corriente	1.5A
Velocidad	1 - 1000RPM
Torque	0.4 Nm

Diseño y construcción de la extrusora

Se utilizó una impresora 3D para crear las piezas necesarias para la construcción de la impresora. Se requería un material suficientemente rígido para que no se deformara a temperaturas de alrededor de 70 °C y pueda soportar las presiones generadas por la extrusora al momento de mover el material hacia la boquilla. Las piezas se crearon con PETG por su rigidez y su resistencia a altas temperaturas. También se consideró ABS como material pero este presenta imperfecciones al momento de imprimir y requiere de más cuidado por los gases que puede emitir. PLA es el material de impresión más común pero sus propiedades son inferiores a los del PETG en resistencia mecánica y térmica.

Las piezas se procesaron en el slicer Cura con los siguientes parámetros para una impresora Ender 3 Pro con una boquilla de 0.4mm de diámetro.

Tabla 3: Configuración de Cura para PETG

Layer Height	0.2mm
Line Width	0.4mm
Wall Thickness	1.6mm
Top/Bottom Thickness	0.8mm
Infill Density	20-50 %
Infill Pattern	Cubic
Printing Temp.	230°C
Build Plate Temp.	60°C
Flow	100 %
Print Speed	50mm/s
Retractions	Enabled
Retraction Distance	6mm
Retraction Speed	40mm/s
Fan Speed	0 %
Build Plate Adhesion	Skirt

La extrusora se diseñó tomando en consideración varios requisitos como:

- Minimizar el peso para prevenir caídas en calidad de la impresora.
- Que las piezas sean fáciles de imprimir (minimizar la cantidad de material de soporte) e instalar.
- Reusar la mayor cantidad de componentes de la extrusora original como el motor y el hot-end.
- Hacer el diseño compacto para no reducir el espacio de trabajo de la impresora.

El tipo de extrusora se seleccionó basado en la forma más común para material. La cera parafina se encuentra en dos formas, granos y bloques. Los granos de la cera parafina son ideales para una extrusión de tornillo. Se consiguió la cera parafina granular con granos de alrededor de 4.5mm de diámetro de marca SASOL.



Figura 18: Grano de cera parafina SASOL

8.1. Prototipos

La extrusora contiene 7 piezas de PETG que están unidas con tornillos de 3mm de diámetro. Se realizaron más de 5 iteraciones para cada parte debido a fallas estructurales, cambios de diseño o mejoras. La siguiente sección muestra algunos de los retos enfrentados durante el diseño de la extrusora.

8.1.1. Placa base

La placa base fue la primera pieza diseñada para lograr sujetar el resto de la extrusora al carro móvil. Debido al peso del resto de las piezas, el motor y la cera, esta pieza se flexionó hasta que falló en su sección más delgada. En la Figura 19, se logra observar la ubicación donde se fracturó.



Figura 19: Prototipo inicial de la placa base de la extrusora

Para mejorar el diseño, se incrementó el grosor de la pieza y se le agregó un gancho en la parte trasera para sostenerse de forma más segura a la placa metálica del carro sin depender completamente en los dos tornillos delanteros. Para prevenir que se flexione por el peso de la extrusora, se incluyeron soportes y patas en la punta que se sostiene sobre la caja del ventilador como se ve en la Figura 20.



Figura 20: Diseño final de la placa base de la extrusora

8.1.2. Cilindro de presión

Debido a que se deseaba utilizar la mayor cantidad de partes de la extrusora original, se diseñó la extrusora para continuar utilizando el disipador de calor para transferir el material desde el tornillo hasta la boquilla. Se creó una pieza intermedia entre el tornillo y el disipador de calor rojo como se ve en la Figura 21.

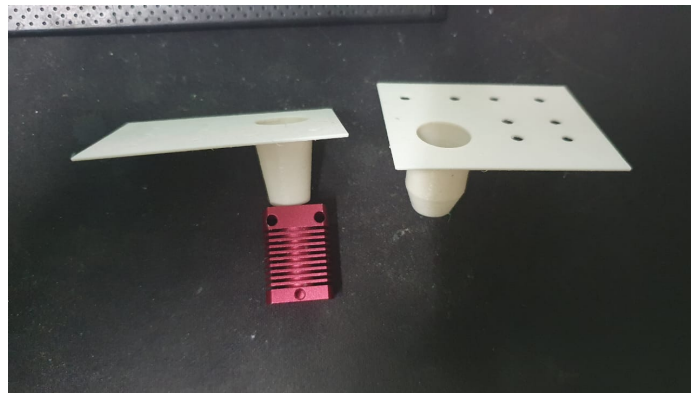


Figura 21: Diseño inicial para introducir la cera

Después de muchos intentos fallidos, se concluyó que el disipador de calor no transfiere el material de forma efectiva. Esto se debe a que el movimiento del tornillo comprime la cera parafina en los diferentes cambios de diámetro sin mover el material correctamente. Para la siguiente iteración se eliminó el disipador de calor y se diseñó una pieza con un diámetro uniforme que se conecta directamente a la boquilla.

8.1.3. Tornillo

Los primeros tornillos se diseñaron completamente de PETG pero debido a su longitud y diámetro, estos continuaron fallando por la cantidad de presión que se genera durante la extrusión. Para reforzar los tornillos se utilizaron varillas roscadas de acero en el centro de la pieza de PETG. Debido a los continuos cambios en el resto de la extrusora, también se diseñaron los tornillos con diferentes diámetros y pasos. Se redujo el diámetro total de 16mm a 9.5mm para lograr girar dentro de un agujero de 10mm. El paso se ajustó a 11mm para ser lo más corto posible dejando suficiente espacio para los granos de cera. Con un paso del tornillo pequeño se tiene más control sobre el movimiento, pero requieren de más rotaciones para depositar el material. Estos cambios se ven en la Figura 22 que contiene la evolución del diseño del tornillo.

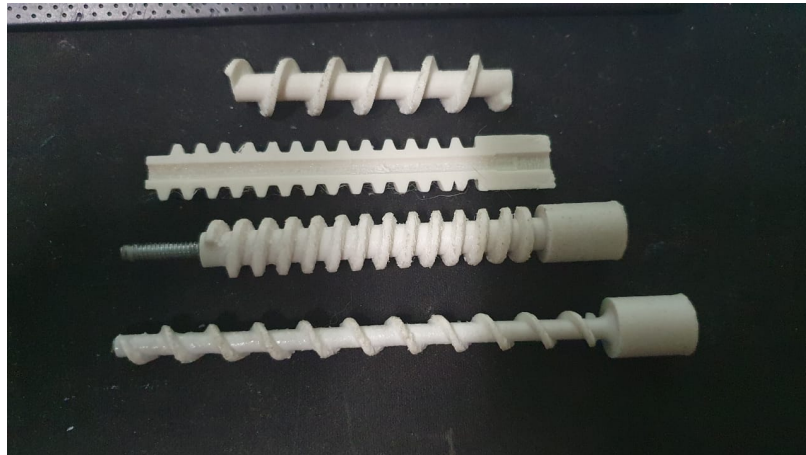


Figura 22: Iteraciones de diseños para el tornillo

8.1.4. Diámetro de la boquilla

La Ender 3 Pro tiene por defecto una boquilla de latón de 0.4mm de diámetro. Para reducir la cantidad de presión necesaria para extruir la cera, se decidió remplazarlo con una boquilla de 1mm de diámetro. La cera parafina no es un material abrasivo por lo que no es necesario un material de mayor dureza.



Figura 23: Boquillas de latón de diferentes diámetros internos

8.2. Diseño final

La Tabla 4 contiene el listado de partes utilizados para la construcción de la impresora. Los planos piezas diseñadas se encuentran en el Anexo. Con la meta de minimizar el costo reutilizar componentes de la extrusora original, la mayoría de componentes son tornillos o piezas impresas en 3D.

Tabla 4: Listado de partes completo

Parte	Cantidad	Material	Descripción
PLACA BASE	1	PETG	Esta pieza une la extrusora con la placa montada en el eje X. Impresa en 3D
ENTRADA DE GRANOS	1	PETG	Donde el tornillo comienza a mover los granos hacia la boquilla. Impresa en 3D
BLOQUE PARA EL MOTOR	1	PETG	Aquí se monta el motor stepper para el tornillo y la extensión de los granos si se desea. Impresa en 3D
TORNILLO	1	PETG	El tornillo empuja los granos y crea presión. Este tornillo es vacío y requiere de una varilla roscada para reforzarlo. Impresa en 3D
BLOQUE DE PRESIÓN	1	PETG	El bloque de presión reemplaza el lugar del disipador de calor y mueve material hacia el bloque de calor para ser extruido. Impresa en 3D
EXTENSIÓN PARA LOS GRANOS	1	PETG	La extensión de granos incrementa la cantidad que la extrusora puede sostener. Impresa en 3D
SOPORTE PARA EL HOTEND	1	PETG	El tornillo genera una presión y se requiere un soporte para prevenir su separación. Impresa en 3D
Tornillos M3x20	3	Acero	
Tornillos M3x30	2	Acero	
Tornillos M3x8	10	Acero	
Motor Stepper	1		Se puede utilizar el motor de la extrusora del Ender 3
Varilla roscada M4.5x105	1	Acero	Se utiliza para reforzar el tornillo de la extrusora.
Hot-End	1		Se reutiliza el hot-end del Ender 3 que incluye el bloque de aluminio, un termistor, una resistencia cilíndrica y 2 tornillos M3x12.
Boquilla de 1mm	1	Latón	Para requerir menos presión de la extrusora, se utiliza una boquilla más grande.

En total, la estructura final tiene una altura de 255mm, 70mm de ancho y 55mm de profundidad. Las figuras 25 y 26 muestran la extrusora en su ensamblaje digital y su construcción física, respectivamente.

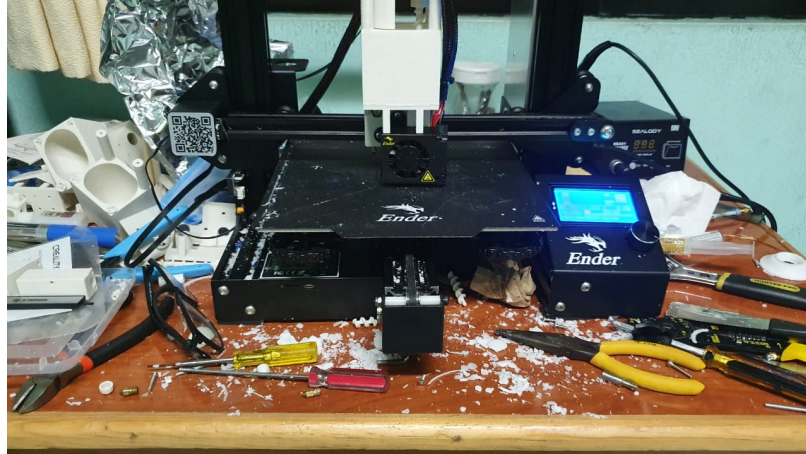


Figura 24: Impresora con la extrusora instalada

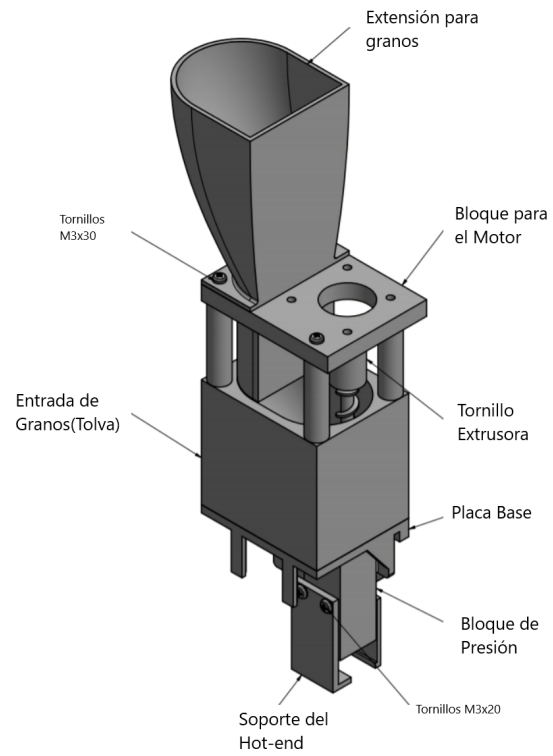


Figura 25: Ensamblaje de la extrusora

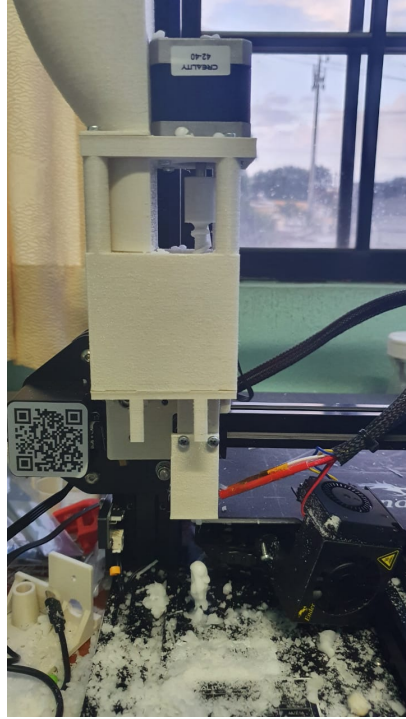


Figura 26: Construcción física de la extrusora

Modificación del firmware

El firmware original de la impresora Ender 3 es una versión modificada de Marlin, el firmware más común para las impresoras de bajo costo por ser versátil. El firmware del Ender 3 se ha modificado para tener una interfaz amigable que no permite modificar ciertos parámetros directamente. Por lo que se tiene que instalar la versión más reciente de Marlin sin las modificaciones hechas por Creality. Marlin es un software open-source por lo que se tiene acceso al código para poder editarlo.

