



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**APLICACIÓN DE BIOPLÁSTICOS COCINADOS A BASE
DE AGAR-AGAR Y ALMIDÓN DE PAPA EN
TECNOLOGÍAS DE MANUFACTURA ADITIVA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO.

NICOLÁS EDUARDO CAMPOS GÓMEZ.

PROFESOR GUÍA
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
DANISSA PERIC.
JUAN CRISTÓBAL ZAGAL.

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: NICOLÁS EDUARDO CAMPOS GÓMEZ
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

APLICACIÓN DE BIOPLÁSTICOS COCINADOS A BASE DE AGAR-AGAR Y ALMIDÓN DE PAPA EN TECNOLOGÍAS DE MANUFACTURA ADITIVA.

La pandemia del coronavirus produjo una crisis sanitaria a nivel mundial, donde los países trataban de abastecerse con insumos médicos para poder tratar a sus contagiados. Ante la escasez de estos elementos por las cuarentenas que se daban a nivel mundial, países con menor poder adquisitivo se veían desfavorecidos. En este contexto personal del Fablab de la universidad de Chile se da cuenta de la hiperdependencia del país respecto a la adquisición de materias primas para la fabricación de productos de otras naciones, además de observar los modelos actuales económicos, donde se generan desechos que terminan en vertederos y ecosistemas causando daños en ellos.

En este escenario se crea el Nodo de Bio-fabricación digital, el cual busca desarrollar una red de laboratorios a nivel global utilizando desechos como materia prima amigable con el medio ambiente e implementarlos a procesos de manufactura por medio de un set de máquinas creadas para este propósito. En este contexto se desarrolla este trabajo de título, el cual tiene como objetivo aplicar bioplásticos a base de agar-agar y almidón de papa en tecnologías de impresión 3D, mediante el método de deposición de material fundido (FDM).

Se realizan experimentos preliminares de generación de capas, almacenamiento de los bioplásticos utilizados y temperatura de aplicación, de los cuales se obtienen parámetros de diseño para desarrollar un equipo que se implementa en una impresora de la marca Creality modelo ender 3. El equipo concebido cuenta con un sistema de almacenamiento, propulsión y un extrusor, con una capacidad de almacenamiento de 205 [cc] y la capacidad de imprimir los bioplásticos a temperaturas de impresión sobre los 100 [°C].

El equipo implementado en la impresora seleccionada permite realizar pruebas de temperatura de extrusión, temperatura de cama de impresión, variación de glicerina, variación de velocidad y ángulos de impresión, donde se concluye que el bioplástico a base de almidón puede ser impreso mediante el método de deposición de material fundido, y sus características como textura, color, calidad y unión de capas varían según la configuración de parámetros de impresión. El bioplástico a base de agar-agar no pudo realizarse pruebas de impresión 3D pero en los experimentos preliminares pudo ser aplicado manualmente por método FDM y almacenado, mostrando potencial para esta aplicación proponiendo estudios y mejoras posteriores de lo desarrollado en este estudio.

*Para Florencia y Mateo,
siempre los recordaré.*

Agradecimientos

En este largo proceso debo agradecer a cada uno de los que estuvo presente, incondicionalmente y a los que estuvieron fugazmente en mi vida, pero que dejaron grandes enseñanzas.

Agradecer a mi familia, aunque pueda diferir muchos con ellos siempre han estado preocupados de lo que me acontecía.

Al equipo masculino de Balonmano de la Facultad, donde pasé la mayoría del tiempo y conocí grandes personas, descubriendo mutuamente nuestras fortalezas y debilidades, haciendo que cada momento feliz y triste de la vida se pasará en la 40x20 y donde aplicamos la 3:2:1 en más de una ocasión, fuera del campo de juego. Al equipo femenino de Balonmano, “*las Chicas*”, las cuales me mostraron como se podían superar en cada entrenamiento y partido. A sus entrenadores: Víctor y Seba, ya en la distancia puedo apreciar que sus enseñanzas pueden ser implementadas a cada situación de la vida, lo mejor que aprendí de la universidad vino de ustedes.

A la gente de IMASPA que me mostró que las cosas se pueden hacer diferente por un tema de convicción y que tratan de enseñarme en cada momento como ser un buen profesional.

A mis amigos. Melissa mi gran amiga que deja la universidad, gracias por escucharme y estar ahí en los momentos más difíciles y disfrutar conmigo en los buenos. Aníbal mi compañero de parrandas, agradecer todo lo que has hecho por mí. Maruri desde 8vo básico dando el apañe, gracias por cada minuto compartido y por no enojarte por ser mejor en Smash. Los amo.

Por último, a Liese, gracias por estar junto a mí en todo este tiempo, el soporte y la confianza que me entregas día a día. Ik hou van jou.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo principal	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	Alcances y limitaciones	2
2.	Antecedentes	3
2.1	Nodo de bio-fabricación	3
2.2	Bioplásticos	5
2.2.1	Bioplásticos cocinados.	5
2.2.2	Agar-agar	8
2.2.3	Almidón	9
2.3	Impresión 3D	11
2.3.1	Deposición de material fundido	11
2.3.2	Partes de una impresora 3D	11
2.3.3	Parámetros de impresión 3D.	12
2.3.4	Firmware	13
2.3.5	CURA	13
2.3.6	Curvas de selección de un motor.	14
3.	Metodología	16
3.1	Equipos	16
3.1.1	Legato 200 series	16
3.1.2	Creality ender 3	17
3.2	Denominación	18
3.3	Experimentos preliminares	19
3.3.1	Generación de capas	19
3.3.2	Decantación	20
3.3.3	Almacenamiento hermético	20
3.3.4	Variación de agua	21
3.3.5	Calentado posterior	22
3.4	Selección de parámetros	23

3.5	Diseño del equipo y selección de componentes	23
3.6	Construcción e implementación	23
3.7	Calibración	23
3.8	Pruebas de impresión 3D	24
3.8.1	Temperatura de impresión	24
3.8.2	Temperatura cama de impresión	25
3.8.3	Variación de glicerina	25
3.8.4	Velocidad de impresión	26
3.8.5	Ángulos	27
4.	Resultados experimentación y Diseño de equipo.	28
4.1	Experimentos preliminares	28
4.1.1.	Generación de capas	28
4.1.2.	Decantación	29
4.1.3.	Almacenamiento hermético	31
4.1.4.	Variación de agua	32
4.1.5.	Calentado posterior	33
4.2	Selección de componentes	37
4.3	Diseño del equipo	40
4.3.1.	Extrusor	41
4.3.2.	Contenedor	44
4.3.3.	Sistema propulsor	47
4.4	Configuración de impresora	50
5.	Resultados de Impresión	53
5.1.	Temperatura de impresión	53
5.2.	Temperatura de Cama de impresión	56
5.3.	Variación de Glicerina	57
5.4.	Variación de Velocidad de impresión	61
5.5.	Ángulos	65
6.	Discusión y mejoras	66
7.	Conclusiones	69
8.	Bibliografía	71
	Anexos.	73
	Anexo A: Memoria de cálculo	73

A.1. Calor específico de la mezcla	73
A.2. Selección de motor	73
A.3. Cálculo de resistencia térmica	74
Anexo B: Tablas variación de velocidad	75
B.1. 20 [mm/s]	75
B.2. 25 [mm/s]	75
B.3. 30 [mm/s]	76
B.4. 35 [mm/s]	76
Anexo C: Figuras	77
C.1. Generación de capas	77
C.2. Almacenamiento Hermético.	79
C.3 Decantación	83
C.4. Calentado posterior	85
C.5. Equipo.	91
C.6. Pruebas de impresión	97
Anexo D: Planos	115

Índice de Ilustraciones

Figura 1: Biomixer. Fuente Fablab U. de Chile.....	3
Figura 2: Rotomoldeadora de biomateriales, modelo 3d. Fuente Fablab U. de Chile.....	4
Figura 3: Bioformadora, Fuente Fabla U. de Chile.....	4
Figura 4: Bioprinter, cabezal de extrusión. Fuente Fablab U. de Chile.....	5
Figura 5: Biomaterial a base de borra de café. a la izquierda se puede observar el material con conservante en su receta. A la derecha, el mismo biomaterial sin conservante que formo un hongo en su superficie (sector blanco). Fuente: elaboración Propia.....	7
Figura 6: Gelificación y retrogradación del almidón.....	8
Figura 7: Grafico de viscosidad aparente versus tase de corte para distintos grados de gelatinización. Fen Xu. (2021) “Physicochemical and Structural Characterization of Popato Starch with Different Degrees of Gelatinization”.....	8
Figura 8: Aplicación de plástico basado en Agar-agar utilizado como empaque de pasta.. Fuente https://margaritatalep.com/Desintegrame	9
Figura 9: Distintos granos de almidón.....	10
Figura 10: plástico basado en almidón.....	10
Figura 11: Partes de una impresora 3D.....	12
Figura 12: ángulo de paredes en la impresión 3D.....	13
Figura 13: Interfaz del software CURA. Pieza de diseño propio para imprimir en una impresora Ender CR10.....	14
Figura 14: Grafica de torque vs velocidad para motores NEMA 23 de la empresa stepIM.....	15
Figura 15: Metodología de trabajo.....	16
Figura 16: Equipo de bombeo de jeringas Legato 200 series, fuente kdScientific.....	17
Figura 17: Impresora Ender 3. fuente creaity.com.....	18
Figura 18: Generación de capas con bioplástico a base de almidón. Elaboración propia.....	28
Figura 19: Generación de capas con agar-agar.....	29
Figura 20: Decantación de mezcla de bioplástico a base de almidón calentada hasta 45 °C, con un tiempo de reposo de 3 [min].....	30
Figura 21: Decantación de mezcla de bioplástico a base de agar-agar calentada a 45°C, con un tiempo de reposo de 3 [min] aproximados.....	30
Figura 22: Línea de bioplástico a base de almidón almacenada en jeringa durante 2 días.....	31
Figura 23: Línea de bioplástico a base de agar-agar almacenada en jeringa durante 3 días.....	32
Figura 24: Gelatinización total de bioplástico de agar-agar al ser calentado sobre su temperatura de gelatinización.....	32
Figura 25: Resultados de calentado posterior para bioplástico a base de almidón. En la figura superior calentado alrededor de 92 [°C]. En el parte inferior, el mismo biomaterial calentado hasta 72[°C] donde en los recuadros rojos se indica el corte de la línea generada.....	35
Figura 26: Calentado posterior para bioplásticos a base de Agar-Agar. en la parte superior, muestra calentada hasta los 90[°C]. en la parte inferior muestra a temperatura ambiente, donde se aprecia un corte de la línea después de ser aplicada.....	36
Figura 27: Resistencia térmica de boquilla seleccionada.....	37
Figura 28: Conectores rápidos: a la izquierda conector macho NPT 1/2 ". A la derecha unión PQ-MPQ de 1/2". Imágenes referenciales.....	37

Figura 29: Relé modelo SSR-25DA de FOTEK.....	38
Figura 30: Motor NEMA 17 con sistema de reducción 5:1.....	39
Figura 31: Poleas dentadas seleccionadas. Ala izquierda polea GT2-6 de 60 dientes. A la derecha polea dentada GT2-6 de 20 dientes.....	39
<i>Figura 32: Husillo TR8 con paso de 2[mm] y 4 hilos con su tuerca de latón. Imagen referencial</i>	40
Figura 33: Equipo diseñado implementado en impresora ender 3.....	40
Figura 34: Cuerpo del extrusor diseñado en software C.A.D. Vista en corte. Elaboración propia.	42
Figura 35: Extrusor.....	43
Figura 36: Instalación de extrusor en el carro del eje x de la impresora creality ender 3.....	43
Figura 37: Simulación computacional que entrega la pérdida de presión en el contenedor según el diámetro del agujero de salida.	45
Figura 38: Embolo diseñado. A la izquierda parte de ABS del embolo en software C.A.D. A la derecha vista alzada del émbolo con su parte de silicona.	46
Figura 39: Parte inferior del contenedor.....	47
Figura 40: Contenedor diseñado. Modelo en 3D.	47
Figura 41: Interior del sistema de reducción, modelo tridimensional.	48
Figura 42: Pieza de PLA que une la vara roscada con el embolo.....	49
Figura 43: Sistema propulsor junto a contenedor en su posición final, modelo 3D.	50
Figura 44: Configuración de pasos por milímetro para motores stepper de la impresora.....	50
Figura 45: Conexión de resistencia de boquilla junto a relé.	51
Figura 46: Parámetros para constantes del control PID.	51
Figura 47: Parámetros ingresados a CURA para configuración de impresora ender 3D.....	52
Figura 48: Impresión de bioplástico a base de agar-agar a 60 [°C]	53
Figura 49: Impresión de bioplástico a base de agar-agar a 80 [°C]	53
Figura 50: Impresión de bioplástico a base de agar-agar a 90 [°C]	54
Figura 51: Bioplástico a base de almidón impreso a 80 [°C].....	55
Figura 52: Impresión de bioplástico a base de almidón a 90 °C	55
Figura 53: Impresión de bioplástico a base de almidón a 100 °C.....	55
Figura 54: Impresión de bioplástico a base de almidón con T° de cama de impresión de 80 [°C]	56
Figura 55: Impresión con receta ST-W060-0600.....	58
Figura 56: Impresión con receta ST-W060-0608.....	59
Figura 57: Impresión con receta ST-W060-0620	60
Figura 58: gráfico comparativo del porcentaje de reducción de cada receta.	61
Figura 59: Prueba de velocidad de impresión a 20 [mm/s].	62
Figura 60: Prueba de velocidad de impresión a 25 [mm/s].	63
Figura 61: Prueba de velocidad de impresión a 30 [mm/s].	63
Figura 62: Prueba de velocidad de impresión a 35 [mm/s]. Arriba 80 [°C]. Abajo 90 [°C]	64
Figura 63: Impresión con almidón para ángulo de 75°.	65
A. 1: Experimento de generación de capas con Agar-Agar 1.	77
A. 2: Experimento de generación de capas 2.	77
A. 3: Experimento de generación de capas con almidón. figura triangular.....	78