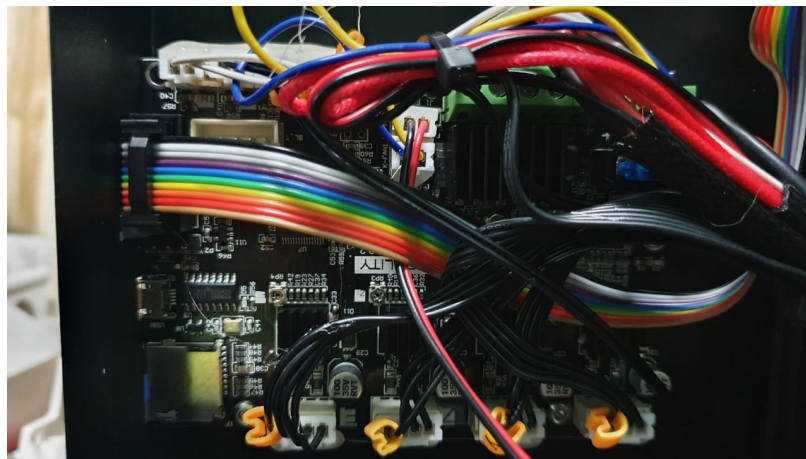


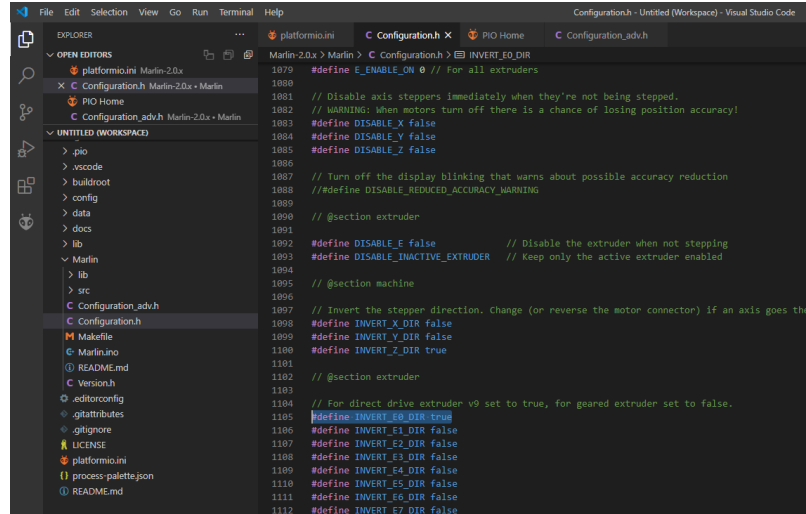
Figura 27: Placa del controlador de 32 bits

En los controladores de 8 bits, la instalación del firmware es más complicado porque requiere de un Uploader(Arduino Uno) y transferir la información conectando los pines desde el Uploader a la placa del controlador. Todo el código se edita desde el IDE de Arduino. Para el controlador de 32 bits, el proceso es más simple utilizando Visual Studio y el archivo compilado se puede guardar en una tarjeta SD. Al iniciar la impresora, el controlador automáticamente instala el nuevo firmware.

La versión de Marlin más reciente es Marlin 2.0.x. Este se tiene que modificar con las configuraciones del Ender 3 Pro. Estas configuraciones están disponibles en línea para una gran cantidad

de impresoras. La Ender 3 Pro tiene dos configuraciones para las versiones de 8 bits y 32 bits del controlador. El controlador de 32 bits tiene el nombre de 'Ender 3 Pro V1.5'.

Para poder editar y compilar el firmware, se requiere tener un editor de texto que implemente la extensión Platform IO. Al abrir los archivos, se modificaron partes del código. Para el archivo platformio.ini se reemplazó el 'default_envs' a 'default_envs = STM32F103RET6_creality'.



```
1079 #define INVERT_E0_DIR
1080 #define E_ENABLE_ON 0 // For all extruders
1081 // Disable axis steppers immediately when they're not being stepped.
1082 // WARNING: When motors turn off there is a chance of losing position accuracy!
1083 #define DISABLE_X false
1084 #define DISABLE_Y false
1085 #define DISABLE_Z false
1086
1087 // Turn off the display blinking that warns about possible accuracy reduction
1088 // #define DISABLE_REDUCED_ACCURACY_WARNING
1089
1090 // @section extruder
1091
1092 #define DISABLE_E false // Disable the extruder when not stepping
1093 #define DISABLE_INACTIVE_EXTRUDER // Keep only the active extruder enabled
1094
1095 // @section machine
1096
1097 // Invert the stepper direction. Change (or reverse the motor connector) if an axis goes the
1098 // #define INVERT_X_DIR false
1099 #define INVERT_Y_DIR false
1100 #define INVERT_Z_DIR true
1101
1102 // @section extruder
1103
1104 // For direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false.
1105 #define INVERT_E0_DIR true
1106 #define INVERT_E1_DIR false
1107 #define INVERT_E2_DIR false
1108 #define INVERT_E3_DIR false
1109 #define INVERT_E4_DIR false
1110 #define INVERT_E5_DIR false
1111 #define INVERT_E6_DIR false
1112 #define INVERT_E7_DIR false
```

Figura 28: Firmware en Visual Code Studio

Luego se modificaron valores dentro del archivo Configuration.h que contiene una gran cantidad de ajustes que se pueden hacer a la impresora. Para poder utilizar la nueva extrusora, se redujo la temperatura mínima de extrusión. Normalmente este límite esta hecho para prevenir que la extrusora intente depositar filamento cuando la boquilla no se encuentra una temperatura suficientemente alta para el material que podría dañar el motor o la boquilla. Se fijó esta temperatura a 40°C modificando la variable EXTRUDE_MINTEMP. El segundo cambio es para invertir la dirección de giro de la extrusora para que el movimiento positivo del stepper empuje el material hacia abajo. La variable de este es INVERT_E0_DIR y se tiene que definir con 'true'. También se puede modificar los pasos por mm que se necesitan calibrar pero Marlin permite modificarlos desde la impresora que facilita el ajuste de estos valores sin tener que constantemente modificar e instalar el firmware. Al compilar el código, se puede instalar en la impresora con la tarjeta SD.



Figura 29: Impresora con Marlin instalado

Calibración

Para lograr la calibración de las configuraciones se tomó en consideración las propiedades de otros materiales que se utilizan en las impresoras 3D como PLA, PETG y ABS. Se creó un cuadro comparativo que se puede observar en la Tabla 5. Las propiedades de estos materiales son similares en sus densidades y propiedades térmicas. Con una temperatura de fusión más baja, la cera pudo ser extruida de forma similar a las de los otros materiales. También se consideró la viscosidad de la parafina a diferentes temperaturas que determina la facilidad de flujo del material por la boquilla. Para que la viscosidad no caiga lo suficiente para salir de la boquilla sin la necesidad del motor, se agregaron retracciones para prevenir que el material gotee o que se generen excesos de material [1][5][6][7].

Tabla 5: Cuadro comparativo entre PLA,ABS, PETG y la cera parafina [1][5][6][7]

Material	Densidad(g/cm^3)	Punto de fusión($^{\circ}C$)	Calor específico($J/kg^{\circ}C$)	Tensión máxima(MPa)
PLA	1.30	130 - 180	1.8e3	26.4
ABS	1.10	200	1.99e3	40.0
PETG	1.27	260	1.50e3	47.9
Parafina	0.90	46 - 68	2.14e3	0.75

La calibración de la impresora fue bastante difícil debido a que la cera parafina altera sus propiedades drásticamente en un rango de temperaturas muy bajas. Entre $50^{\circ}C$ y $70^{\circ}C$, el material cambia de sólido a líquido con diferentes configuraciones para la extrusora y los pasos por milímetro del stepper. A $55^{\circ}C$, se logró extruir la cera parafina de una forma similar a la que se ve en otros materiales.



Figura 30: Extrusión de parafina a 55°C

Aunque la extrusión fue exitosa, el problema resulta ser que el momento que la cera hace contacto con el aire a temperatura ambiente, este se solidifica inmediatamente. Con este comportamiento, la cera que sale de la extrusora no se adhiere a ninguna superficie. También la cera es frágil, constantemente se separa y no se logra obtener un flujo continuo.

A 60°C el problema continúa sin importar que la extrusión es menos viscosa. La cera parafina necesita hacer contacto con la cera en su forma líquida para poder adherirse entre ellos. En su forma sólida, se requiere presión para realmente unir capas de cera juntas. Este es un problema fundamental por las propiedades de la cera que no se pueden corregir.

Se decidió experimentar con cera a temperaturas más altas para observar si se logra construir estructuras extruyendo de forma líquida. Se elevó la temperatura de la boquilla a 75-80°C donde la cera sale completamente líquida.

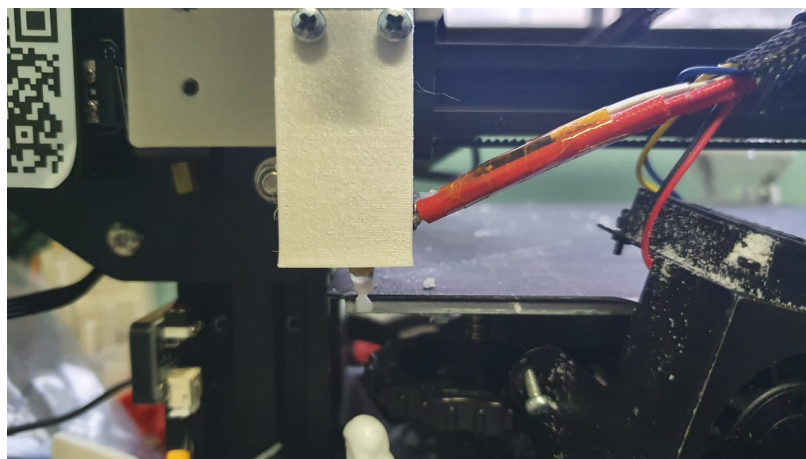


Figura 31: Extrusión de parafina a 75°C

A esta temperatura, aparecen otro grupo de problemas. Debido a que la cera se comporta como un líquido, aún sin ningún movimiento de la extrusora la boquilla empieza a gotear cera. A diferencia de las temperaturas bajas, la cera no sale de forma uniforme y se acumula en la boquilla hasta que se cae como una gota. Al intentar de imprimir a esta temperatura, la cera no fluye de forma controlada y deposita cera en todos sus movimientos. El beneficio de esta temperatura fue que se logró adherirse

y crear una sola estructura como en las Figuras 32 y 33 al intentar imprimir un cilindro.



Figura 32: Impresión de un cilindro a 75°C

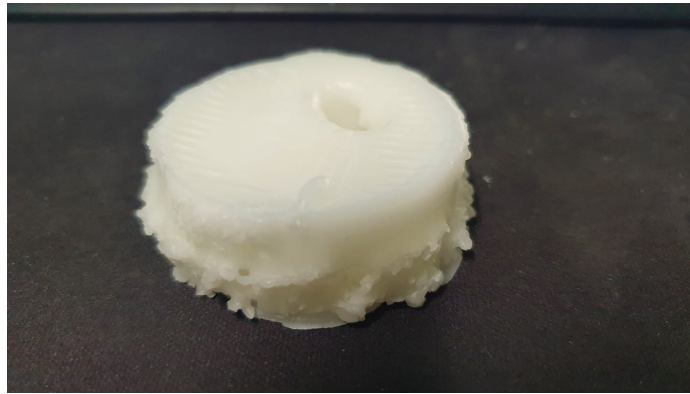


Figura 33: Impresión de un cilindro grande a 80°C

Se alteraron diferentes propiedades como la altura de cada capa, velocidad de impresión y los pasos por milímetro para intentar mejorar los resultados, pero la calidad de la impresión no mejoró. Aún así, se decidió imprimir una pieza compleja que tuvo resultados inesperados observable en la Figura 10.5. Comparado a una impresión en PLA los resultados fueron muy pobres, pero mostró que si es posible.

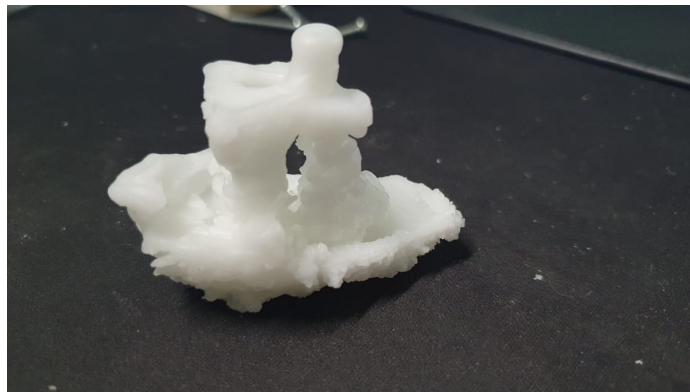


Figura 34: Impresión de un Benchy a 80°C

Una gran parte del problema con la impresora fue que se veía como una versión derretida del diseño original. Se decidió reducir la temperatura de extrusión en pequeños incrementos y se produjeron mejores resultados inmediatamente. Con una temperatura más baja, se requiere de más presión para extruir la cera por lo que se calibraron los pasos por milímetro de la extrusora para incrementar la rotación del tornillo. La Figura 35 muestra como la calibración comenzó a mejorar la calidad de las impresiones.

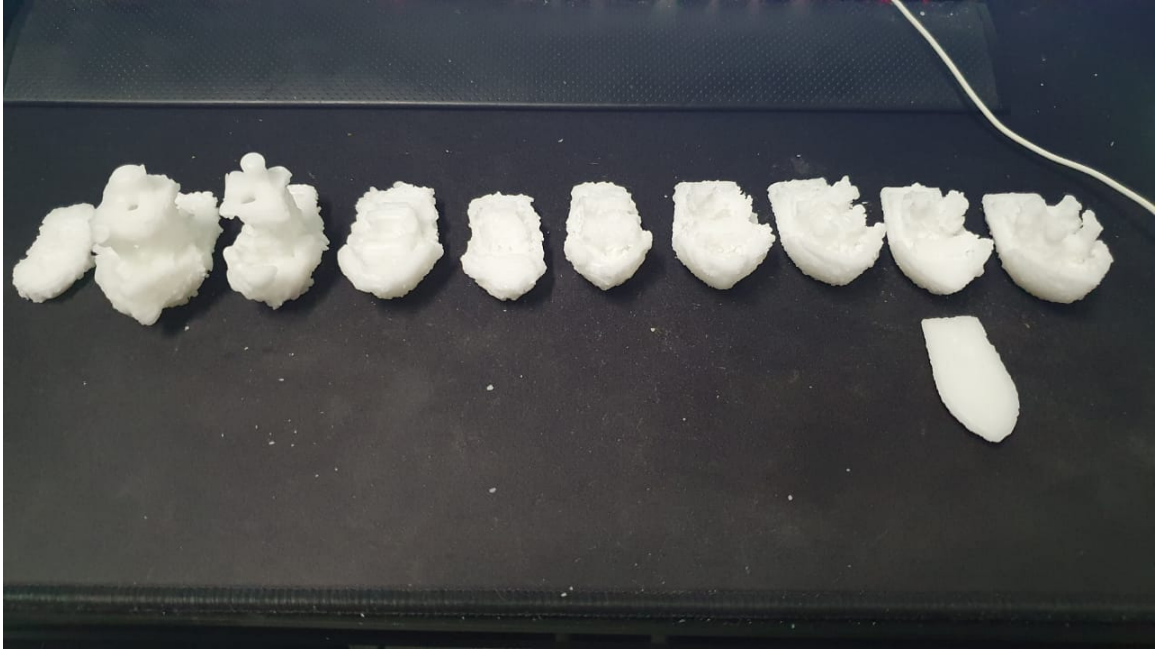


Figura 35: Impresiones de Benchy de mayor a menor temperatura (85°C a 65°C)

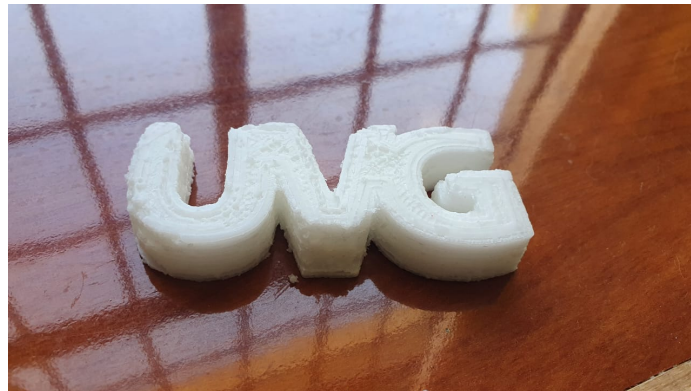


Figura 36: Logo de la UVG en cera parafina

El punto ideal para la impresión llegó a ser 65°C con 400 pasos por mm de la extrusora. También fue necesario modificar varios parámetros en el Slicer Cura. Es necesario crear un nuevo material para que el software acepte todas las configuraciones de la tabla 6. Estos parámetros están hechos para una boquilla de 1mm de diámetro.

Tabla 6: Configuración de Cura para la cera parafina

Layer Height	0.1mm
Initial Layer Height	0.1mm
Line Width	1.2mm
Wall Thickness	3.6mm
Top/Bottom Thickness	1.2mm
Infill Density	20-100 %
Infill Pattern	Cubic o Lines
Printing Temp.	65°C
Build Plate Temp.	0°C
Flow	100 %
Print Speed	30mm/s
Wall Speed	30mm/s
Initial Speed	20mm/s
Retractions	Enabled
Retraction Distance	0.5mm
Retraction Speed	5mm/s
Z Hop	Enabled
Fan Speed	100 %
Build Plate Adhesion	Skirt

CAPÍTULO 11

Manual de uso

El manual de uso completo se encuentra en el Anexo B. Se asume que se ha hecho la instalación correcta de la extrusora y se ha completado la modificación del firmware descrito en el capítulo anterior. El manual de uso lista los diferentes pasos necesarios para transferir el diseño digital deseado y ser impreso en cera utilizando el slicer Cura por ser un programa amigable al usuario.

El manual esta compuesto de cuatro pasos principales:

- Primero es necesario crear un nuevo material en Cura para lograr aceptar las temperaturas de operación más bajas.
- Luego de exportar el diseño 3D en formato STL, se configuran los parámetros de impresión ubicado en la Tabla 6 en la fase de calibración.
- Con el código G almacenado en una tarjeta SD, la impresora también requiere tener los parámetros de impresión correctas como los pasos por milímetro de la extrusora.
- Para utilizar la impresora se alimenta la cera parafina y asegurar que haya cera en un flujo continuo desde el tornillo hasta la boquilla. También es necesario nivelar la cama y limpiar la superficie de la cama.

Evaluación de resultados

Con la impresora calibrada, se imprimió una variedad de diseños para determinar las capacidades y limitantes que tiene este proceso. El objetivo de este trabajo fue crear una extrusora capaz de utilizar la cera parafina y ser usado en la impresión 3D. Dado los resultados, es claro que se ha cumplido exitosamente. Se logró crear objetos de cera que son imposibles crear en una sola pieza con otras técnicas de manufactura.

La Figura 37 tiene dos objetos diferentes de cera creadas en la impresora. Un cilindro con un patrón hexagonal en su superficie y un pulpo. Se ve que en ambos diseños, la impresora logra capturar los detalles de la superficie incluyendo los ojos y las cejas del pulpo.

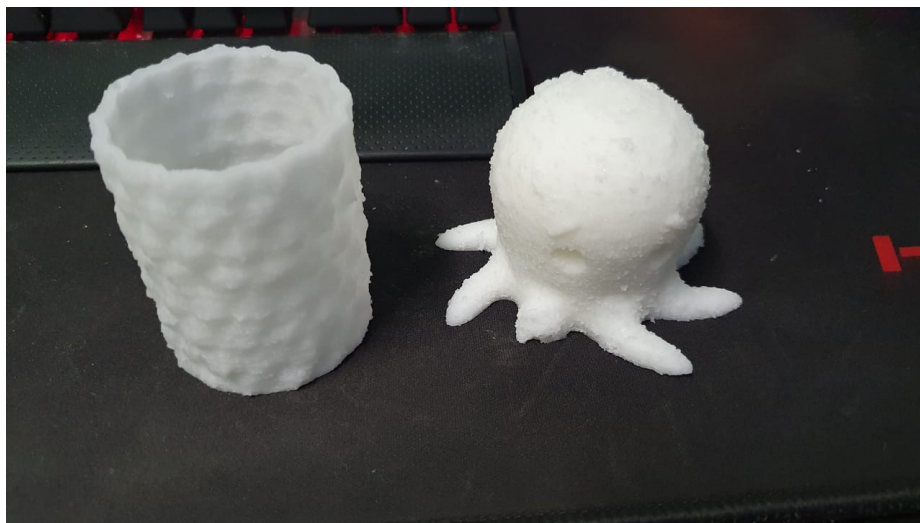


Figura 37: Impresiones de cera parafina

Una gran parte del trabajo fue la calibración debido a que la cera parafina funciona en un rango muy limitado de temperaturas, sean muy bajas o muy altas. A bajas temperaturas, la cera en estado

sólido no logra adherirse a ninguna superficie y es muy frágil. A muy altas temperaturas, la cera es muy líquida y se vuelve difícil de controlar. La temperatura ideal se encontró a 65°C que es el valor mínimo que se logra tener antes de que empieza a extruir de forma sólida. Hay muchos beneficios de extruir en líquido cerca del punto de fusión porque se logra tener más control sobre la salida del material en la boquilla. Aunque la cera sale en estado líquido, a esta temperatura la cera no gotea sin el movimiento del tornillo y cualquier exceso se logra corregir agregando retracciones.

A temperaturas altas, la mayoría de la calidad y detalles de la impresión se pierde. Durante la calibración a 80°C se experimentó con los pasos por mm de la impresora de 20 hasta 800 pasos por mm pero ninguno logró mejorar la calidad de la impresión. La menor temperatura no solo mejoró la extrusión, también no afectó las capas anteriores. Resulta que el calor empieza a derretir las capas anteriores y en la mayoría de casos, la impresión falla debido a que se crea una distancia muy grande entre la altura de la impresión y la boquilla. También se crean excesos de material en las paredes de la pieza deformándose como en la Figura 38.

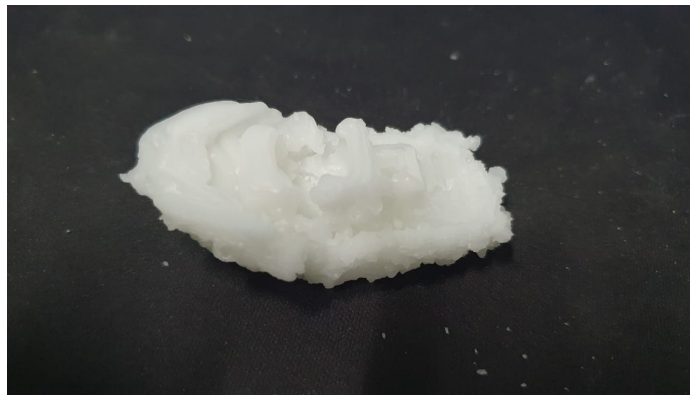


Figura 38: Impresión de un Benchy a 75°C

Al reducir la temperatura, las superficies mejoraron y la impresión obtuvo resultados más detallados. Las siguientes figuras muestran esta diferencia claramente. La capa es completamente horizontal y las superficies están bien definidas. Esta diferencia se logra ver en las Figuras 39 y 40.



Figura 39: Impresión inferior de un Benchy a 75°C



Figura 40: Impresión inferior de un Benchy a 65°C

La Figura 41 muestra los mejores resultados que se lograron obtener con la cera a 65°C. Lo único que no puede hacer la impresora es crear el techo debido a que la cera líquida no se puede construir en el aire.

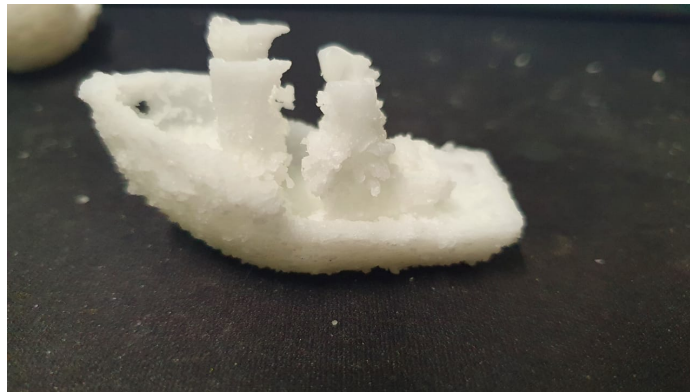


Figura 41: Impresión de un Benchy a 65°C

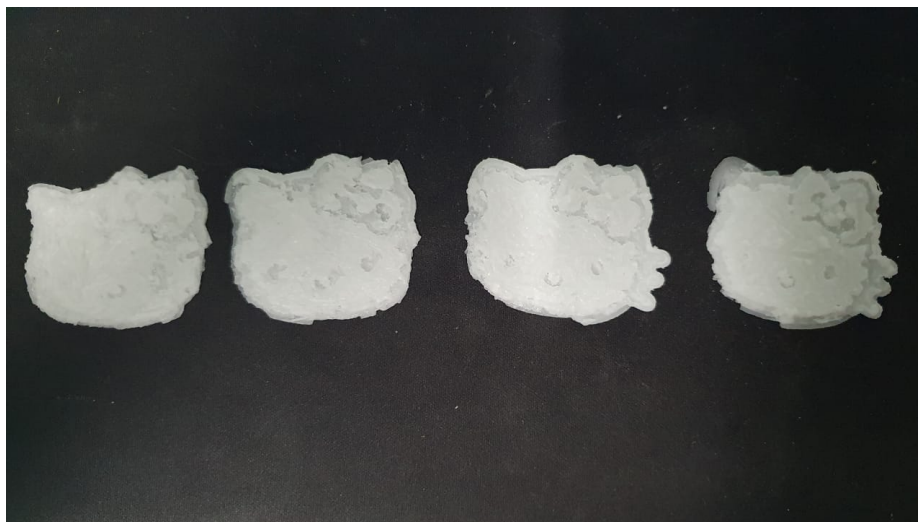


Figura 42: Impresiones con detalles a diferentes temperaturas

Cuando se extruye cera líquida por la boquilla el grosor de línea se mantiene relativamente constante. Este no es el caso para la altura de la línea que puede variar drásticamente. Para la extrusión con cera es extremadamente importante que la boquilla se mantenga cerca de la capa anterior porque tiene que existir contacto entre la cera líquida en la boquilla y la superficie en la que se tiene que adherir. Si existe una separación muy grande, la cera líquida se acumula en la boquilla y falla la impresión. Por esta razón se sobre-estima el flujo de material y se intenta tener una altura de capa baja alrededor de 0.1mm.