A. 4: Experimento generación de capas con almidón. cuerpo triangular vista lateral.....	78
A. 5: Experimento de generación de capas con almidón. distintas figuras.	78
A. 6: Bioplástico a base de almidón almacenado en jeringas para prueba.	79
A. 7: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 1	79
A. 8: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 2	80
A. 9: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 3	80
A. 10: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 4	81
A. 11: líneas secas de bioplástico almacenado durante 2 días en jeringas.	81
A. 12: Líneas secas realizadas con bioplástico con 5 días almacenado en jeringa.	82
A. 13: Línea con bioplástico a base de Agar Agar. Almacenada durante 3 días.....	82
A. 14: Prueba de decantación con receta AA-W200-1210 a 45 [°C]	83
A. 15: Prueba de decantación con receta AA-W200-1210 a 65 [°C]	83
A. 16: Prueba de decantación con receta ST-W060-0606 a T° ambiente.	84
A. 17: A. 16: Prueba de decantación con receta ST-W060-0606 a 45 [°C]	84
A. 18: A. 16: Prueba de decantación con receta ST-W060-0606 a 60 [°C]	85
A. 19: prueba de calentado posterior agar agar. T° ambiente.	85
A. 20: prueba de calentado posterior agar agar. 52 [°C]	86
A. 21: prueba de calentado posterior agar agar. 70 [°C]	86
A. 22: prueba de calentado posterior agar-agar. 90 [°C]	87
A. 23: prueba de calentado posterior agar agar . 100 [°C]	87
A. 24: prueba de calentado posterior agar-agar . 100 [°C] separación de capas por que el proceso de retrogradación superficial es demasiado rápido	88
A. 25: prueba de calentado posterior almidón. T° ambiente.....	88
A. 26: prueba de calentado posterior almidón. 50 [°C]	89
A. 27: prueba de calentado posterior almidón. 70 [°C]	89
A. 28: prueba de calentado posterior almidón. 90 [°C]	90
A. 29: prueba de calentado posterior almidón. 100 [°C].....	90
A. 30: Primer modelo de sistema de extrusión.....	91
A. 31: Sistema de fijación del contenedor al equipo propulsor.....	91
A. 32: Parte inferior del primer modelo.	92
A. 33: Sistema de reducción de poleas del primer modelo.....	92
A. 34: Sistema propulsor del embolo mediante husillo móvil.	93
A. 35: Sistema reductor primer modelo. vista del motor.	93
A. 36: Pieza de sujeción y centrado del contenedor de bioplástico.	94
A. 37: Sistema reductor final, donde la tuerca se incorpora en la polea dentada.	94
A. 38: Mecanización placa superior sistema reductor.	95
A. 39: Mecanizado placa inferior sistema reductor.....	95
A. 40: Sistema propulsor final junto a contenedor de bioplásticos.....	96
A. 41: Extrusor previo a la mecanización de roscas.....	96
A. 42: Extrusor, ensamble final.	97
A. 43: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 60 [°C]	97
A. 44: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 60 [°C] acercamiento a capas.	98
A. 45: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 80 [°C]	98
A. 46: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 80 [°C] acercamiento de capas.....	99

A. 47: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 90 [°C]	99
A. 48: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 90 [°C] acercamiento de capas.....	100
A. 49: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 80 [°C]	100
A. 50: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 80 [°C] acercamiento de capas.	101
A. 51: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 80 [°C] vista superior.	101
A. 52: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 90 [°C]	102
A. 53: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 90 [°C acercamiento de capas.]	102
A. 54: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 90 [°C] vista superior	103
A. 55: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 100 [°C]	103
A. 56: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 100 [°C] acercamiento de capas.....	104
A. 57: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 100 [°C] Vista superior	104
A. 58: Variación de temperatura en impresión 3D. en la parte superior, bioplástico a base de almidón. Abajo a base de Agar-Agar. de izquierda a derecha temperatura de impresión de 60 a 100 [°C]	105
A. 59: Figura impresa con receta ST-W060-0606 a 80°C, prueba de geometría.	105
A. 60: Receta ST-W060-0600, 80 [°C].....	106
A. 61: Receta ST-W060-0600, 80 [°C] acercamiento de capas.	106
A. 62: Receta ST-W060-0600, 80 [°C] vista superior.	107
A. 63: Receta ST-W060-0600, 90 [°C].....	107
A. 64: Receta ST-W060-0600, 90 [°C] acercamiento de capas	108
A. 65: Receta ST-W060-0600, 90 [°C] vista superior.	108
A. 66: Receta ST-W060-0608, 80 [°C].....	109
A. 67: Receta ST-W060-0608, 80 [°C] acercamiento de capas.	109
A. 68: Receta ST-W060-0608, 80 [°C] vista superior	110
A. 69: Receta ST-W060-0608, 90 [°C].....	110
A. 70: Receta ST-W060-0608, 90 [°C] acercamiento de capas.	111
A. 71: Receta ST-W060-0608, 90 [°C] vista superior	111
A. 72: Receta ST-W060-0620, 80 [°C].....	112
A. 73: Receta ST-W060-0620, 80 [°C] acercamiento de capas.	112
A. 74: Receta ST-W060-0620, 80 [°C] vista superior.	113
A. 75: Receta ST-W060-0620, 90 [°C].....	113
A. 76: Receta ST-W060-0620, 90 [°C] acercamiento capas.....	114
A. 77: Receta ST-W060-0620, 90 [°C] vista superior.	114

Índice de Tablas

Tabla 1: Temperaturas que se calientan las fórmulas de cada bioplástico.	20
Tabla 2: Tabla de parámetros para experimento de almacenamiento hermético.....	21
Tabla 3: Recetas utilizadas para experimento de variación de agua.	21
Tabla 4: Parámetros del experimento de variación de agua.....	22
Tabla 5: Parámetros de velocidad y volumen de almacenamiento para impresión 3D	23
Tabla 6: Parámetros para pruebas de temperatura de impresión.	24
Tabla 7: Parámetros para prueba de temperatura de cama de impresión.	25
Tabla 8: Fórmulas utilizadas para variación de glicerina.....	26
Tabla 9: Parámetros de impresión para prueba de variación de glicerina.....	26
Tabla 10: Parámetros de impresión para pruebas de velocidad de impresión	26
Tabla 11: Parámetros de impresión para pruebas de variación de ángulos.	27
Tabla 12: Resultados tiempo de retención.....	29
Tabla 13: Parámetros de diseño para equipo diseñado.	41
Tabla 14: Variables utilizadas para el cálculo de potencia calórica requerida por el extrusor.	41
Tabla 15: Condiciones de simulación para agujero de salida de contenedor.	44
Tabla 16: Dimensiones para receta ST-W060-0600	57
Tabla 17: Dimensiones para receta ST-W060-0608	58
Tabla 18: Dimensiones receta ST-W060-0620	59
Tabla 19: Dimensiones de impresión a 20 [mm/s].....	75
Tabla 20: Dimensiones de impresión a 25 [mm/s].....	75
Tabla 21: Dimensiones de impresión para 30 [mm/s]	76
Tabla 22: Dimensiones para impresión a 35 [mm/s].....	76

1. Introducción

A finales del año 2019 un nuevo virus se esparcía por China, donde el gobierno de aquel país debió realizar estrictas cuarentenas para reducir el número de contagios y muertes de sus ciudadanos ante la desconocida enfermedad que generaba, una premonición de lo que sucedería en el mundo entero meses más tarde.

Debido a la crisis sanitaria mundial que se provocó, los países empezaron una batalla para adquirir insumos médicos tales como ventiladores mecánicos, mascarillas, guantes de látex, entre otros implementos, donde los países con un menor poder adquisitivo fueron los más perjudicados, debido a su poca capacidad de negociación.

En este contexto, participantes del Laboratorio de fabricación digital de la universidad de Chile (FabLab uChile, desde ahora simplemente FabLab) volcaron sus esfuerzos para desarrollar algunos implementos que pudieran ser útiles para los equipos médicos de hospitales del país, con ayuda de herramientas de prototipado rápido pudieron desarrollar escudos faciales para el personal médico y el ventilador mecánico de emergencia BAMBÚ.

Su experiencia en el desarrollo de estos productos mostró la hiperdependencia que Chile tiene de otras naciones en suplir materias primas y manufactura de productos, como China, y el bajo poder de respuesta de la industria nacional ante situaciones adversas. En este contexto es que se idea desarrollar un sistema sustentable, que conecte el territorio con el desarrollo de productos, el Nodo de bio-fabricación.

En el año 2019 la fundación Heinrich Böll en su libro *Plastic Atlas*, estimó que 400 millones de toneladas de plásticos eran producidas anualmente, donde solo el 10% se recicló [1], el resto de lo producido termina en vertederos y/o distintos ecosistemas, generando daños a la flora y fauna que los componen. El Nodo de bio-fabricación también busca reducir los impactos provocado por el actual sistema de consumo, implementando materias primas renovables y biodegradables, en especial de desechos provenientes de la industria alimenticia, dándoles un nuevo uso y generar un sistema circular amigable con el medioambiente.

En este escenario se desarrolla este trabajo de título, donde se busca implementar biopolímeros cocinados a base de materias primas provenientes de algas, en tecnologías de manufactura aditiva por deposición de material fundido.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

Aplicar bioplásticos que requieran proceso de cocción a tecnología de impresión 3D mediante el método de deposición de material fundido.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Evaluar dos bioplásticos generen cuerpos tridimensionales mediante deposición de material fundido.
2. Establecer el método de almacenaje para los bioplásticos utilizados.
3. Establecer parámetros de diseño mediante experimentación de los bioplásticos en temperatura de aplicación y variación de agua.
4. Diseñar y construir un dispositivo que se implemente en una impresora 3D comercial y permita imprimir bioplásticos.
5. Evaluar distintas fórmulas de los bioplásticos al imprimirlas variando parámetros de impresión y su composición.
6. Documentar las labores desarrolladas para ser presentadas en un repositorio open source.

1.2 Alcances y limitaciones

El trabajo de título cuenta con los siguientes alcances y limitaciones:

- Se diseña un equipo que permita imprimir bioplásticos cocinados y pastosos fríos.
- La impresora que se implementa el equipo es la modelo Ender 3 de la marca Creality.
- Se limita a trabajar con dos tipos de bioplásticos que necesiten cocción. Se utilizan fórmulas a base de almidón de papa y agar-agar.
- Se utilizarán software ya desarrollado para el control de la impresora y los equipos que se desarrollarán.
- Se utiliza el sitio web del FabLab para publicar el repositorio open source.

2. Antecedentes

2.1 Nodo de bio-fabricación

El Nodo de bio-fabricación digital, es un proyecto soportado por el ministerio de Cultura, las Artes y el Patrimonio, que consiste en el diseño, documentación y disseminación de una red de laboratorios creativos de código abierto [2]. El Nodo utiliza residuos provenientes principalmente de las redes de alimentación (cuescos, cáscaras, borra de café, etc) para el suprareciclaje y así asistir la fabricación distribuida de biomateriales y bioproductos. Los laboratorios pertenecientes a esta red se proyectan estar ubicados cerca de donde se producen los residuos, incorporándose al entorno de cada localidad.

El Nodo cuenta con la creación de máquinas que permita a los usuarios de cualquier parte del mundo, participar de esta red colaborativa de fabricación a partir de materiales provenientes de desechos biodegradables. Estas máquinas son:

Biomixer: Máquina que permite dispensar, mezclar y calentar ingredientes con precisión gracias a que funciona por control numérico, otorgando replicabilidad de las recetas con variaciones ínfimas. Funciona mediante una interfaz web que calcula y ejecuta recetas a partir de cantidades y porcentajes deseados de cada ingrediente. Se considera como el motor del Nodo de bio-fabricación, debido a que es el punto de partida para elaborar las distintas recetas de biomaterial con la que se vinculan las demás máquinas de bio-fabricación.



Figura 1: Biomixer. Fuente Fablab U. de Chile

Rotomoldeadora: Máquina que mediante el proceso de rotomoldeo permite crear geometrías cerradas y huecas de biomaterial.