Al imprimir a 65°C la cera tiene un comportamiento interesante que ayuda a eliminar el error de la altura de capa. Cuando la impresora se mueve a crear una nueva capa sobre la anterior la punta de la boquilla se mueve y elimina el exceso de material. La temperatura es suficientemente baja que la boquilla no vuelve a derretir el exceso y simplemente se eliminan afuera de las dimensiones de impresión. Dependiendo del diseño que se está imprimiendo, la cantidad de exceso puede variar drásticamente. La Figura 43 y 44 muestran este exceso de material. En impresiones con otros materiales, esta cantidad de exceso es un gasto pero su forma es muy similar a la de los granos originales. Este mismo exceso se puede reciclar y ser usado en otras impresiones.

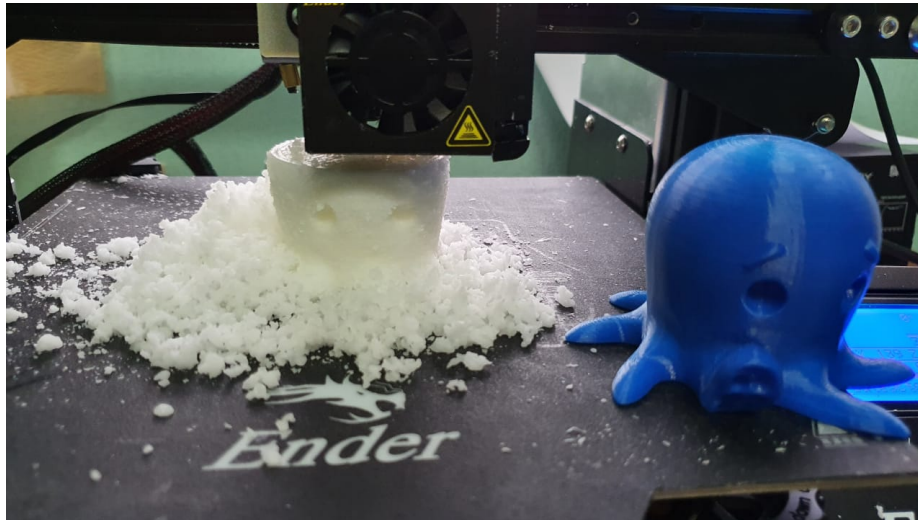


Figura 43: Proceso de Impresión con exceso eliminado



Figura 44: Exceso de cera durante una impresión

Se experimentaron con diferentes cantidades de relleno donde el interior no está completamente relleno de material. La Figura 45 muestra un cohete impreso con un 40 por ciento de relleno y sí logra crear toda la estructura exitosamente.



Figura 45: Un cohete de cera(40% infill)

También se pueden crear objetos sin relleno y solamente con una impresión del contorno de la estructura. Las Figuras 46 y 47 muestran diferentes estructuras que se logran imprimir. Aunque no existe un uso práctico para este tipo de objeto hecho en cera, demuestra que la cera no está limitada a solamente crear objetos sólidos.



Figura 46: Un pequeño florero de cera(0% infill)

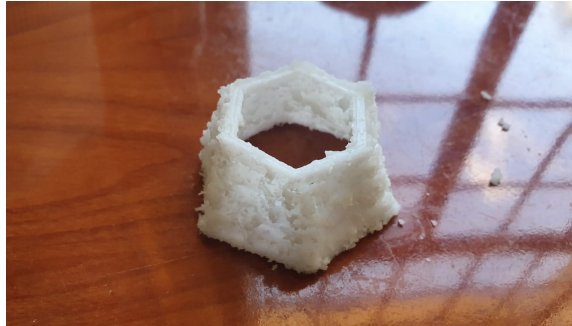


Figura 47: Hexágono angulado(0% infill)

Por último se buscó determinar los límites de ángulos que puede soportar la impresora con la cera parafina. Debido a que el material se extruye en su estado líquido no se esperó lograr ángulos muy grandes. En varias de las impresiones que se realizaron, la impresora no lograba imprimir con ángulos mayores a 45° y solamente logra cambios suaves. Se intentó imprimir un diseño de prueba de ángulos que inesperadamente, resultó ser exitoso en un rango de 30 a 80 grados de la vertical mostrado en la Figura 48. Aunque la impresora logró imprimirlo, todavía tiende a ser común que piezas fallen al intentar imprimir a muchos de estos ángulos. La prueba también falla en términos de detalle donde la superficie inferior y superior no son suaves.



Figura 48: Prueba de ángulos de impresión de 30° a 80°

Aunque se han logrado buenas impresiones, la cera parafina tiene sus limitaciones al momento de imprimir. Al igual que otros materiales impresos en 3D, su estructura es más débil por las capas y esto resulta en una estructura muy frágil que puede separarse en sus puntos débiles durante la impresión. Si las secciones son muy delgadas, también se pueden fracturar fácilmente.

La cera parafina está limitada en los ángulos que puede imprimir, especialmente las superficies superiores requieren de una transición suave. Como en las impresiones del Benchy, la cera no puede crear el techo del bote. También alternativas como el uso de material de soporte está limitado porque es fácil que estos terminen adheridos completamente a la pieza. En muchos casos, es preferible trabajar con un infill grande (50-100%) o imprimir piezas con una mejor transición de la pared al techo.



Figura 49: Impresión de un florero en forma de dos pescados

- Se logró crear una extrusora para la cera parafina que funcionan correctamente en la impresora 3D para crear piezas de este material
- La configuración ideal de operación se encuentra alrededor de 65°C, 400 pasos por milímetro y una altura de capa de 0.1mm. También se requiere una velocidad de impresión lenta de alrededor de 30mm/s
- Se creó un cuadro comparativo entre el PLA, ABS, PETG y la cera parafina que fue útil para la fase de calibración de parametros
- Se diseñó la extrusora en el software CAD Inventor incluyendo el ensamble y los planos
- Se creó un listado de partes completo con todos los componentes necesarios para construir la extrusora
- Se instaló el firmware Marlin con las modificaciones necesarias para controlar la extrusora como cualquier otra impresora 3D.
- Se configuraron los parámetros del slicer para crear un código G compatible y calibrado para el material.
- Se escribió un manual de uso con las configuraciones de Cura y la impresora necesarias para lograr imprimir con la extrusora de cera parafina.

CAPÍTULO 14

Recomendaciones

- Diseñar un cilindro completo de aluminio que permita calentar el material durante el movimiento hacia la boquilla de la extrusora.
- Para controlar la temperatura del espacio de trabajo de la impresora, construir una caja para aislarlo de factores externos como el viento o fluctuaciones en la temperatura ambiente.
- El PETG que se usó para las partes de la extrusora son rígidas y resistentes a las temperaturas a las que se opera, pero probable no son confiables a largo plazo.
- Diseñar un tanque de almacenamiento externo para la cera que sea capaz de alimentar la extrusora sin aumentar el peso del carro del eje X de la impresora.

-
- [1] *ABS Characteristics*. <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/>.
- [2] *Creality 3D Two Phase 4240 REPRAP 42mm Stepper Motor*. <https://www.reprap.me/creality-3d-two-phase-42-40-reprap-42mm-stepper-motor-for-ender-3-3d-printer.html>.
- [3] *Ender 3 Pro 3D Printer*. <https://www.creality.com/goods-detail/ender-3-pro-3d-printer>.
- [4] *Marlin Firware and why is it the top choice for 3D printing*. <https://3dprintingmentor.com/marlin-firmware-and-why-is-it-the-top-choice-for-3d-printing/#:~:text=Firmware%20is%20what%20connects%20software,%2C%20thermal%20regulation%2C%20and%20safety>.
- [5] *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene*. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=eb7a78f5948d481c9493a67f0d089646>.
- [6] *PETG Characteristics*. <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg/>.
- [7] *Polylactic Acid Technical Data Sheet*. https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf.
- [8] *Stepper Motors Basics: Types, Uses, and Working Principles*. <https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>.
- [9] *Viscosity of Paraffin Wax*. <https://wiki.anton-paar.com/en/paraffin-wax/>.
- [10] *New Architecture of Phase Change: Computer-Assisted Ice Construction*, 2006. <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijkkes/ice/>.
- [11] *Wax 3D Printing*, 2016. <https://all3dp.com/2/wax-3d-printing-how-to-3d-print-wax/>.
- [12] *What is a Microcontroller?*, 2016. <https://www.techopedia.com/definition/3641/microcontroller>.
- [13] *Taste the Future: 3D Printing Chocolate at Hershey*, 2018. <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/taste-the-future-3d-printing-chocolate-at-hershey/>.
- [14] *3D Printer Microcontroller - What is it and what do they do?*, 2019. <https://3daddict.com/3d-printer-microcontroller-what-is-it/>.

- [15] *3D Printing Filament*, 2020. <https://www.machinablewax.com/product.php?product=52>.
- [16] Book, Chemical: *Paraffin Wax*. https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB2854418.htm.
- [17] Carolo, Lucas: *What is a 3D Slicer? - Simply Explained*, 2020. <https://m.all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/>.
- [18] Consultants, Dirac Delta: *Specific Heat Capacity*, 20017. <https://web.archive.org/web/20070804192935/http://www.diracdelta.co.uk/science/source/s/p/specific%20heat%20capacity/source.html>.
- [19] Electric, General: *What is Additive Manufacturing*. <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>.
- [20] Flynt, Joseph: *Plastic Pellets for 3D Printing*, 2019. <https://3dinsider.com/3d-printing-plastic-pellets/>.
- [21] Grames, Emmett: *FDM(3D Printing)*, 2019. <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>.
- [22] Greguric, Leo: *What is a DLP 3D Printer?*, 2018. <https://all3dp.com/2/what-is-a-dlp-3d-printer-3d-printing-simply-explained/>.
- [23] Greguric, Leo: *How much do 3D printing materials cost?*, 2019. <https://all3dp.com/2/how-much-do-3d-printer-materials-cost/>.
- [24] H., Valkenaers. F., Vogeler. E. Ferrais. A. Voet. J P Kruth: *A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3D-printing*. KU Leuven, Belgium, 2013.
- [25] Kondo, Hironori: *3D Print Speed: The Perfect Settings for PLA and More*, 2020. <https://all3dp.com/2/3d-printing-speed-optimal-settings/>.
- [26] Makers, Association European Candle: *Rae Materials and candles production process*. <https://europecandles.org/raw-materials-and-candles-productionprocesses>.
- [27] Manufacturing, Additive: *AM Basics*. <https://additivemanufacturing.com/basics/>.
- [28] Mensley, Matthew: *3D Printer Extruder - The Ultimate Guide*, 2019.
- [29] Moyer, Ilan: *Principle of Operation*, 2012. <https://corexy.com/theory.html>.
- [30] Speight, James PhD, DSc: *Fouling in Refineries*. 2015.
- [31] Varnak: *Why Your Next 3D Printer Should Use a 32 Bit Controller*, 2019. <https://mechlab.cc/why-your-next-3d-printer-should-use-a-32-bit-controller/#:~:text=The%20advantages%20of%20a%2032,to%20introduce%20overextrusion%20and%20zits>.
- [32] Varotsis, Alkaios: *Introduction to +FDM 3D Printing*. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>.
- [33] Varotsis, Alkaios: *Introduction to SLA 3D Printing*. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>.
- [34] Yusuf, Bulent: *3D Printers Explained: Delta, Cartesian, Polar, Scara*, 2015. <https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-deltapolar-and-scara/>.

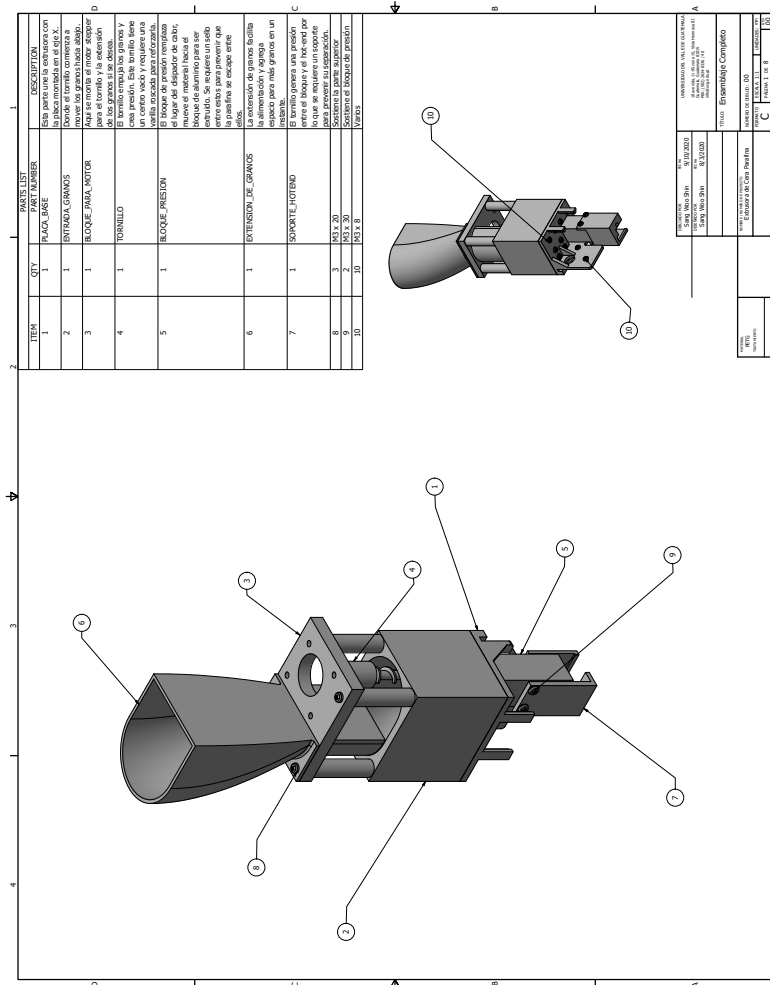


Figura 50: Plano del ensamblaje

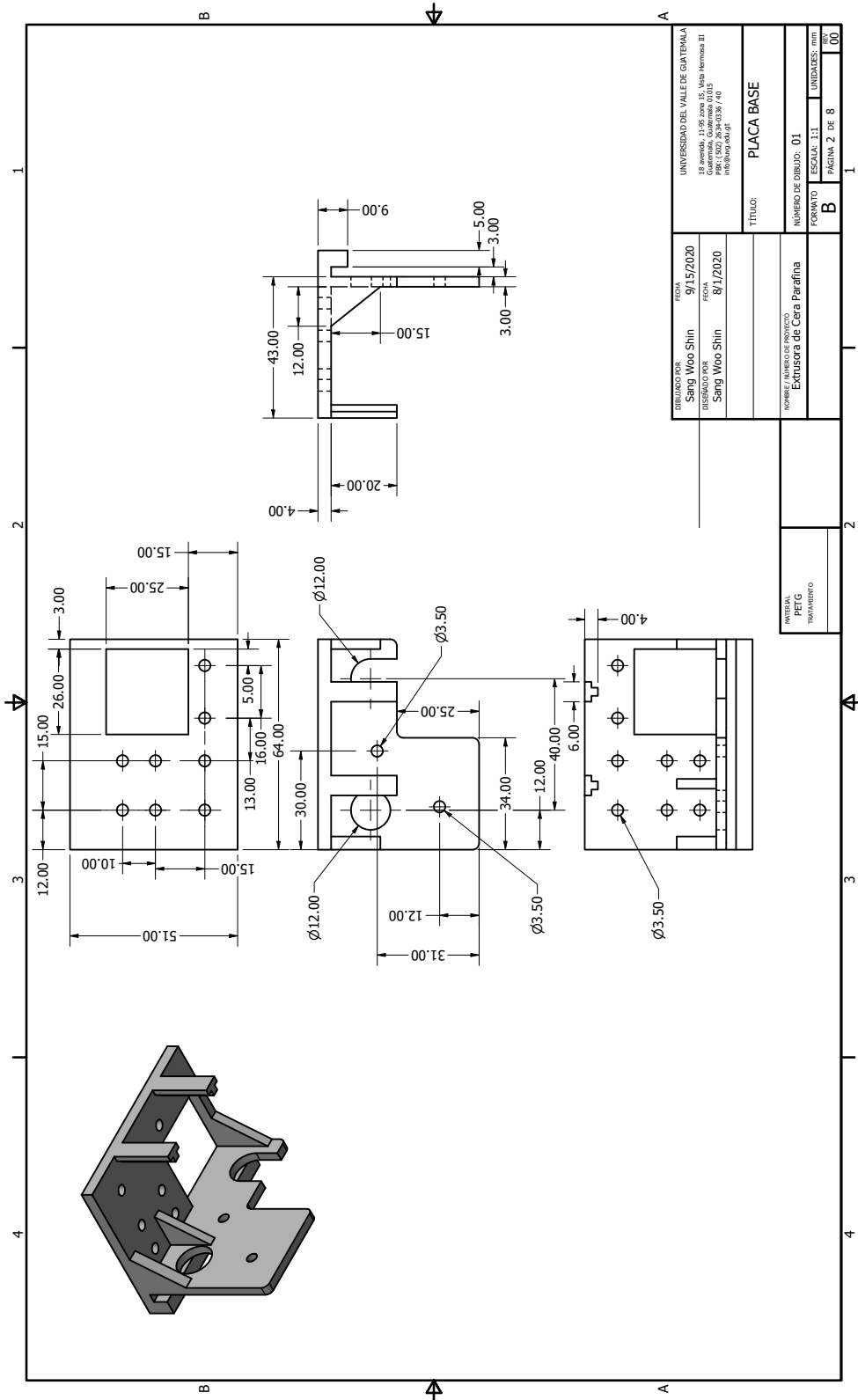


Figura 51: Plano de la placa base

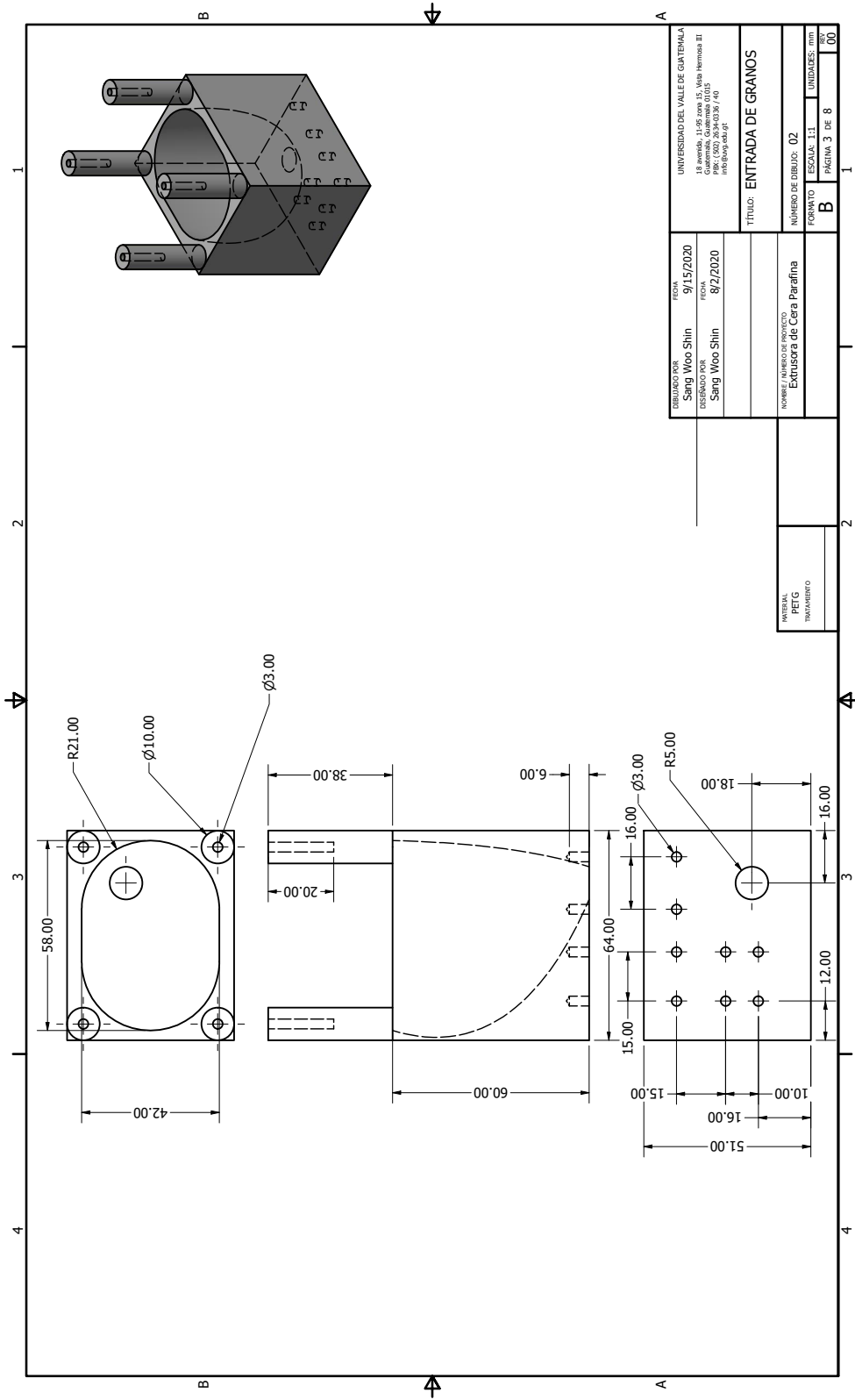


Figura 52: Plano de la entrada de los granos

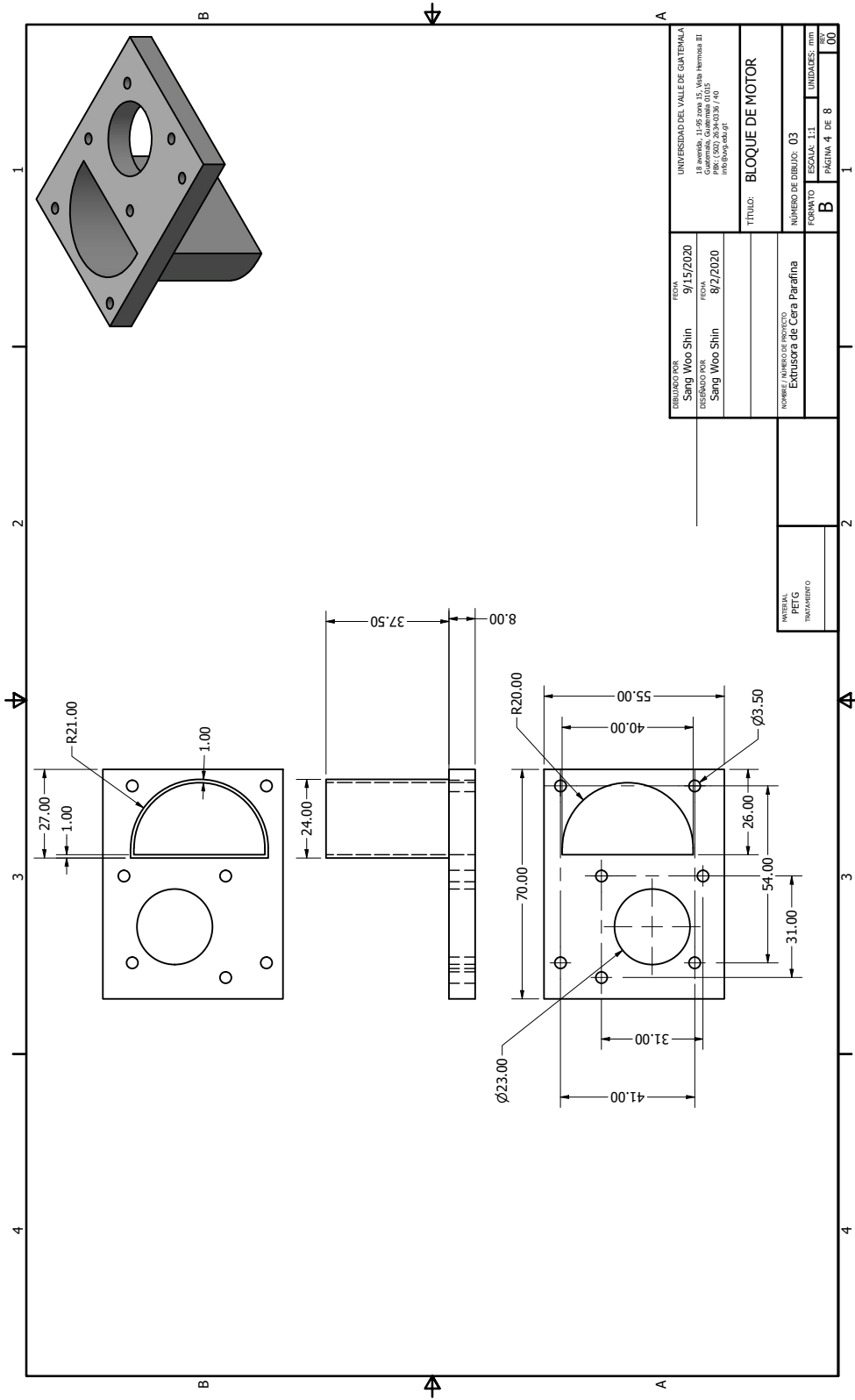


Figura 53: Plano del bloque para el motor

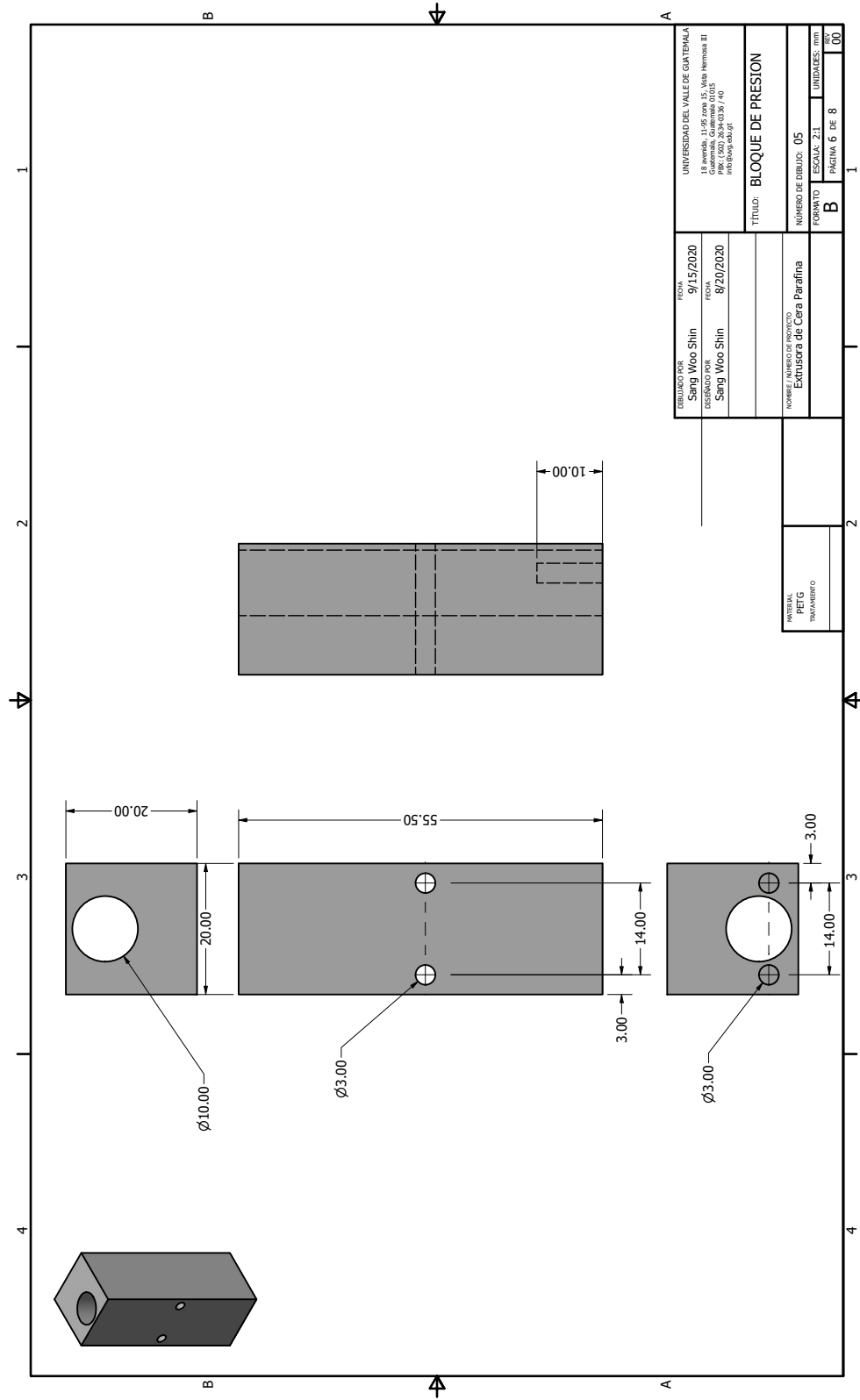
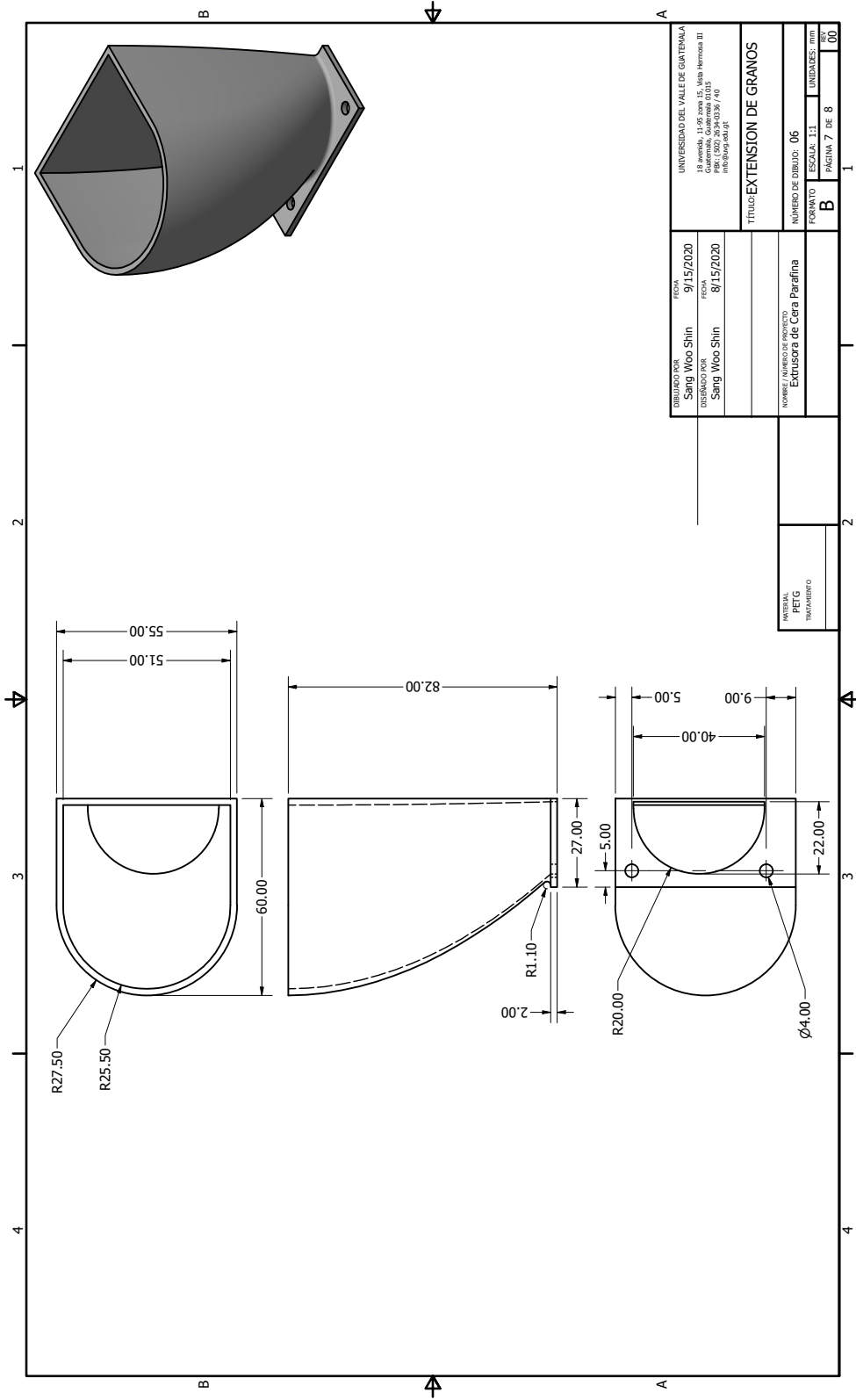


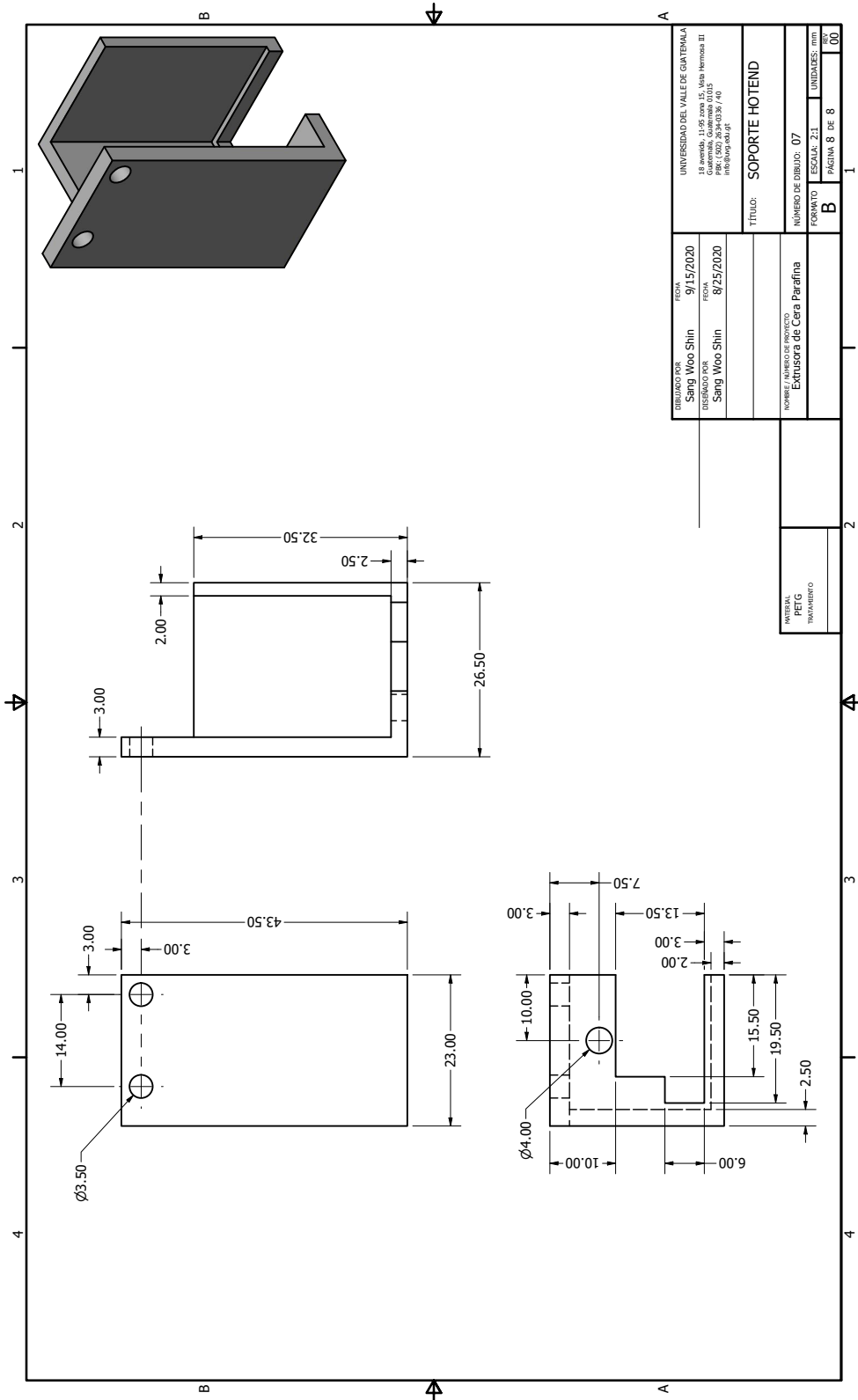
Figura 55: Plano del bloque de presión



DIBUJADO POR Sang Woo Shin	FECHA 9/15/2020	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida 14 de Septiembre, 15. Mesa Terminal III Guatemala, Guatemala 01035 P.O. BOX 20-91-0336 / 40 Tel: +502 2419 2019
DISEÑADO POR Sang Woo Shin	FECHA 8/15/2020	
TÍTULO-EXTENSION DE GRANOS		
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Extrusora de Cera Parafina		
NÚMERO DE DIBUJO: 06		
FORMATO		ESCALA: 1:1
B		PÁGINA 7 DE 8
		UNIDADES: mm
		00

MATERIAL PETG TRATAMIENTO

Figura 56: Plano de la extensión de la alimentación de los granos de cera