Figura 2: Rotomoldeadora de biomateriales, modelo 3d. Fuente Fablab U. de Chile

Bioformadora: Máquina de termoformado de láminas de biomaterial por vacío, la cual calienta el material mediante calor refractario o vapor de agua para posteriormente dar la forma del molde deseado.

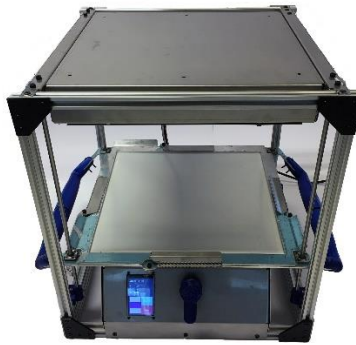


Figura 3: Bioformadora, Fuente Fabla U. de Chile

Compostera: Pequeña compostera con triturador y monitoreo de humedad, que permite obtener datos de los procesos de biodegradación.

Bioprinter: Máquina de impresión 3D que permite crear figuras solo de biomateriales pastosos fríos. Creada a partir de una impresora Makerbot 2, pero que es compatible con otros modelos de impresora del método de deposición de material fundido, tiene una capacidad de impresión de 50 [cc] y se puede cambiar de manera rápida cada cabezal de impresión.



Figura 4: Bioprinter, cabezal de extrusión. Fuente Fablab U. de Chile

2.2 Bioplásticos

Según la *European Bioplastic*, se define como bioplástico a todo material plástico de base biológica o que es biodegradable, pudiendo tener ambas propiedades [3].

Estos materiales no son una invención reciente, teniendo registro desde la década de 1860, donde el primer plástico basado en un biomaterial fue creado a partir de celulosa y se destinó para la creación de bolas de pool, las cuales eran confeccionadas con marfil proveniente de los colmillos de elefantes, material escaso en la época debido a la caza indiscriminada de estos animales que redujo su población, obligando a los productores de estos insumos a encontrar un sustituto para abastecer la creciente demanda [2]. A pesar de esto, los bioplásticos fueron quedando en segundo plano por el descubrimiento de polímeros provenientes de combustibles fósiles y que en la actualidad son ampliamente usados.

En los últimos años, los bioplásticos empiezan a tomar mayor importancia, debido a la necesidad de encontrar materiales amigables con el medio ambiente, reduciendo el impacto que generan los plásticos derivados de combustibles fósiles. En Europa se crean 55.2 Toneladas por año de Plástico, representando un 6% de todos los materiales usados en este continente [4] donde un 39.4% está destinado para empaque y envases de un solo uso que después de ser usados terminan en vertederos, bosques y océanos, un problema que se repite en los demás continentes. Los bioplásticos presentan una alternativa sustentable y de economía circular al modelo actual.

Los bioplásticos pueden catalogarse como “Cultivables” o GIY (por las siglas de grow it yourself) y los “Cocinados” o CIY (por las siglas de cook it yourself) [5], estos últimos son los abordados en este trabajo de título.

2.2.1 Bioplásticos cocinados.

Los bioplásticos CIY son el resultado de mezclar ingredientes de fuentes naturales y renovables. Según la proporción de los elementos en la mezcla, características de los ingredientes, pH de la mezcla y temperatura de cocción se obtienen bioplásticos con distintas propiedades mecánicas. La estructura básica de una fórmula para crear un bioplástico CIY se compone de:

Solvente: Sustancia que se utiliza para disolver y mezclar los ingredientes, se presenta en una proporción mayor que los demás elementos. El agua es el más utilizado para estos tipos de bioplásticos.

Gelificante: Es la sustancia capaz de crear geles mediante el proceso de gelificación. En la elaboración de bioplásticos también se les denominan “aglomerantes” ya que estos materiales son los encargados de unir los distintos fragmentos presentes en las recetas.

Los aglomerantes naturales usados para este propósito son:

- Agar-agar
- Alginato
- Almidones
- Gelatinas
- Pectina
- Carragenina
- Quitosano

Plastificante: Sustancia que se utiliza como aditivo para mejorar la flexibilidad y elasticidad del biomaterial.

El plastificante usado en gran parte de las recetas de bioplásticos es la Glicerina (o glicerol), debido que es un producto que se puede obtener de origen vegetal, comercialmente fácil de conseguir y económico. También son utilizados como plastificantes el aceite de soya epoxidado, aceite de cardanol y aceite de linaza epoxidado.

Una mayor concentración de plastificante en el bioplástico genera que el material presente una mayor elongación, pero también reducirá su resistencia a la tracción [5].

Conservante: Los conservantes preservan y evitan la aparición de hongos en los bioplásticos.

Conservantes utilizados de origen natural para la creación de bioplásticos son:

- Limón
- Sal
- Vinagre
- Azúcar
- Ajo
- Clavo de olor

Además, se pueden agregar un material de relleno o “filler” que proporciona textura y color, como lo es la borra de café, cáscara de huevo, aserrín, etc.



Figura 5: Biomaterial a base de borra de café. a la izquierda se puede observar el material con conservante en su receta. A la derecha, el mismo biomaterial sin conservante que formó un hongo en su superficie (sector blanco). Fuente: elaboración Propia.

Punto de gelificación: un concepto clave para poder crear bioplásticos con los elementos mencionados es la temperatura de gelificación, que se define como la temperatura donde inicia el proceso de gelatinización. Dependiendo del gelificante y la proporción de los elementos usados va entre los 36° a los 70° [C].

Gelificación: Proceso donde el gelificante al estar mezclado con agua y calentar la mezcla hasta la temperatura de gelificación, el granulo del gelificante empieza a absorber agua, hinchándose. Se pierde el ordenamiento interno del grano debido a que los polisacáridos que los componen empiezan a hidratarse (ruptura de puentes hidrógenos entre moléculas y reemplazados por moléculas de agua), donde finalmente el granulo se rompe parcialmente y se dispersan los polímeros de su estructura en la disolución.

Retrogradación: Proceso que se inicia después de la gelificación del granulo del gelificante. La pasta creada con las cadenas de polisacáridos disgregadas en la solución empezará a perder agua y las cadenas se asociarán nuevamente por puentes hidrógenos, creando estructuras parcialmente ordenadas que se refleja en un gel firme y rígido.

Sinéresis: Pérdida de agua retenida dentro del gel.

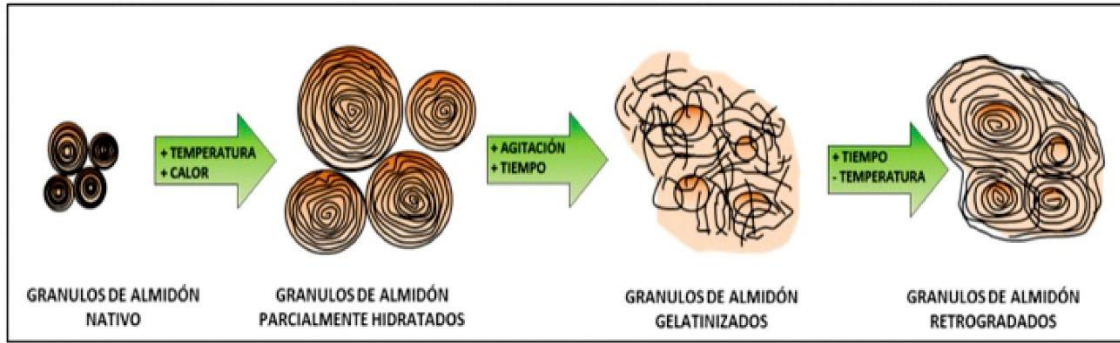


Figura 6: Gelificación y retrogradación del almidón.

La viscosidad de los gelificantes en el proceso de gelificación depende del grado de gelatinización que alcancen en este proceso [6]. Al tener un mayor grado de gelificación la viscosidad aparente aumenta debido a que las cadenas que componen a los gelificantes se encuentran abiertas y dispersas en mayor proporción, aumentando el esfuerzo de corte. Esto se puede observar en la Figura 7, donde se muestra la viscosidad de distintas muestras con la misma cantidad de agua y almidón de papa, las cuales se calentaron a la misma temperatura, pero con distinto tiempo de exposición a la fuente de calor.

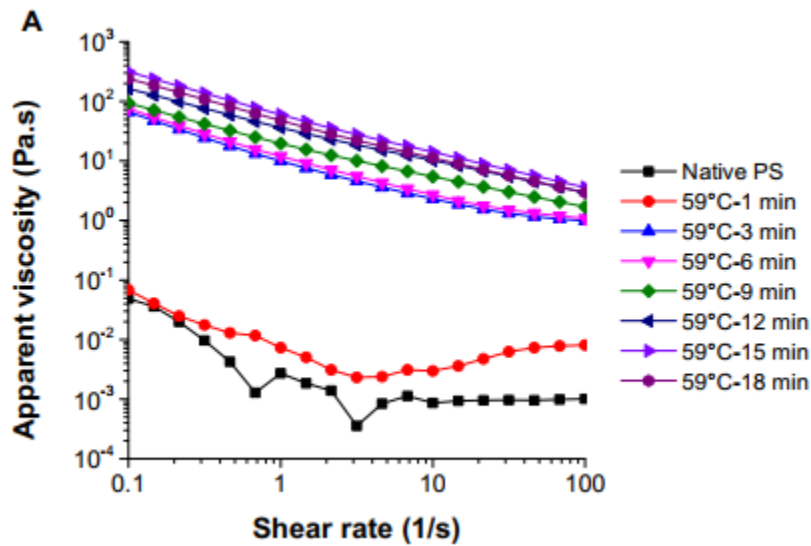


Figura 7: Gráfico de viscosidad aparente versus tasa de corte para distintos grados de gelatinización. Fen Xu. (2021) "Physicochemical and Structural Characterization of Popato Starch with Different Degrees of Gelatinization"

2.2.2 Agar-agar

Es un polisacárido compuesto por cadenas de agarosa y agarpectina que en la naturaleza se encuentra como una estructura de soporte en las paredes celulares de algas específicas pertenecientes al grupo de las rodófitas [7]. Se utiliza comúnmente para la elaboración de sustratos

para trabajos microbiológicos, sustituto de la jalea, espesante para cocinar, conservación de frutas y pegamento para papeles y tejidos.

Chile al presentar una extensa zona costera, se ha posicionado como uno de los principales productores de algas y sus derivados (agar-agar), aportando el año 2010 el 60% de la producción global, recaudando alrededor de US \$40 millones anuales [8].

Este compuesto se obtiene para uso comercial a partir de las especies de alga *Gelidium* y *Gracilaria*. Es insoluble en agua a temperatura ambiente, pero puede formar geles a bajas concentraciones en agua hirviendo y se caracterizan por tener un punto de fusión mayor que la temperatura inicial de gelificación [9].

El gel formado por el agar es termo reversible con la presencia de agua, esto quiere decir, que al entregar energía calórica al gel y alcanzar temperaturas alrededor de los 90°C, el gel pasa a un estado líquido pudiendo ser moldeado nuevamente.



Figura 8: Aplicación de plástico basado en Agar-agar utilizado como empaque de pasta.. Fuente <https://margaritatalap.com/Desintegramo>

2.2.3 Almidón

El almidón es una materia prima de origen vegetal, que está compuesto por dos polisacáridos químicamente distinguibles, amilosa y la amilopectina en una proporción 20 -80 % respectivamente [10]. La amilosa se presenta como cadena helicoidal de glucosas unidas exclusivamente por enlaces $\alpha(1 \rightarrow 4)$. En el caso de la amilopectina, presenta entre 94% a 96% de enlaces $\alpha(1 \rightarrow 4)$ y un 4% a 6% de enlaces $\alpha(1 \rightarrow 6)$, produciendo cadenas ramificadas. Esto provoca que el almidón se encuentre en forma granular con una estructura semi-cristalina lo que lo hace insoluble a temperatura ambiente en el agua.

Los Granos de almidón presentan diferente formas y tamaños dependiendo de la fuente de obtención. Sus tamaños van entre un rango de 0.5 a 100 [μm], lo cual afecta sus propiedades funcionales.

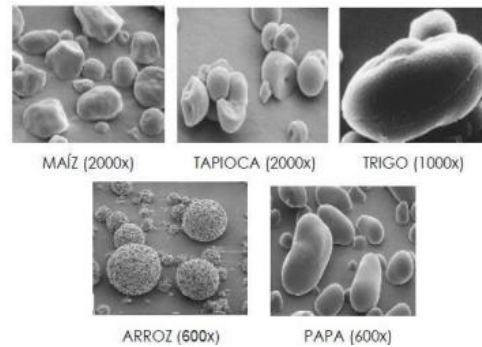


Figura 9: Distintos granos de almidón.

En este estudio se utilizará almidón de papa. Chile presenta 216 variedades nativas de este tubérculo y

Aunque solo generó el 0.5% de la producción mundial el año 2016, de las 7500 variedades de papa desarrolladas globalmente, el 95% presenta un ancestro común nativa de nuestro país, la Púrpura casposa [11]. Además, el almidón de papa es un elemento económico y fácil de adquirir de forma comercial y artesanal.

Esta materia prima se usa principalmente en la industria alimenticia como espesante, adhesivo, ligante, aglutinante, conservante para pan, entre otros.



Figura 10: plástico basado en almidón.

2.3 Impresión 3D

2.3.1 Deposición de material fundido

Esta técnica de impresión 3D (denominada FDM por sus siglas en inglés) consiste en un extrusor que funde el material utilizado y lo deposita sobre una cama/placa de impresión de forma precisa generando la figura capa por capa.

Es uno de los métodos más utilizados para la impresión 3D, debido a su sencillez, ya sea de funcionamiento y/o de construcción de los equipos. Además, es compatible con una amplia gama de termoplásticos, tales como el PLA, PET, ABS, nylon, entre otros y materiales como vidrio, arcilla, chocolate y jarabe.

2.3.2 Partes de una impresora 3D

A pesar de que existen muchos modelos de impresoras 3D que funcionan de forma diferente, se pueden identificar partes en común, estas son:

- 1. Frame/Chasis :** Es la estructura que aloja ejes y los otros componentes de la impresora.
- 2. Extrusor:** Su misión es fundir y depositar el material sobre la plataforma de impresión.
- 3. Cama o plataforma de impresión:** superficie en la cual se deposita el material para ser impreso. Pueden ser calefaccionadas o no.
- 4. Panel de control:** Su función es interactuar con el usuario, mostrando información de temperatura, flujo de material, errores, entre otros. También permite que el usuario modifique parámetros de impresión directamente en la impresora, sin necesidad de modificar el software de control.
- 5. Placa Base:** Elemento esencial, ya que controla los elementos eléctricos de la impresora para realizar la impresión 3D.
- 6. Motores:** Encargados de generar el movimiento en la impresora. Se utilizan principalmente motores paso a paso (stepper) ya que permite control del movimiento de una forma precisa.

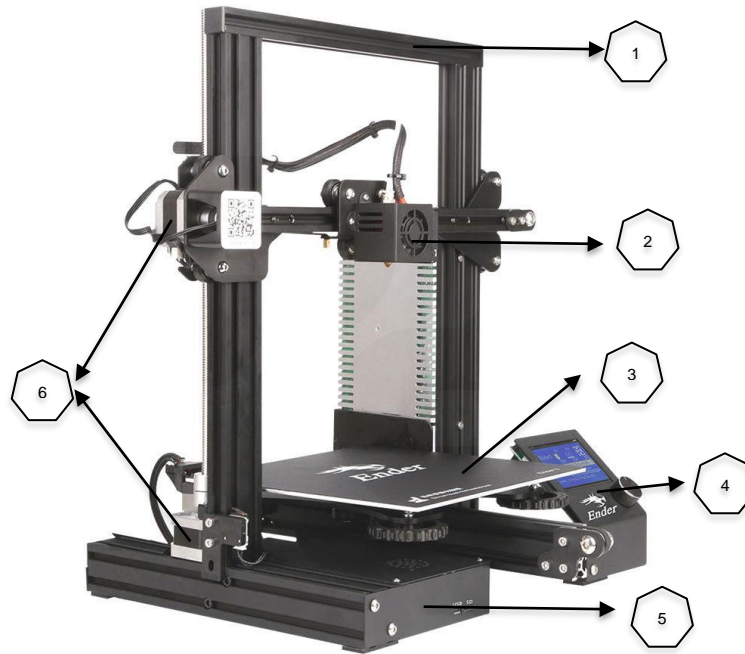


Figura 11: Partes de una impresora 3D.

2.3.3 Parámetros de impresión 3D.

Al realizar impresiones 3D mediante el método FDM, hay distintos parámetros que se necesitan configurar (directo en la máquina o del software C.A.M utilizado). Parámetros importantes son:

Temperatura de impresión (T°_{im}): o de extrusión, es la temperatura que se debe aplicar al material en el extrusor para ser impreso.

Temperatura de cama de impresión (T°_c): Temperatura de la plataforma de impresión y que dependiendo del material utilizado ayuda a la adherencia de este en la cama de impresión.

Velocidad de impresión (V_{im}): Es la velocidad con la que se mueve el extrusor en el plano horizontal respecto a la cama de impresión

Altura de capa (H_c): Es el espesor en milímetro de cada capa que compone el cuerpo 3D. Su valor máximo como máximo debe ser el 80% del diámetro de la boquilla del extrusor.

Ángulos de impresión (\mathbf{b}): Se define como se muestra en la Figura 12. Es una de las limitaciones en la impresión 3D, ya que para ángulos menores a los 50° , las capas colapsan, necesitando una estructura de soporte bajo ellas para mantener su forma.

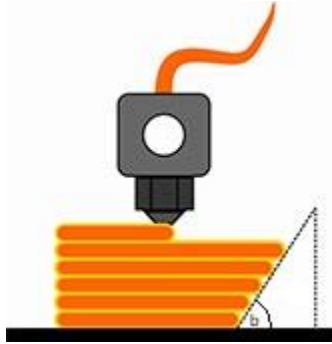


Figura 12: ángulo de paredes en la impresión 3D.

2.3.4 Firmware

Es el programa básico de la impresora que controla los distintos sistemas de esta (como movimiento, temperatura, extrusión, etc) y así, asegurar el correcto funcionamiento. El firmware también es el encargado de leer el código desarrollado por el software de manufactura asistida y traducirlo en movimientos de las distintas partes de la impresora para crear las figuras deseadas.

2.3.5 CURA

Es un software gratuito de manufactura asistida por computadora (C.A.M por sus siglas en inglés) para impresión 3D desarrollado por la empresa Ultimaker junto a la colaboración de usuarios. Es uno de los softwares más utilizados a nivel global donde el año 2019 presentaba 600.000 usuarios y creando más de 2 millones de piezas semanales [12].

Este software se encarga de transformar una pieza diseñada digitalmente, dividiéndola en capas de pequeña altura que se superponen una sobre otra para crear el cuerpo tridimensional, estas capas las lleva a lenguaje que pueda interactuar con la impresora, según los parámetros que el usuario configura (temperatura, flujo de impresión, velocidad, relleno de impresión entre otros).

Cura es compatible con un amplio número de impresoras 3D comerciales y además pueden configurarse en las impresoras desarrolladas por los usuarios, adaptándose con facilidad a los requerimientos que se les solicite.

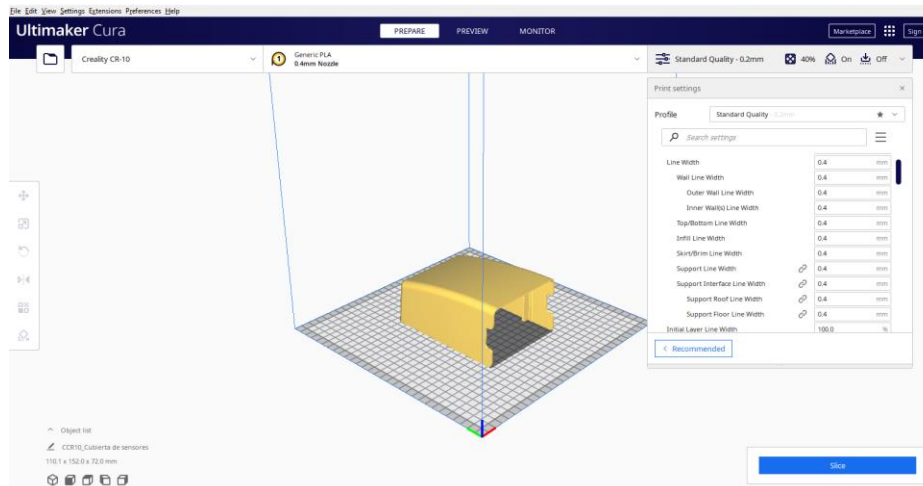


Figura 13: Interfaz del software CURA. Pieza de diseño propio para imprimir en una impresora Ender CR10.

2.3.6 Curvas de selección de un motor.

Para seleccionar un motor se debe saber cuál será la velocidad angular y el torque requerido por este elemento. Estos valores dependerán según la aplicación dada a este elemento.

Cuando se tienen los valores de velocidad y torque del motor, se debe recurrir a los fabricantes de estos elementos quienes entregarán las curvas de Torque [Nm] versus velocidad [RPM] de sus motores. En estas gráficas se debe encontrar el punto de operación del motor y ver si el equipo del fabricante cumple con los requerimientos.

Por ejemplo, se tiene que seleccionar un motor Nema 23 que opere a 400 [RPM], con un torque de 1.5 [Nm]. En la Figura 14, se observa las curvas para motores Nema 23 del fabricante stepIM. Al encontrar el punto de operación en esta gráfica (indicado por la intersección de las rectas rojas), se puede concluir que los motores NEMA 23 que cumplen con los requerimientos son los de 48V/6.5A y 48V/4.5A ya que a esa velocidad angular, presentan un torque igual o mayor al solicitado.

NEMA 23 Medium (IP20, IP65)

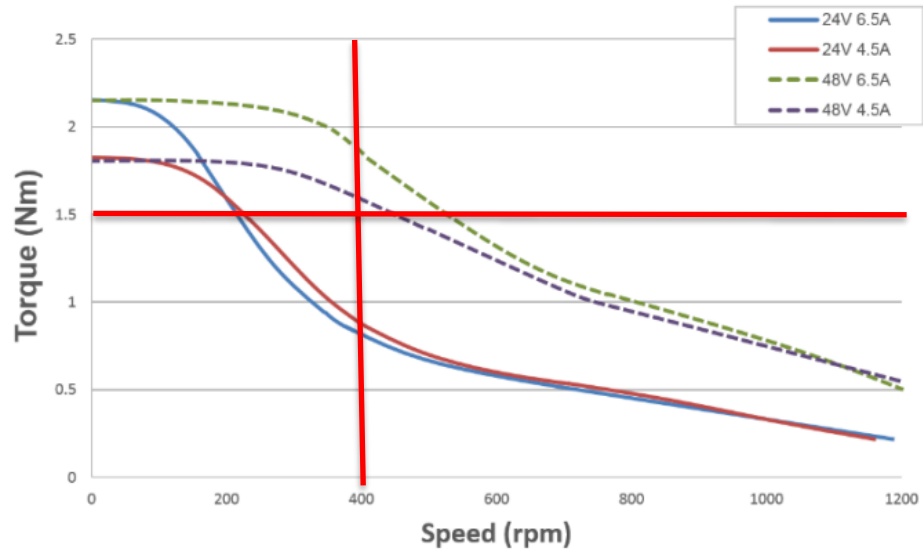


Figura 14: Grafica de torque vs velocidad para motores NEMA 23 de la empresa stepIM

3. Metodología

La metodología general adoptada para este estudio se puede observar en la Figura 15. La primera etapa de trabajo consiste en la experimentación de los bioplásticos para obtener características en su potencial aplicación en la impresión 3D. Con esto claro se pasa a una etapa de selección de parámetros y diseño de un equipo que ayude a aplicar los bioplásticos en la impresión 3D. La etapa de diseño culmina con la construcción, implementación y calibración del equipo, lo que ayuda a realizar distintas pruebas para conocer su comportamiento en tecnologías de manufactura aditiva.

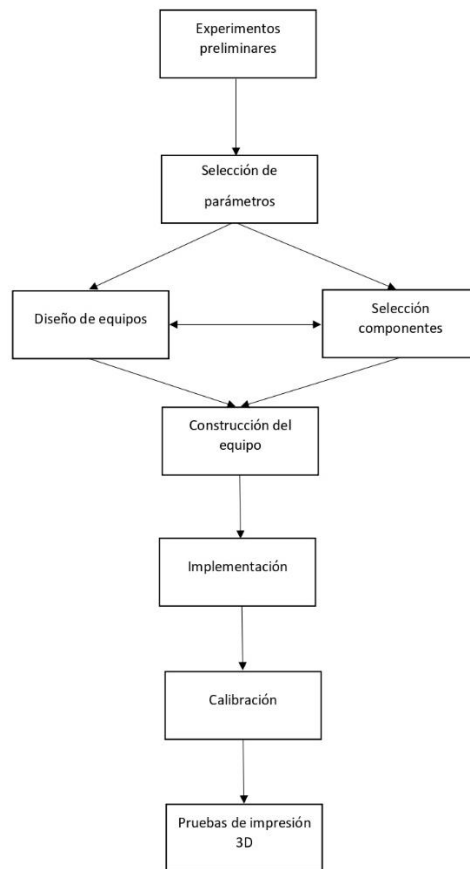


Figura 15: Metodología de trabajo

3.1 Equipos

3.1.1 Legato 200 series

El equipo *Legato 200 series* es una bomba de jeringas de la empresa *kdScientific*, con capacidad de bombear 2 jeringas a la vez de forma controlada.

Está pensado para laboratorios, ya presenta un flujo estable de bombeo, garantizando resultados más fiables. Es de un tamaño compacto que permite situarlo en posición horizontal y/o vertical adecuándose a las limitaciones de espacio presentes.

Presenta configuraciones predeterminadas de modelos de jeringas en su memoria interna, pero también el usuario puede configurar la máquina por medio de la pantalla táctil incorporada para el tipo de jeringa que presente.