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida 14 de Abril, 15. Mesa Terminal III Guatemala, Guatemala 01035 P.O. Box 100-00-0336 / 40 Tel: (502) 241-1000	FECHA 9/15/2020	DIBUJADO POR Sang Woo Shin
TÍTULO: SOPORTE HOTEND	FECHA 8/25/2020	DISEÑADO POR Sang Woo Shin
NÚMERO DE DIBUJO: 07	NOMBRE / NOMBRE DE PROYECTO Extrusora de Cera Parafina	
FORMATO PAGINA 8 DE 8	ESCALA: 2:1	
UNIDADES: mm	TRATAMIENTO	

Figura 57: Plano del soporte para el Hot-end y el bloque de presión

B.1. Configuración de material

Para poder imprimir en la impresora 3D de cera parafina, se tiene que tener un código G con las configuraciones correctas. En el slicer Cura, tendrá que agregar un nuevo material presionando 'Ctrl + K'. En las configuraciones de impresión es necesario modificar la temperatura de operación a 65°C.

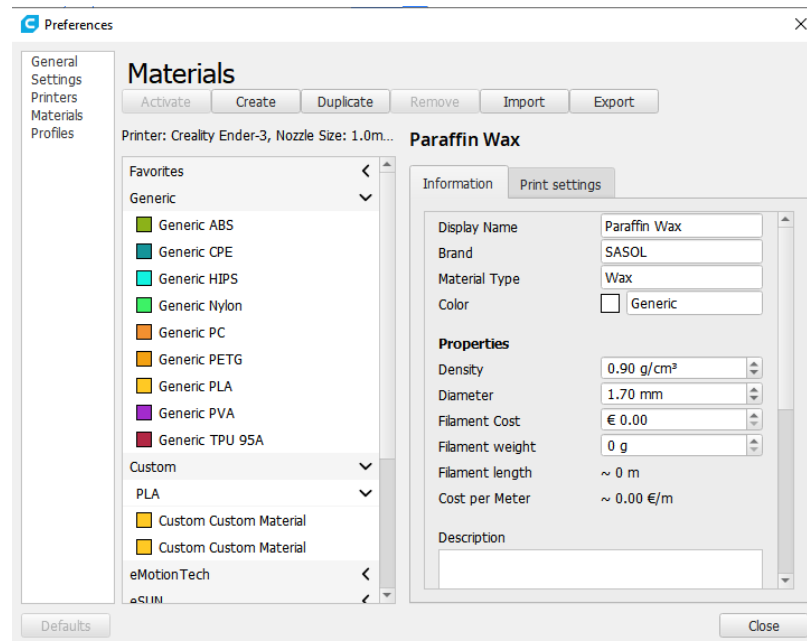


Figura 58: Configuraciones de materiales en Cura

B.2. Parámetro de impresión

En las configuraciones de impresión se tienen que de cambiar los parámetros a los valores indicados en la Tabla 6 en los resultados. Estas configuraciones estan hechas específicamente para la cera SASOL y puede ser que se requieran valores diferentes para diferentes marcas de cera parafina.