Figura 16: Equipo de bombeo de jeringas Legato 200 series, fuente kdScientific

3.1.2 Creality ender 3

La impresora Ender 3 de la empresa Creality, es una impresora del método FDM con un volumen total de impresión de 220x220x250 [mm]. Tiene un costo menor a los US\$200, pero a pesar de ser económica es conocida por su rendimiento y versatilidad, siendo una de las máquinas más populares entre usuarios principiante y experimentados en el mundo de la impresión 3D.

Es una impresora de código abierto, lo que permite adaptarse a cada necesidad del usuario. Posee una placa de circuito desarrollada por Creality que permite un uso continuo de la impresora hasta 200 [hr].



Figura 17: Impresora Ender 3. fuente creality.com

Otras características principales son:

- Tamaño total del equipo: 440x440x465 [mm]
- Velocidad de impresión máxima: 180 [$\frac{mm}{s}$]
- Temperatura max. del extrusor: 255 [°C]
- Temperatura max. de plataforma de impresión: 55 [°C]
- Modo de trabajo: desde Pc o tarjeta SD
- Peso total: 8 [kg]

3.2 Denominación

Se crea la siguiente denominación para las fórmulas de bioplástico para identificar su composición:

$XX - Y110 - 2233$

Donde XX representa el gelatinizante usado como base para el bioplástico, se utiliza la abreviación para agar-agar [AA] y para Almidón [ST] (por el inglés Starch).

La Y representa el solvente que se utiliza, como para este trabajo de título son materiales a base de agua, se utiliza la letra W (por la palabra Water). Los siguientes tres números representan la cantidad del solvente de la mezcla en [ml].

El cuarto y quinto dígito representa la cantidad de gelificante en la fórmula en [gr] y los últimos dos números representan la cantidad de glicerina en [ml] de la solución. No se agrega la cantidad de conservante ya que se mantiene fija en este trabajo de título y no se aborda los efectos que tiene aumentar o disminuir su concentración. La cantidad de conservante de las recetas son: 3 [gr] de propionato de calcio para recetas a base de agar-agar y 10 [ml] de vinagre blanco para recetas a base de almidón.

Por ejemplo, si el código indica “AA-W200-1210”, significa que es un bioplástico formado a partir de 200 [ml] de agua, con 12 [gr] de agar-agar y con 10 [ml] de glicerina.

Las recetas equivalentes siempre se denominarán por el número más bajo, es decir, si tengo una receta “ST-W060-0606” y “ST-W180-1818” son recetas equivalentes, solo que la segunda tiene 3 veces las cantidades de la primera, por ende, ambas deberían denominarse “ST-W060-06-06”.

Posteriormente se realizan los siguientes experimentos.

3.3 Experimentos preliminares

Los bioplásticos CIY utilizados en este estudio, no han sido aplicados en tecnologías de manufacturas aditivas, por lo que no se encuentran referencias directas sobre el tema. Es necesario experimentar previamente con ellos para conocer su potencial en este campo

3.3.1 Generación de capas

Es necesario comprobar si estos bioplásticos utilizados pueden generar cuerpos tridimensionales mediante capas con el método FDM.

Para esto se preparan las siguientes recetas: AA-W200-1210 y ST-W100-0606. Se cocinan hasta completar el proceso de gelificación, vertiéndose de inmediato en una manga pastelera con una boquilla de sección circular de 6 [mm] de diámetro. En una superficie plana y sobre papel de aluminio, inmediatamente después de colocar el material al interior de la manga pastelera, se deposita el bioplástico apretando la manga y guiándola con las manos a una altura de capa de 3 a 4 [mm], tratando de generar distintos cuerpos tridimensionales superponiendo capas. Se mide el tiempo de secado dejando las muestras en un lugar libre de viento y a la sombra.

3.3.2 Decantación

Como los gelatinizantes usados no son solubles en agua a temperatura ambiente, se quiere observar el tiempo de retención de los ingredientes de bioplásticos en el solvente y el efecto de la temperatura sobre este tiempo.

Para esto se realizan 3 muestras de cada una de las siguientes recetas AA-W200-1210 y ST-W100-0606, se mezclan los ingredientes en un vaso precipitado y cada mezcla se calienta mientras se agita constantemente hasta las temperaturas mostradas en la Tabla 1, permitiendo una variación aproximada de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en cada situación.

Una vez que la mezcla alcance la temperatura deseada, se saca el vaso precipitado de la fuente de calor y se coloca en una superficie horizontal y se mide el tiempo T_i [min] cuando se observa sedimentación en el vaso y T_f [min] cuando ya no se observa un cambio en el vaso precipitado.

Tabla 1: Temperaturas que se calientan las fórmulas de cada bioplástico.

Muestra	T° calentado [°C]
1	45
2	55
3	65

3.3.3 Almacenamiento hermético

Se desea saber si el proceso de retrogradación se ralentiza o detiene si se almacenan los biomateriales seleccionados en contenedores herméticos que eviten la evaporación del agua.

Para esto se preparan dos recetas de bioplásticos AA-W200-1210 y ST-W100-0606 y se cocinan en un vaso precipitado de vidrio junto a una cocinilla eléctrica, hasta alcanzar el punto de gelatinización e inmediatamente se almacenan 15 [ml] en 3 jeringas de 30 [ml] por bioplástico. Se toma el tiempo y cada 24 [hrs] se toma una jeringa por biomaterial y manualmente se hacen 5 líneas de 100 [mm] con 3 capas cada una, para verificar si el material logro la retrogradación o se encuentra en un estado líquido. Se observa además la textura de cada muestra y si el almacenamiento planteado afecta en la generación de capas. Se mide el tiempo de secado dejando las muestras en un lugar libre de viento y a la sombra.

Tabla 2: Tabla de parámetros para experimento de almacenamiento hermético.

Muestra	1	2	3
Tiempo verificación [hrs]	24	48	72
Cantidad por muestra [ml]	15		
n°de capas por línea	3		
Largo de líneas [mm]	100		

3.3.4 Variación de agua

Para saber cómo afecta la cantidad de agua de las recetas en la elaboración de capas se realiza lo siguiente.

Para cada bioplástico se preparan 4 recetas variando la cantidad de agua que se muestran en la Tabla 3.

Se cocina cada receta hasta notar un cambio en la viscosidad de la mezcla (alrededor de los 70°C) y de inmediato se almacenan en jeringas de 30 [ml]. Las jeringas se colocan una a una en el equipo *Legato 200 series* configurado para jeringa de 30 [ml] para un flujo de $5 \frac{ml}{min}$.

Se deposita el material en una superficie plana de madera y de forma manual, se mueve realizando una línea de aproximadamente 100 [mm], se realizan capas hasta que la estructura colapse.

Tabla 3: Recetas utilizadas para experimento de variación de agua.

Muestra	Agar-Agar	Almidón
1	AA-W150-1210	ST-W060-0606
2	AA-W200-1210	ST-W100-0606
3	AA-W250-1210	ST-W150-0606
4	AA-W300-1210	ST-W200-0606

3.3.5 Calentado posterior

Se estudia el efecto que produce calentar posteriormente los biomateriales que son almacenados en contenedores herméticos, en su capacidad de generar

Para esto se preparan dos fórmulas de bioplásticos: AA-W200-1210 y ST-W100-0606, se cocinan en un vaso precipitado hasta el punto de gelificación, se almacenan 30 [ml] de bioplástico en 4 jeringas por cada biomaterial. Se dejan reposar por un día.

Una vez que se encuentran a temperatura ambiente, se introducen las jeringas en baño maría evitando que el agua del baño, entre o esté en contacto con el bioplástico almacenado en la jeringa.

Las cuatro jeringas se calientan a temperaturas distintas las cuales se muestran en la Tabla 4 con una variación de ± 3 [°C]. Cuando el agua del baño maría alcanza la temperatura deseada, la jeringa se deja reposar alrededor de unos 10 [min] controlando de forma manual la temperatura del agua, y asegurar que el bioplástico al interior tenga la misma temperatura del baño.

Transcurrido los 10 [min] se coloca la jeringa en el equipo *Legato 200 serie*, configurado para un flujo de 5 [ml/min]. Se da inicio al equipo y con la ayuda de una plataforma de madera, se generan líneas de 3 capas y de 100 [mm] de largo aproximadamente, moviendo la plataforma manualmente y manteniendo una altura de capa entre los 2 a 4 [mm].

Tabla 4: Parámetros del experimento de variación de agua.

Muestra	1	2	3	4
T°[C]	60	80	90	100
Cantidad [ml]	30			
Tiempo en baño maría [min]	10			
n°de capas	3			
Largo línea [mm]	100			
flujo [ml/min]	5			

3.4 Selección de parámetros

La selección de parámetros se realiza con el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de la fase experimental. Con estos parámetros se realizan cálculos que permitirán crear el diseño del equipo que permitirá imprimir bioplásticos y seleccionar componentes comerciales.

Además, se solicita que el equipo sea compacto y capaz de instalarse en cualquier impresora comercial. Que el recambio de material se pueda realizar de una forma fácil y rápida. En la Tabla 5 se muestran parámetros dados para la velocidad de impresión y el volumen de almacenamiento de bioplásticos.

Tabla 5: Parámetros de velocidad y volumen de almacenamiento para impresión 3D

Parámetro	Valor
Velocidad de impresión	50 [mm/s] (max)
Volumen de almacenamiento	200-500 [cc]

3.5 Diseño del equipo y selección de componentes

Para este trabajo de título, es necesario diseñar un equipo que pueda imprimir biomateriales. Su diseño responde a los parámetros obtenidos de la experimentación preliminar y los datos.

La selección de componentes va ligada con parámetros calculados y el diseño de los equipos. Se seleccionan componente que se puedan conseguir de forma rápida en tiendas de Chile, para trabajar con recursos locales, pero estos componentes también deben presentar un carácter universal o que puedan ser reemplazados fácilmente sin necesidad de recalcular y realizar pasos previos a este punto.

3.6 Construcción e implementación

El equipo diseñado se construye con la ayuda de las herramientas presentes en el FabLab de la universidad y en el taller mecánico perteneciente al departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Chile. Posterior a esto se realiza su implementación en la impresora Ender 3, donde se utilizará su sistema de control para manejar motores, resistencias térmicas, entre otros componentes que el diseño requiera.

3.7 Calibración

La calibración del equipo se realizará de dos formas:

Firmware: Se realizará la configuración y calibración de motores, dimensiones de impresión, controlador PID para calentar el extrusor y cualquier otro parámetro que sea pertinente.

CURA: algunos parámetros de este software interfieren con las configuraciones que se puedan realizar en el firmware, ya que tienen sus propias limitaciones, por ejemplo, el diámetro de boquilla máximo que se puede otorgar es de 3.25 [mm] lo que puede ocasionar errores. Es por esa razón que también una vez implementado y configurado el firmware se configuraran de forma adecuada los parámetros de CURA para obtener la mejor calidad posible.

3.8 Pruebas de impresión 3D

Una vez implementado y calibrado el equipo, se realizan pruebas de impresión 3D de ambos bioplásticos para saber la mejor forma para ser impresos. Los experimentos que se realizarán son los siguientes.

3.8.1 Temperatura de impresión

Se desea conocer el comportamiento de la impresora y características de los bioplásticos trabajados en este estudio al ser impresos a distintas temperaturas.

Se preparan dos fórmulas de bioplásticos: AA-W200-1210 y ST-W060-0606. Se cocinan dentro un vaso precipitado y una vez alcanzado el punto de gelificación, se depositan en el contenedor diseñado para el almacenamiento de estos elementos y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.

Para cada muestra se realizan 4 impresiones por biomaterial de un anillo de 50 [mm] de diámetro exterior, 8 [mm] de espesor y 20 [mm] de altura. Los parámetros para este experimento se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros para pruebas de temperatura de impresión.

Prueba	1	2	3	4
$T_{im}^{\circ} [^{\circ}C]$	60	80	90	100
V_{im} [mm/s]	20			
H_c [mm]	2			
$T^{\circ}_c [^{\circ}C]$	50			

3.8.2 Temperatura cama de impresión

Se quiere conocer el efecto en la impresión de los bioplásticos que se tiene al variar la temperatura de la cama de impresión.

Para esto se preparan 4 muestras por fórmula: AA-W200-1210 y ST-W060-0606 en un vaso precipitado de vidrio y se cocinan hasta alcanzar el punto de gelificación. Al obtener esta temperatura, se almacenan los bioplásticos en el contenedor del equipo diseñado y se dejan reposar hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Por cada muestra de bioplástico se realiza la impresión de un anillo de 50 [mm] de diámetro exterior, 8 [mm] de espesor y 20 [mm] de alto. Los parámetros utilizados por cada muestra de las fórmulas se muestran en la Tabla 7. Terminada la impresión, se deja reposar el cuerpo en la cama de impresión 10 [min] con la temperatura de cama correspondiente a cada prueba.

Tabla 7: Parámetros para prueba de temperatura de cama de impresión.

Prueba	1	2	3	4
T_{im}° [°C]	80			
V_{im} [mm/s]	20			
H_c [mm]	2			
T_c° [°C]	50	80	90	100

3.8.3 Variación de glicerina

Se desea estudiar el efecto en las fórmulas de bioplásticos al variar la glicerina de estas y cómo afecta al imprimirlos y a su reducción de tamaño.

Para esto se realizan cuatro muestras de cada bioplástico, variando la cantidad de glicerina según las composiciones de las fórmulas que se muestran en la Tabla 8.

Las muestras se preparan en un vaso precipitado de vidrio y se cocinan hasta notar cambios en la viscosidad de la mezcla ($T_{im}^{\circ} \sim 70^{\circ}C$) y se almacenan inmediatamente en el contenedor diseñado para este propósito.

Por cada muestra se realizan dos impresiones a 80 [°C] y 90 [°C] de un anillo de 50 [mm] de diámetro exterior, 8 [mm] de espesor y 20 [mm] de alto con los parámetros mostrados en la Tabla 9.

Luego de imprimir, se miden las dimensiones del anillo diámetro exterior (D), espesor (e) y altura (h). Se deja secar por completo el material por el tiempo que se necesario y se vuelve a medir estas dimensiones.

Tabla 8: Fórmulas utilizadas para variación de glicerina

Muestra	Agar-agar	Almidón
1	AA-W200-1200	ST-W060-0600
2	AA-W200-1210	ST-W060-0606
3	AA-W200-1213	ST-W060-0608
4	AA-W200-1233	ST-W060-0620

Tabla 9: Parámetros de impresión para prueba de variación de glicerina.

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8
T _{im} [°C]	80				90			
V _{im} [mm/s]	20							
H _c [mm]	2							
T _c [°C]	50							

3.8.4 Velocidad de impresión

Esta prueba se realiza con la intención de ver el efecto de la velocidad en la calidad de la impresión y como afecta la temperatura en el momento de imprimir.

Se realizan 8 muestras de cada fórmula AA-W200-1210 y ST-W060-0608, preparándolas en un vaso precipitado de vidrio y cocinándolas hasta el punto de gelificación y se almacena en el contenedor de biomaterial inmediatamente al obtener esta temperatura.

Se realizan impresiones por cada muestra de biomaterial de una figura triangular isósceles de lado 60 [mm], 8 [mm] de espesor y 20 [mm] de altura, con los parámetros mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10: Parámetros de impresión para pruebas de velocidad de impresión

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8
T _{im} [°C]	80				90			
V _{im} [mm/s]	20	25	30	35	20	25	30	35
H _c [mm]	2							
T _c [°C]	50							

3.8.5 Ángulos

Se desea conocer la capacidad de los bioplásticos de ser impresos con inclinación y saber a qué ángulo colapsará la estructura.

Para esto se preparan 3 muestras por cada una de las fórmulas AA-W200-1210 y ST-W060-0608 en un vaso precipitado de vidrio y se cocinan hasta alcanzar la temperatura de gelificación, almacenándolas de inmediato en el contenedor diseñado para almacenamiento de biomateriales.

Se realiza la impresión de una pirámide truncada con la base menor apoyada en la cama de impresión, y con dimensiones de 30x30 [mm] y 40 [mm] de alto. Los parámetros de estos experimentos se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Parámetros de impresión para pruebas de variación de ángulos.

Prueba	1	2	3
T ^o _i [°C]	80		
V _i [mm/s]	20		
H _c [mm]	2		
T ^o _c [°C]	50		
ángulo [°]	75	60	45

4. Resultados experimentación y Diseño de equipo.

4.1 Experimentos preliminares

4.1.1. Generación de capas

Los resultados de este experimento para la fórmula a base de almidón de papa ST-W100-0606 se pueden observar en la Figura 18. Se realizaron distintos cuerpos geométricos, los cuales se crearon a partir de la superposición de capas por el método de deposición de material fundido.

En la Figura 18b) se aprecia las capas generadas mediante la manga pastelera. Estas capas se unen entre si manteniendo la figura del cuerpo. Irregularidades están asociadas a que el proceso se hizo manualmente, por esta razón una de las paredes del cuerpo colapsó ya que las capas no se pudieron superponer alineadas verticalmente.

De estos experimentos se pudo observar que la parte exterior de los cuerpos creados se siente seca al tacto, después de 5 [min] de elaborado el cuerpo, pero en su interior aún se encuentra en un estado gelificado. Esto se debe a que el bioplástico tiene una temperatura de 70 [°C] aproximados al ser aplicado con la manga pastelera, por lo que sus capas exteriores inician el proceso de retrogradación inmediatamente después de ser aplicadas.



a) b)
Figura 18: Generación de capas con bioplástico a base de almidón. Elaboración propia

Los resultados para la fórmula a base de agar-agar AA-W200-1210 se pueden observar en la Figura 19. Se pudieron crear líneas con capas superpuestas mediante el método FDM, pero se aprecia que estas no están bien definidas y no conservaron la forma de la boquilla. Esto se debe a que el bioplástico presenta una viscosidad baja, ya sea porque la fórmula presenta un alto contenido de agua y/o el material no está completamente gelificado. A pesar de esto las capas se unen entre si y

su parte exterior se siente seca al tacto después de 5 [min] de ser aplicadas. Se debe buscar una fórmula adecuada o un método distinto con este bioplástico para obtener capas mejor definidas.



Figura 19: Generación de capas con agar-agar

4.1.2. Decantación

Los resultados de este experimento se pueden observar en la Tabla 12, donde se aprecia los tiempos T_i y T_f para cada experimento realizado. Alrededor de 3 [min] después de alcanzar la temperatura deseada y dejar reposar, se observaba sedimentación de los polvos de Agar-Agar y almidón. Y para un tiempo sobre los 5 [min] ya se puede apreciar una completa separación de estos polvos con el agua. Esto ocurre para cada temperatura tratada antes de la temperatura de gelificación. Esto se debe a que los gelificantes utilizados no son solubles en agua y debido a que su gravedad específica es mayor que la del agua, decantan al fondo del vaso precipitado.

Tabla 12: Resultados tiempo de retención.

Muestra	T° [°C]	T_i [min]	T_f [min]
ST-W100-0606	45	2:46	5:47
ST-W100-0606	55	2:57	5:15
ST-W100-0606	65	2:51	5:03
AA-W200-1210	45	3:01	5:55
AA-W200-1210	55	2:58	5:07
AA-W200-1210	65	3:10	5:58

En la Figura 20 y la Figura 21 se puede observar el proceso de decantación los polvos de almidón y agar-agar respectivamente.



Figura 20: Decantación de mezcla de bioplástico a base de almidón calentada hasta 45 °C, con un tiempo de reposo de 3 [min]

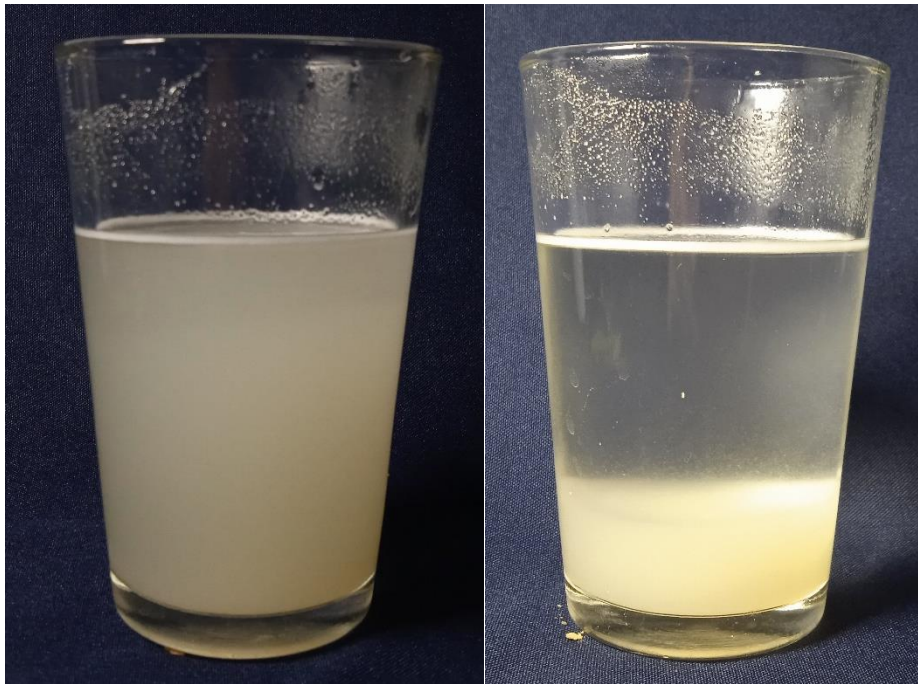


Figura 21: Decantación de mezcla de bioplástico a base de agar-agar calentada a 45°C, con un tiempo de reposo de 3 [min] aproximados.

De este experimento se puede concluir que almacenar la mezcla de forma estática para posteriormente aplicarla a procesos de impresión 3D no es viable si el tiempo de impresión de una figura es mayor a los 3 [min] debido a que los polvos de agar y almidón decantan y la mezcla ya

no sería homogénea. Se debe encontrar otra forma de almacenarlos o aplicar un sistema que permita agitar la mezcla.

4.1.3. Almacenamiento hermético

Al realizar este experimento se pudo determinar que los biomateriales no gelatinizan completamente al almacenarlos en un recipiente hermético una vez alcanzado el punto de gelatinización.

Se observa en la Figura 22 una de las líneas realizada con bioplástico a base de almidón después de dos días de ser almacenada en una jeringa. En general, las muestras de este biomaterial presentan una textura granular y se mantiene en un estado fluidizado por más de 3 días dentro de una jeringa, donde fuera del plazo de las pruebas para observar la gelatinización en espacios herméticos, una muestra duro un tiempo de 1 mes en buen estado. Esto se puede deber a que el agua no poder salir de la pasta que se genera alcanzado el punto de gelificación, evitando que esta se retrograde y los enlaces secundarios entre las cadenas de amilosa y amilopectina que las componen se unan.

Las muestras pueden generar capas por el método FDM, con la diferencia que la parte exterior de sus capas se seca en un mayor tiempo comparado con el experimento anterior, alrededor de 4 [hrs] a diferencia que toda la figura se seca al mismo tiempo, tanto exterior como interior.



Figura 22: Línea de bioplástico a base de almidón almacenada en jeringa durante 2 días.

El bioplástico a base de agar-agar no gelatinizo completamente durante los 3 días que tomo la prueba y en un período de tiempo fuera del oficial, hasta un mes. Con las muestras almacenadas entre uno y dos días se pudieron generar capas con el método FDM. Con la muestra de tres días de almacenamiento, la fórmula no puede generar una línea continua y por ende no puede formar capas, esto se puede apreciar en la Figura 23. Esto se puede deber a que este material aumenta su grado de gelificación dentro de la jeringa, lo que produce un aumento de la viscosidad aumentando el esfuerzo cortante entre la boquilla de la jeringa y la pasta, produciendo cortes en la línea.



Figura 23: Línea de bioplástico a base de agar-agar almacenada en jeringa durante 3 días.

Un fenómeno que se presentó con la receta a base de agar-agar es que si se supera la temperatura de gelatinización por alrededor de 5°C , este se solidifica por completo dentro de los contenedores herméticos, por lo que al preparar este material se debe ser extremadamente cuidadoso y controlar la temperatura constantemente en su preparación.



Figura 24: Gelatinización total de bioplástico de agar-agar al ser calentado sobre su temperatura de gelatinización

Estos resultados muestran una alternativa de almacenamiento para los biomateriales evitando mecanismos extra para mantener una mezcla homogénea. También es atractivo para el diseño del equipo que el material se pueda cocinar previamente, así evitar realizar un equipo de cocción.

4.1.4. Variación de agua

La variación del agua permitió identificar posibles mejoras en las recetas para aplicarlas en impresión 3D.

Almidón

Para bioplásticos basados en almidón las recetas ST-W200-0606 y ST-W150-0606 no logran generar una estructura de soporte debido a que el material, al llegar al punto de gelatinización presentan viscosidades observadas bajas, lo que impide que las capas generadas conserven su forma y colapsan de inmediato.

La receta ST-W100-0606 presenta una viscosidad mayor a las recetas anteriores, puede generar capas, pero con la limitación de entre 3 capas sucesivas antes que colapse la estructura. La definición de las capas no es del todo clara, pero se pueden distinguir entre sí.

La receta ST-W060-0606 presenta una viscosidad observada alta al momento de alcanzar su punto de gelificación. Genera una estructura capaz de soportar 5 capas antes de colapsar lo que daría mejores resultados al aplicarla en impresión 3D.

Agar-Agar.

La receta AA-W250-1210 fue la única que no pudo generar capas de soporte para formar figuras tridimensionales. Presenta una viscosidad observada baja, lo que colapsaba el material inmediatamente al ser puesto en una superficie horizontal por efecto de la gravedad.

La receta AA-W200-1210 puede generar capas que es difícil identificar entre sí, una vez alcanzado el punto de gelificación, presenta una viscosidad media baja, esto provoca que, a la tercera capa, la estructura colapse.

La muestra AA-W150-1210 presenta una viscosidad observada media al llegar a la temperatura de gelificación, esto le permite generar capas con buena definición, que colapsa a la cuarta capa.