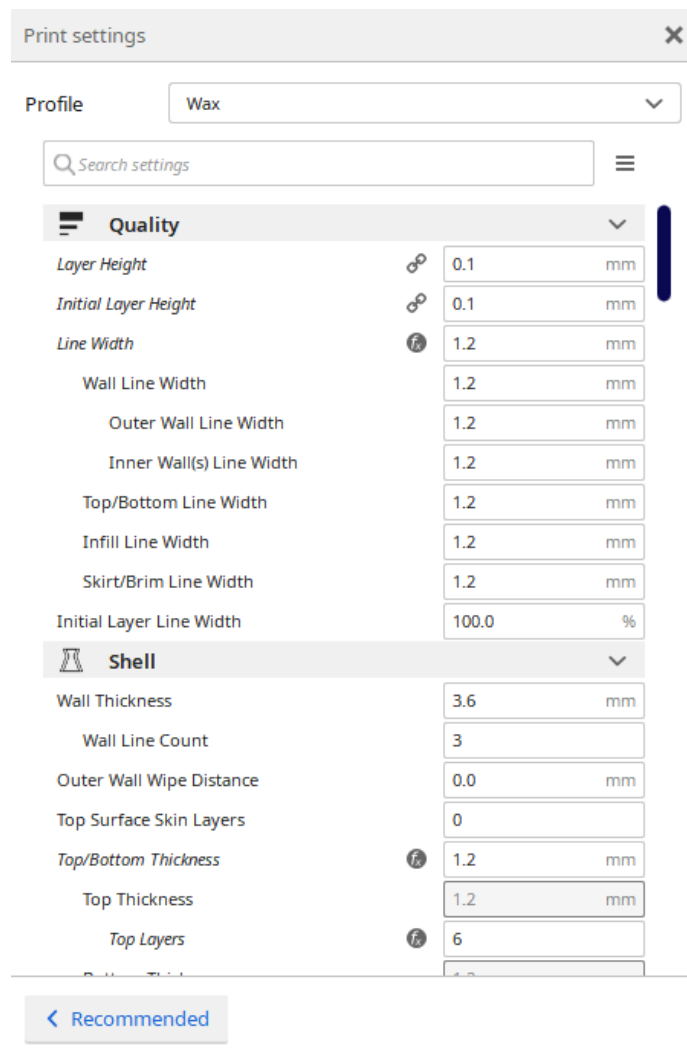


Figura 59: Configuración de parámetros de impresión para Cura

Ahora se puede extraer el modelo 3D deseado (formato STL) y presionar el botón de 'Slice' para crear el código G. Se puede verificar la trayectoria que sigue en la ventanilla de 'Preview'. Hay que tomar en consideración las limitaciones de la cera parafina en las impresoras. Finalmente se puede exportar a la tarjeta SD.

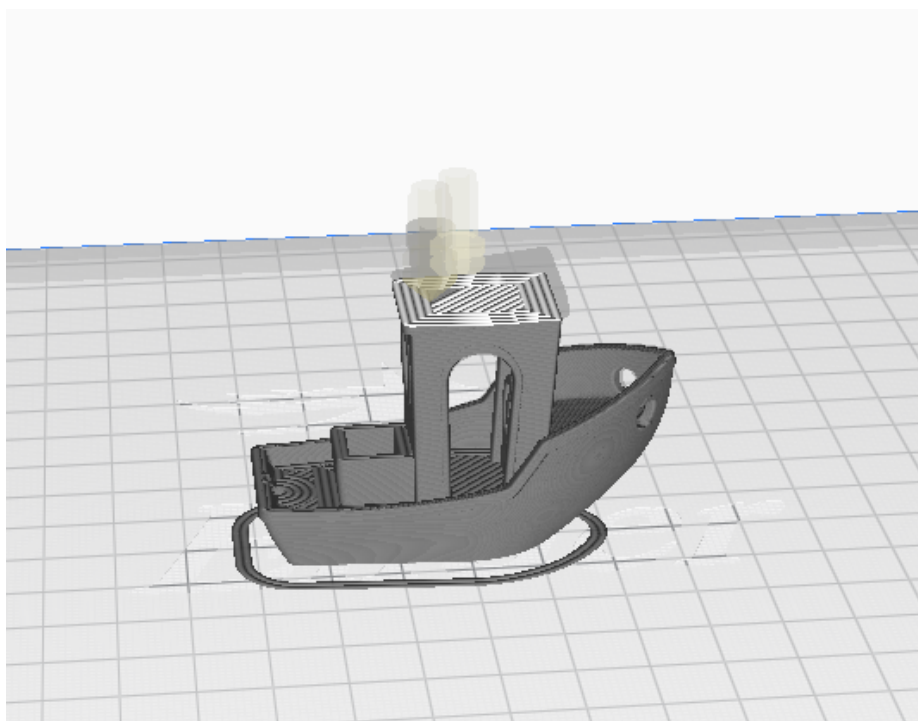


Figura 60: Prevista del movimiento que tendrá la impresora

B.3. Configuración en la impresora

Antes de imprimir la pieza hay que verificar que los pasos por mm de la impresora están correctas. Estos valores se encuentran en las Configuraciones > Avanzado > Pasos/mm > E pasos/mm. La opción de pasos/mm no aparecerá si la impresora está en movimiento. Hay que ver que este valor sea 400 pasos/mm.



Figura 61: Configuraciones avanzadas en la impresora

Alimente la extrusora con los granos de cera parafina. Incremente la temperatura a 65-75°C y mueva la extrusora hacia la dirección positiva hasta que la boquilla mantenga un flujo constante de cera líquida.



Figura 62: El tornillo de la extrusora con granos de cera parafina

B.4. Preparación de la impresora

Es necesario nivelar la cama caliente para poder tener una buena primera capa durante la impresión. Este se puede lograr utilizando un pedazo de papel y moviéndolo entre la boquilla y la cama. Cuando cada esquina de la cama muestre un poco de fricción en el papel, gire el nivelador de cada esquina un cuarto de revolución más. Finalmente se puede imprimir el objeto que se puede encontrar en la opción Print from Media.

B.5. Calibraciones adicionales

Si la impresora no esta funcionando correctamente o se desea calibrar con una cera parafina diferente, se recomienda incrementar los pasos por milímetro primero. Si este falla, se puede regresar los pasos por mm originales e incrementar la temperatura en intervalos de 2°C, repitiendo estos pasos si continua fallando.

Al encontrar parámetros ideales, se pueden guardar estas configuraciones desde la impresora para que no se borren al apagar la máquina. En las configuraciones se puede presionar la opción de "Store Settings" para guardar las configuraciones actuales.

Construcción de la extrusora

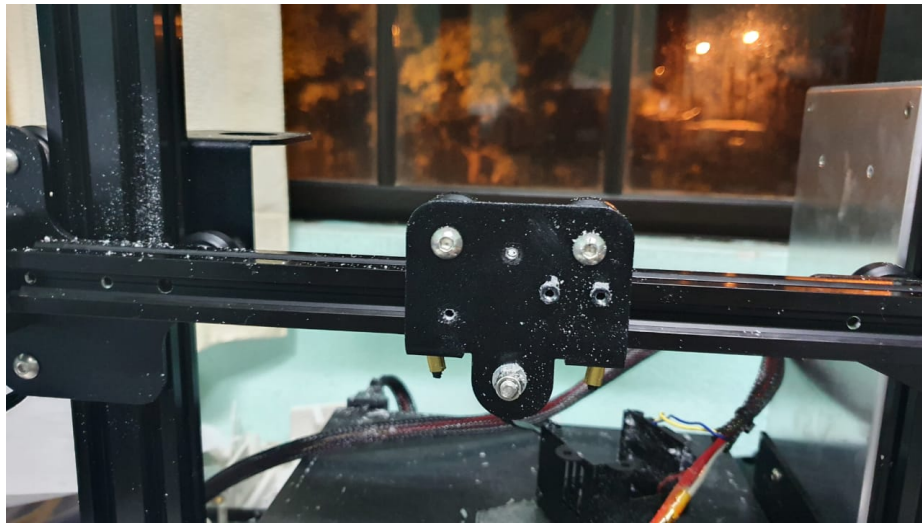


Figura 63: Desarmar toda la extrusora, los ventiladores y el hot-end



Figura 64: Separar el disipador de calor del bloque de aluminio

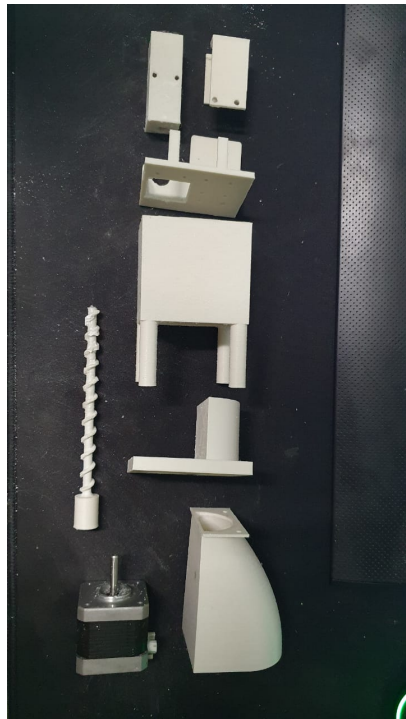


Figura 65: Todas las piezas impresas

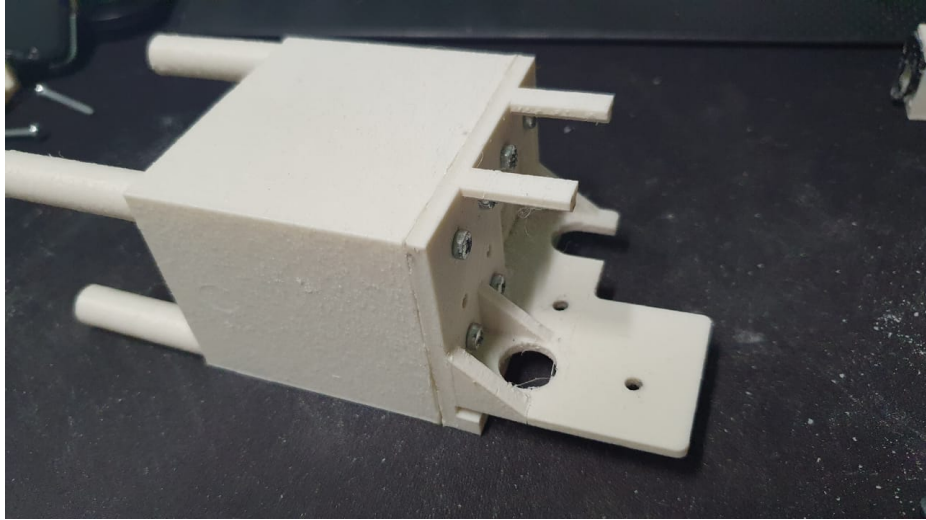


Figura 66: Unir la placa base con la entrada de los granos



Figura 67: Montar la placa a la impresora

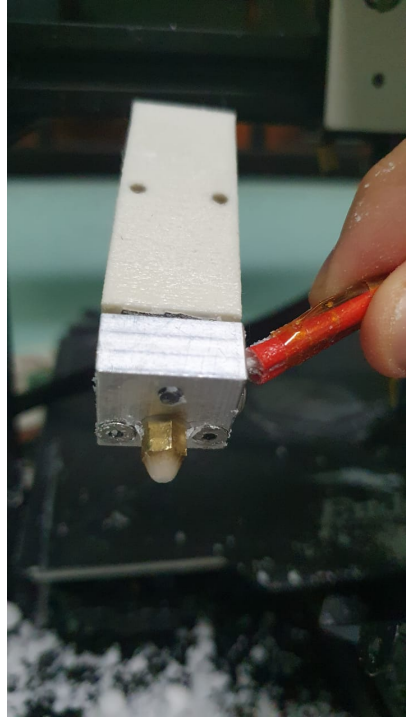


Figura 68: Usar los tornillos del bloque de aluminio para unirlo al bloque de presión