La receta AA-W100-1210 al llegar al punto de gelatinización, presentaba una viscosidad alta que solidifica en un tiempo menor de 3 [min], genera capas bien definidas que pueden posicionarse entre 5 capas antes de colapsar.

Para ambos bioplásticos se puede observar que a menor cantidad de agua en las fórmulas se obtienen mayor número de capas generadas, pero con una viscosidad lo que se podría traducir en una mayor potencia en el equipo que se diseña.

4.1.5. Calentado posterior

Los resultados de esta prueba permitieron revelar que al aplicar calor a los bioplásticos almacenados antes de ser impresos, presentan una mejor calidad de capas que al no ser calentados.

Este resultado se da para ambos bioplástico, a mayor temperatura, disminuye la textura rugosa del material y otorgando un tono transparente una vez seco el material, pero también se reduce el tiempo de gelatinización del bioplástico lo que produce que las capas no se adhieran entre sí. Esto

puede representar un problema y se debe tener en consideración al realizar impresiones de gran tamaño, por lo que se debería aplicar mayores temperaturas a volúmenes pequeños y una menor temperatura al imprimir volúmenes grandes.

A pesar de que ambas recetas reaccionaran similar, tienen sus diferencias. Para el material a base de agar-agar, a mayor temperatura presenta una menor viscosidad, lo que hace colapsar las capas por efecto de la gravedad, deformándolas y perdiendo definición. Se debe considerar que a temperaturas mayores que 90[°C] se tiene este problema.

Para la receta de almidón se pudieron generar capas de buena calidad hasta los 100[°C], presentando el problema que a mayor temperatura las capas no se adhieren entre sí. Su estructura se mantiene estable a altas temperaturas debido a que la viscosidad observada se mantiene constante.

Otra característica se observó para ambos bioplásticos, es que, al dejar secar un tiempo de una semana, las muestra que se les dio un baño maría a menor temperatura, presentaron cortes y en mayor cantidad en comparación a las muestras que se sometieron a una mayor temperatura previa a la impresión. Esto se puede observar en la Figura 25 y la Figura 26 para el bioplástico basado en almidón y agar-agar respectivamente.

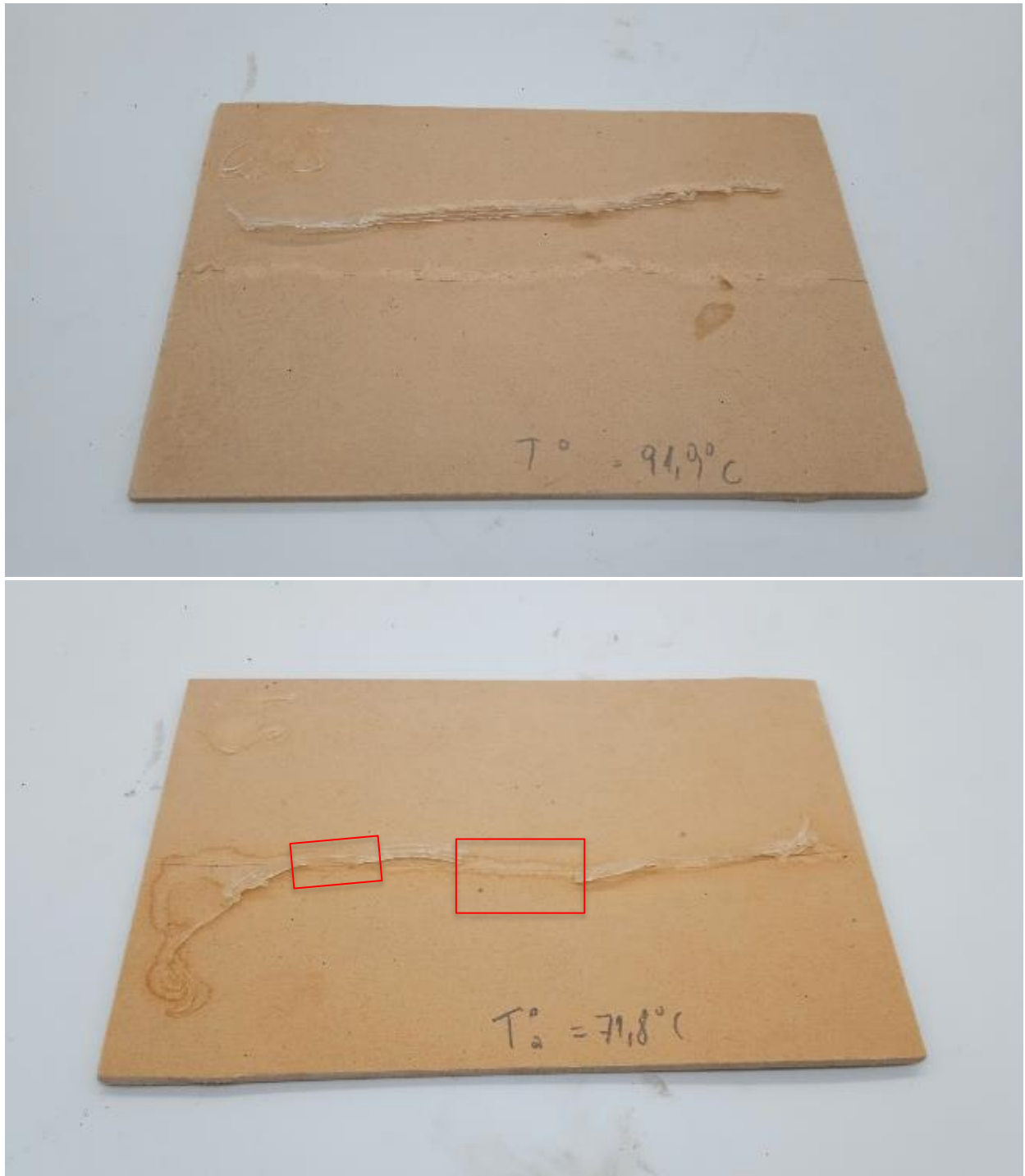


Figura 25: Resultados de calentado posterior para bioplástico a base de almidón. En la figura superior calentado alrededor de 92 [°C]. En el parte inferior, el mismo biomaterial calentado hasta 72[°C] donde en los recuadros rojos se indica el corte de la línea generada.

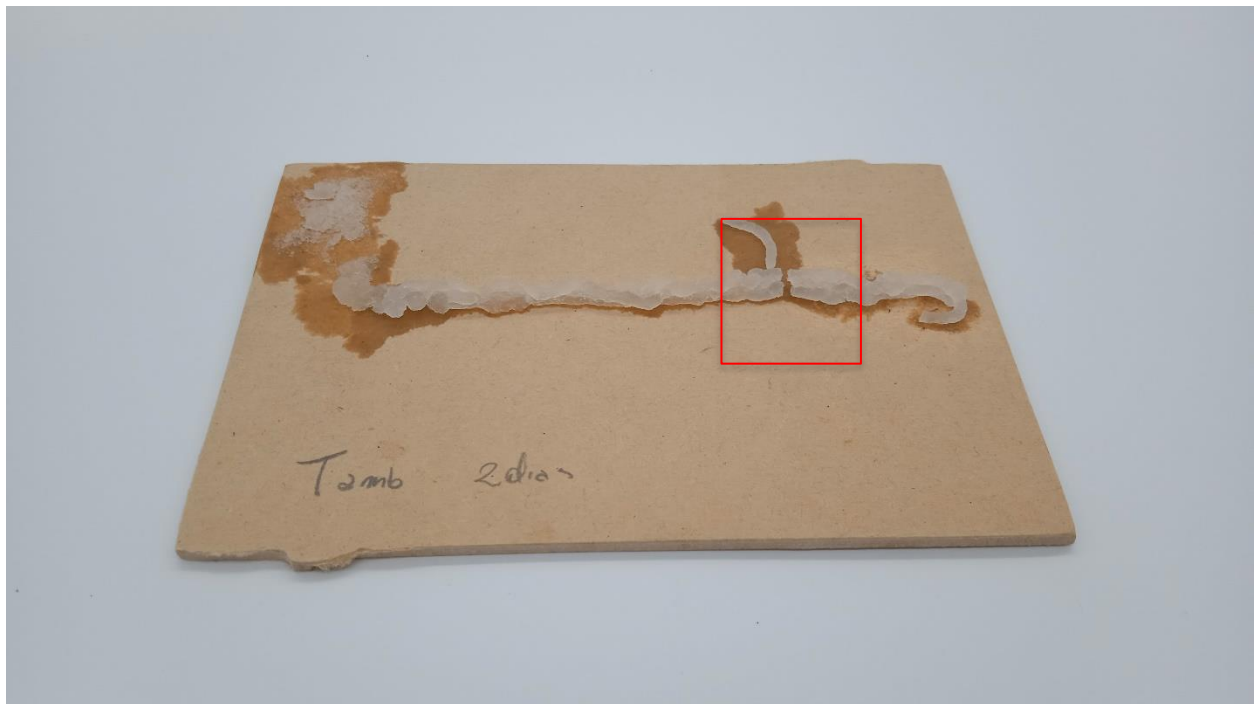
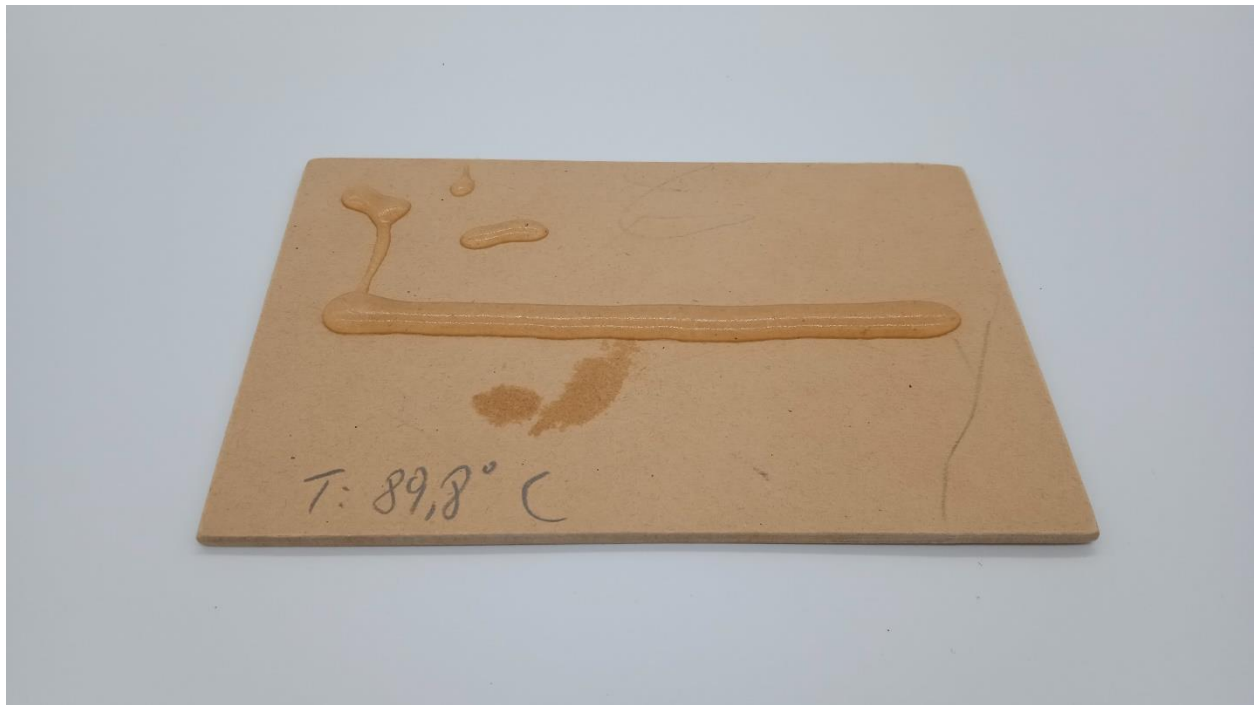


Figura 26: Calentado posterior para bioplásticos a base de Agar-Agar. en la parte superior, muestra calentada hasta los 90[°C]. en la parte inferior muestra a temperatura ambiente, donde se aprecia un corte de la línea después de ser aplicada.

Dado estos resultados las temperaturas de impresión para el bioplástico de agar-agar debe ser entre los 80[°C] y los 90[°C]. Para el material a base de Almidón se debería aplicar temperaturas entre los 80 [°C] y los 100 [°C], que es los rangos de temperatura que se observaron una calidad adecuada de la textura, unión de capas, definición y características una vez seco los bioplásticos.

4.2 Selección de componentes

Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica destinada a calentar el extrusor para imprimir el material a la temperatura deseada. Es un modelo estándar para 220 [V], tiene un diámetro interno de 30[mm] y un largo de 50 [mm] que consume 235 [W].



Figura 27: Resistencia térmica de boquilla seleccionada.

Conectores rápidos

Los conectores rápidos para agua-gas tienen la ventaja de unir las mangueras que transportan los fluidos de una manera rápida y sin necesidad de abrazaderas. Se seleccionaron conectores para 1/2" de dos tipos: un conector macho PQ-MPQ NPT de 1/2" con cuerpo de acero inoxidable y resiste una temperatura máxima de 190 [°C] y una unión PQ-MPQ para entrada y salida de 1/2" con cuerpo plástico con una temperatura máxima de trabajo de 40[°C]. Ambos conectores presentan una presión de trabajo de 10 [bar].