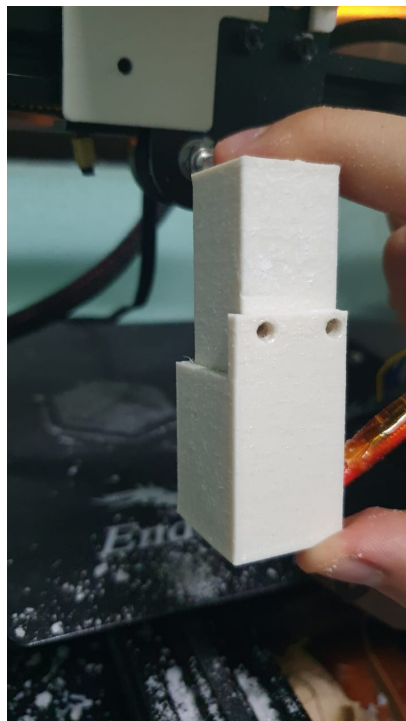


Figura 69: Colocar el soporte del hot-end

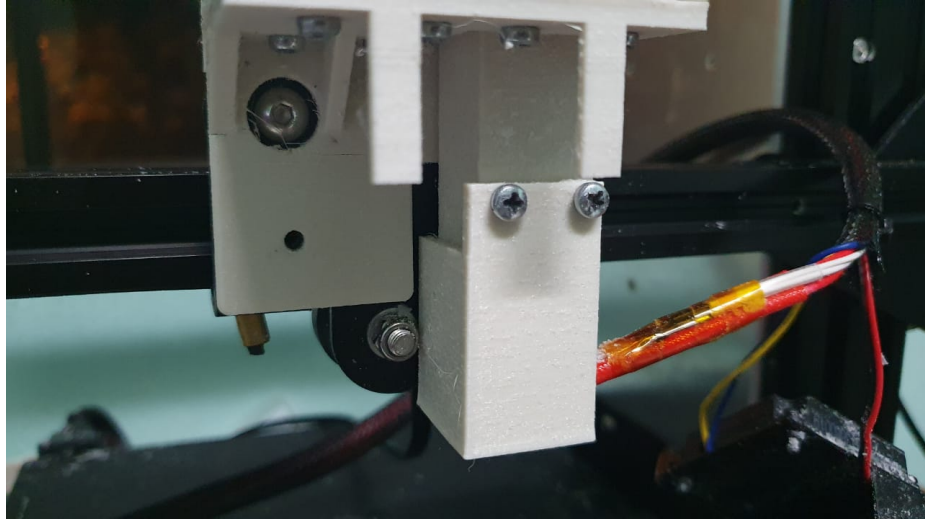


Figura 70: Usar los tornillos M3x30 para asegurarlo a la impresora

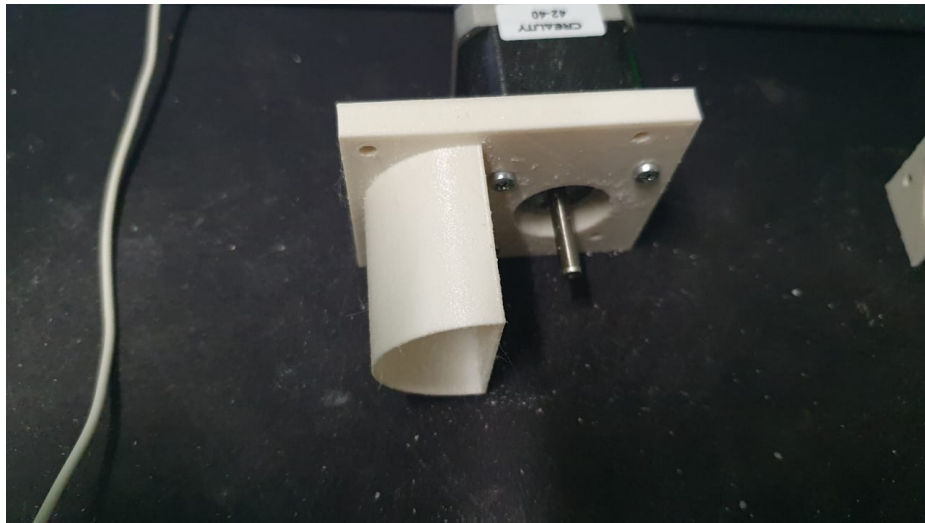


Figura 71: Se coloca el motor stepper con tornillos M3x8



Figura 72: Se agrega el tornillo al eje del motor

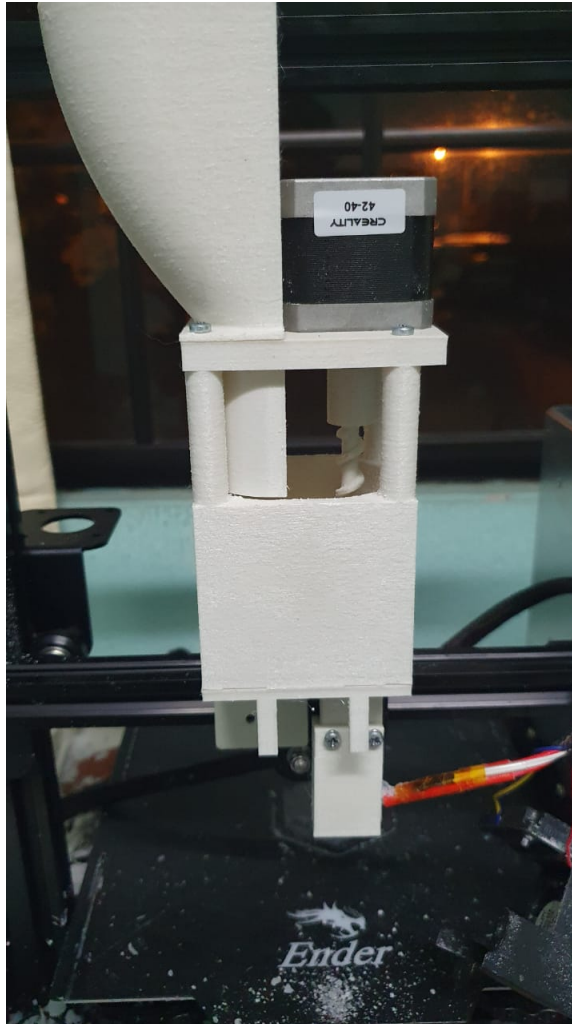


Figura 73: Colocar el bloque del motor a la parte superior de la placa

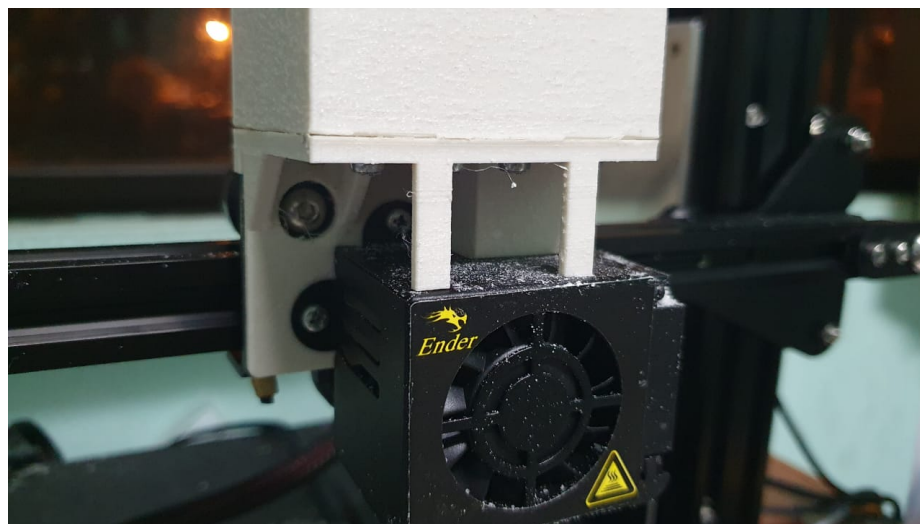


Figura 74: Regresar los ventiladores a su posición original

ANEXO D

Impresiones realizadas



Figura 75: Benchy a 70°C

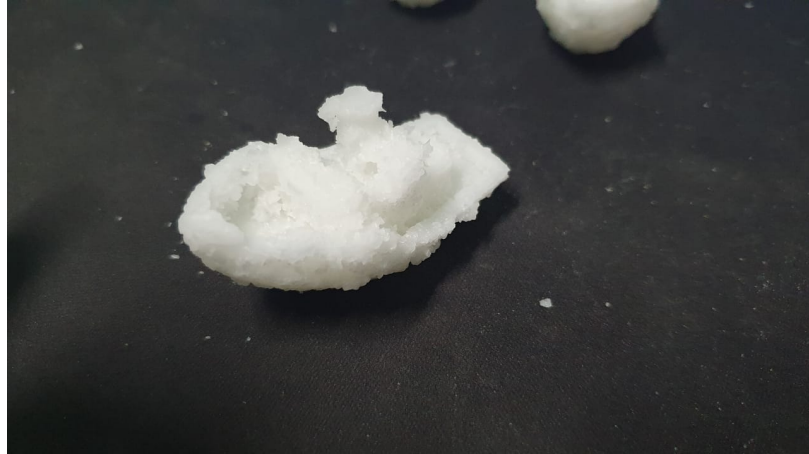


Figura 76: Benchy V2



Figura 77: Benchy V3



Figura 78: Benchy V4



Figura 79: Cilindro con superficie hexagonal

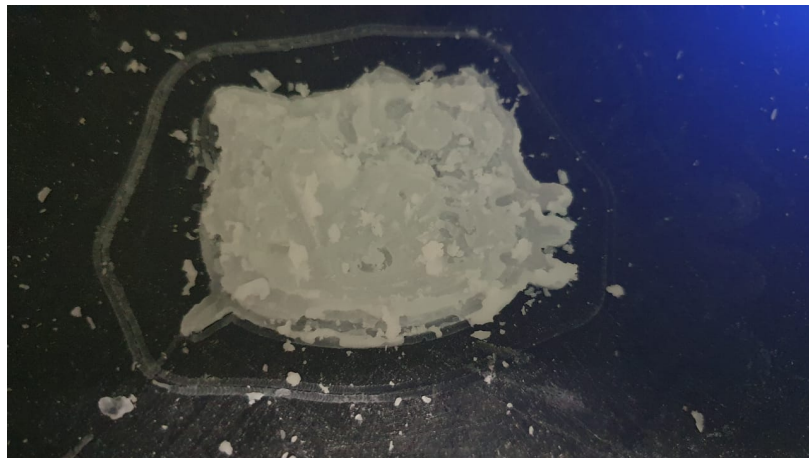


Figura 80: Impresión de detalles



Figura 81: Pulpo impreso

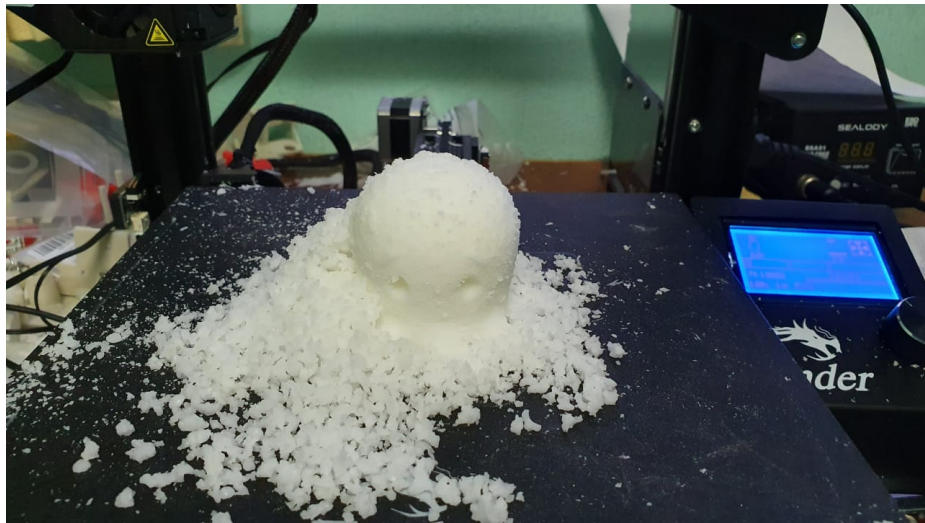


Figura 82: Pulpo con exceso

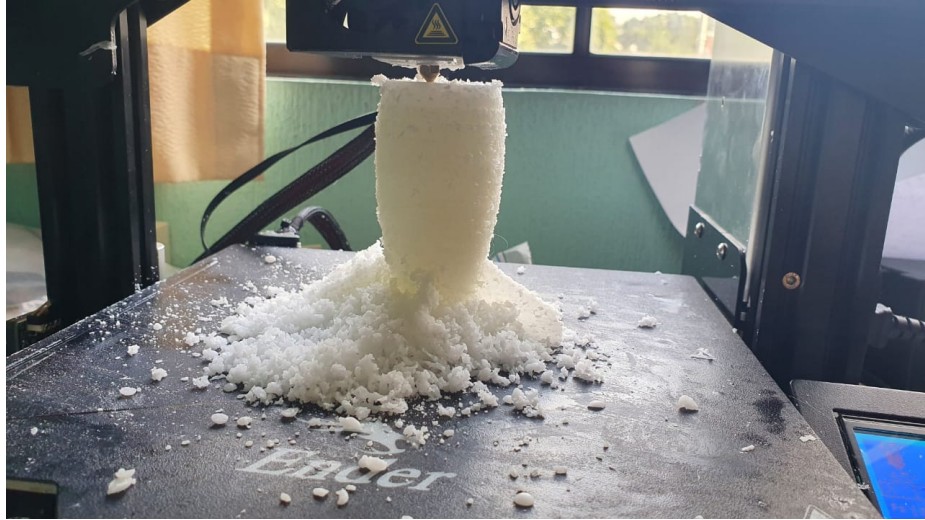


Figura 83: Proceso de impresión del cohete



Figura 84: Florero de cera vacío

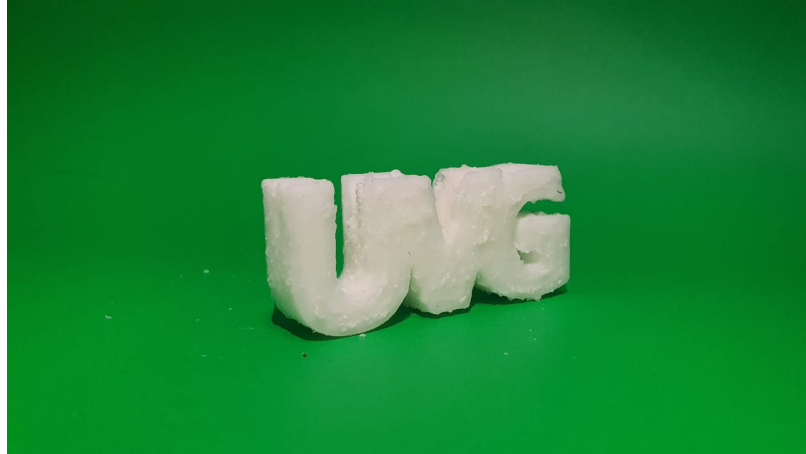


Figura 85: Logo UVG en cera



Figura 86: Logo UVG en cera B



Figura 87: Objeto de cera con puente



Figura 88: Objeto de cera con puente B



Figura 89: Florero de pesados



Figura 90: Vela de cohete



Figura 91: Cohete encendido



Figura 92: Cráneo de cera A



Figura 93: Cráneo de cera B



Figura 94: Cráneo de cera C



Figura 95: Cráneo de cera encendido



Figura 96: Florero de cera vacío



Figura 97: Conjunto de impresiones de cera creadas



Figura 98: Conjunto de impresiones de cera encendidos