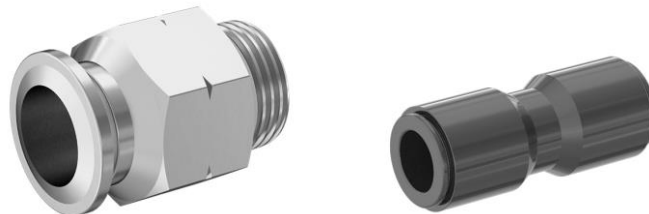


Figura 28: Conectores rápidos: a la izquierda conector macho NPT 1/2 ". A la derecha unión PQ-MPQ de 1/2". Imágenes referenciales

Manguera.

La manguera debe permitir que el fluido pase del contenedor al extrusor cuando el sistema de propulsión está funcionando. Una manguera de ½" de Poliuretano es adecuada para esta labor, ya que es compatible con las conexiones seleccionadas y presenta una flexibilidad mayor que los tubos de polietileno.

Relé estado sólido

El relé de estado sólido (SSR por sus siglas en inglés) permite conmutar el paso de la corriente cuando se aplica una pequeña carga eléctrica en sus terminales, permite controlar la resistencia de boquilla. El SSR de la marca FOTEK modelo SSR-25DA permite el paso de corriente alterna entre 24 a 380 [V] al aplicar corriente continua entre un rango de 3-32 [V] con una capacidad de 25 [A].



Figura 29: Relé modelo SSR-25DA de FOTEK.

Motor Paso a Paso

Un motor paso a paso (o Stepper) permite controlar su movimiento rotatorio en pasos de 1.8° comúnmente, por lo que se utilizan en labores de precisión. El motor seleccionado es del tipo NEMA 17 bipolar con un sistema de reducción por engranes planetarios de relación 5:1. Presenta un torque de retención de 50 [N*cm] (sin contar la reducción), voltaje de operación de 2.8 [V] y una corriente máxima de 1.68 [A] y un eje de 8 [mm] de diámetro. lo que lo hace compatibles con la placa de control de la impresora ender 3.

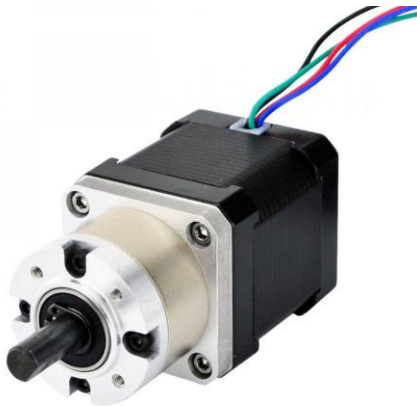


Figura 30: Motor NEMA 17 con sistema de reducción 5:1.

Poleas y Correa de transmisión

Las poleas permiten transmitir el torque y movimiento rotacional del motor. Se escogieron poleas dentadas de aluminio del tipo GT2-6 de 20 y 60 dientes para ejes de 8 [mm]. La correa seleccionada es del tipo GT2-6 con un largo de 268 [mm]. Este conjunto de poleas y correa permite transmitir el movimiento rotacional con precisión.



Figura 31: Poleas dentadas seleccionadas. A la izquierda polea GT2-6 de 60 dientes. A la derecha polea dentada GT2-6 de 20 dientes.

Husillo

Es una vara roscada que permite transmitir movimiento rotatorio a lineal con gran precisión. Se selecciono la vara roscada TR8 de acero inoxidable, con un paso de 2 [mm], 400 [mm] de largo y 4 hilos con su correspondiente tuerca de latón.



Figura 32: Husillo TR8 con paso de 2[mm] y 4 hilos con su tuerca de latón. Imagen referencial

4.3 Diseño del equipo

El diseño del equipo soluciona los problemas observados en los resultados de los experimentos previos y los parámetros dados que se muestran en la **Tabla 13**. Se diseñó un sistema de extrusión para poder realizar las pruebas que cuenta con 3 subsistemas: Extrusor, Contenedor y sistema de propulsión. Este equipo se aprecia en la **Figura 33**

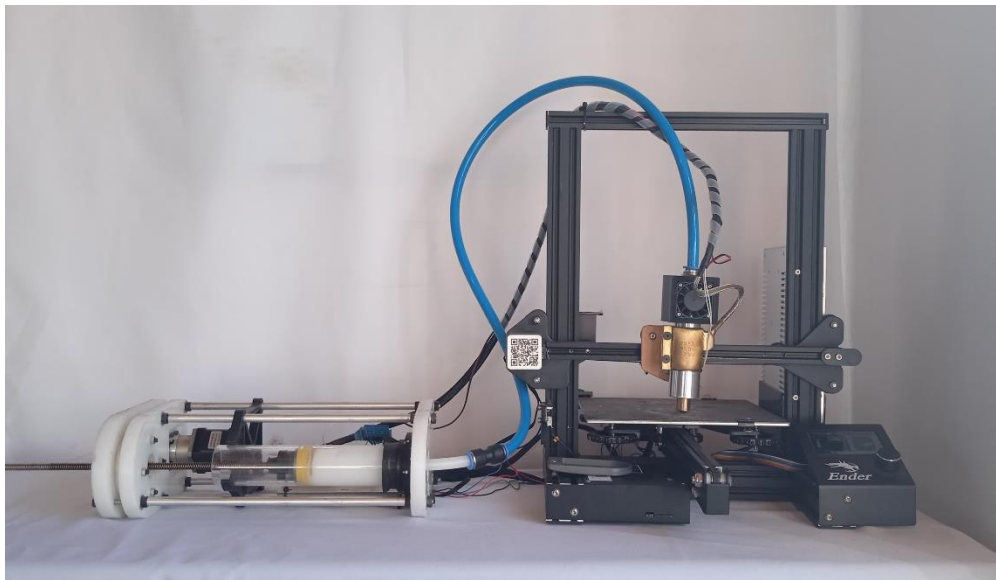


Figura 33: Equipo diseñado implementado en impresora ender 3.

Tabla 13: Parámetros de diseño para equipo diseñado.

ρ_{flujo}	1066,7	[kg/m ³]
μ_{flujo}	8000	[Pa*s]
T_{IM}	100	[°C]
Φ_{BOQUILLA}	4	[mm]
V_{im}	50	[mm/s]
Capacidad	200-500	[cc]

4.3.1. Extrusor

Su principal función es calentar el material a la temperatura deseada y depositar este sobre la cama de impresión que mediante el sistema de control numerico computarizado (CNC) de la impresora creará en cuerpo 3D.

La potencia calórica requerida para alcanzar los 100 [°C] del bioplástico, se calculó según la ecuación 5 que se encuentra en la memoria de cálculo presente en anexos y con las variables mostradas en la Tabla 14, obteniendo una potencia de 187.7 [W] sin considerar pérdidas de calor.

Tabla 14: Variables utilizadas para el cálculo de potencia calórica requerida por el extrusor.

T°_{out}	100	[°C]
T°_{in}	5	[°C]
Q	650	[mm ³ /s]
ρ	1066,6	[Kg/m ³]
c_{pm}	2,85	[kJ/(kg°K)]

El material seleccionado para el cuerpo del extrusor es el aluminio 6061. Esto se debe por ser un buen conductor de calor, fácil de adquirir, económico y no se presenta corrosión con el agua.

Su geometría es de un tubo hueco con distintas secciones cilíndricas, donde sus diámetros son dados por la resistencia de boquilla seleccionada. El largo total es de 120 [mm], donde los largos de las distintas secciones se determinaron por simulación computacional, para alcanzar la temperatura dada para el bioplástico. En la Figura 34 se aprecia una vista en corte del cuerpo del extrusor.

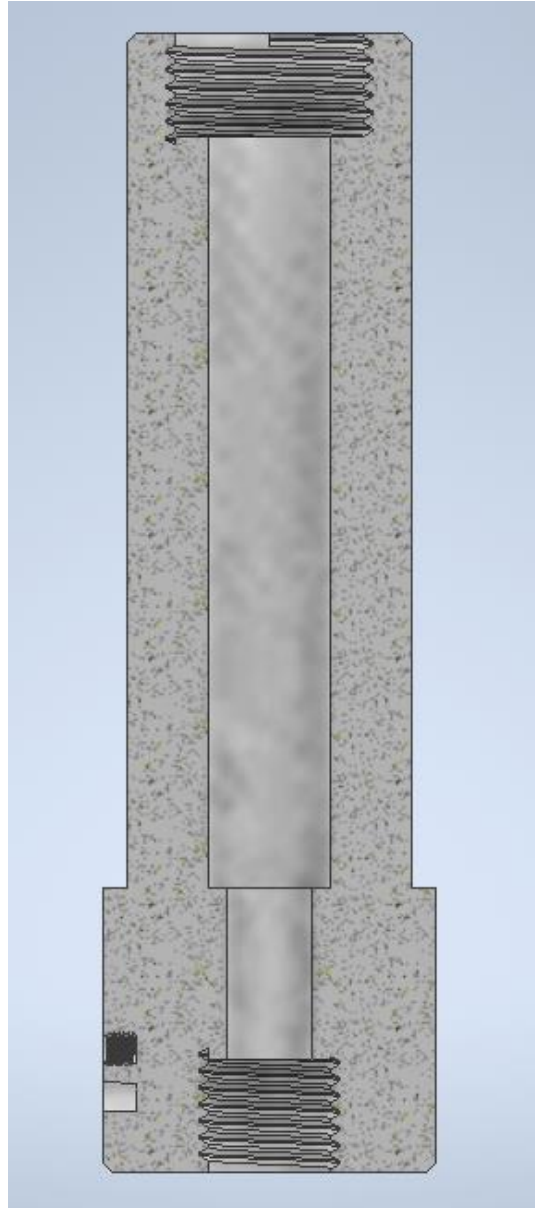


Figura 34: Cuerpo del extrusor diseñado en software C.A.D. Vista en corte. Elaboración propia.

En la parte superior, el extrusor presenta una junta rápida de acero inoxidable la que permite unir la manguera de transporte del bioplástico con el extrusor de manera rápida y fácil.

El extrusor cuenta con una boquilla de latón debido a su alta resistencia a la corrosión, su coeficiente de dilatación menor que la del aluminio, permitiendo deformaciones menores en el diámetro de la boquilla y resistencia al desgaste. El diámetro de salida de la boquilla es de 4 [mm], presenta una rosca M14 de 15 [mm] de largo para poder fijarse al cuerpo de aluminio.

El extrusor tiene con una termo-resistencia de 100 [kOhm] que se utiliza para retroalimentar controlador PID presente en la impresora Ender 3 y así mantener la temperatura de impresión constante. Este elemento se posiciona cerca de la salida del extrusor.

El extrusor se monta a la impresora como se muestra en la Figura 36. Presenta una placa de madera que evita que por radiación partes de la impresora de goma alcancen temperaturas mayores a las que pueden soportar.



Figura 35: Extrusor

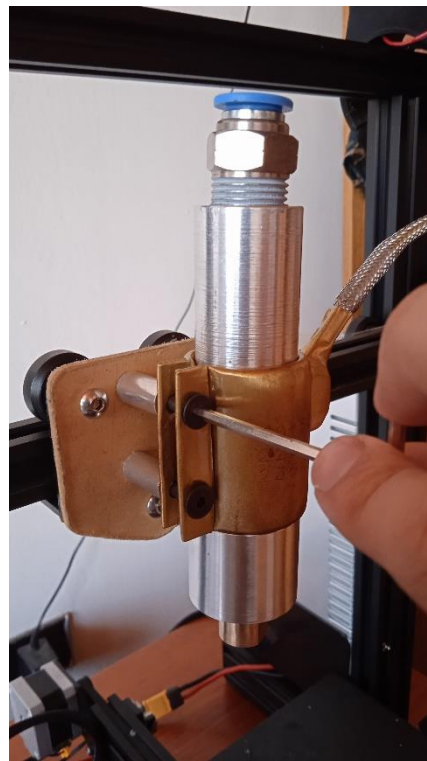


Figura 36: Instalación de extrusor en el carro del eje x de la impresora creality ender 3.

4.3.2. Contenedor

El contenedor para bioplásticos, el cual tiene como función almacenar de forma hermética los biomateriales que serán impresos y tiene una capacidad de 200 [cc] de almacenamiento.

Se construyó con materiales presentes en el FabLab, utilizando para su cuerpo un tubo acrílico de 44.45 [mm] (1.75 [pul]) de diámetro exterior y con un espesor de pared de 6.35 [mm] (0.25 [pul]) y un largo total de 255 [mm].

El contenedor cuenta en su parte interior con un tapón con un agujero de ½ [pul]. Esta medida se determinó mediante simulación computacional con las condiciones mostradas en la **Tabla 15**.

Tabla 15: Condiciones de simulación para agujero de salida de contenedor.

Q_{entrada}	630	[mm ³ /s]
P_{salida}	1	[atm]
ρ_{fluido}	1066,7	[kg/m ³]
μ_{fluido}	8000	[Pa*s]

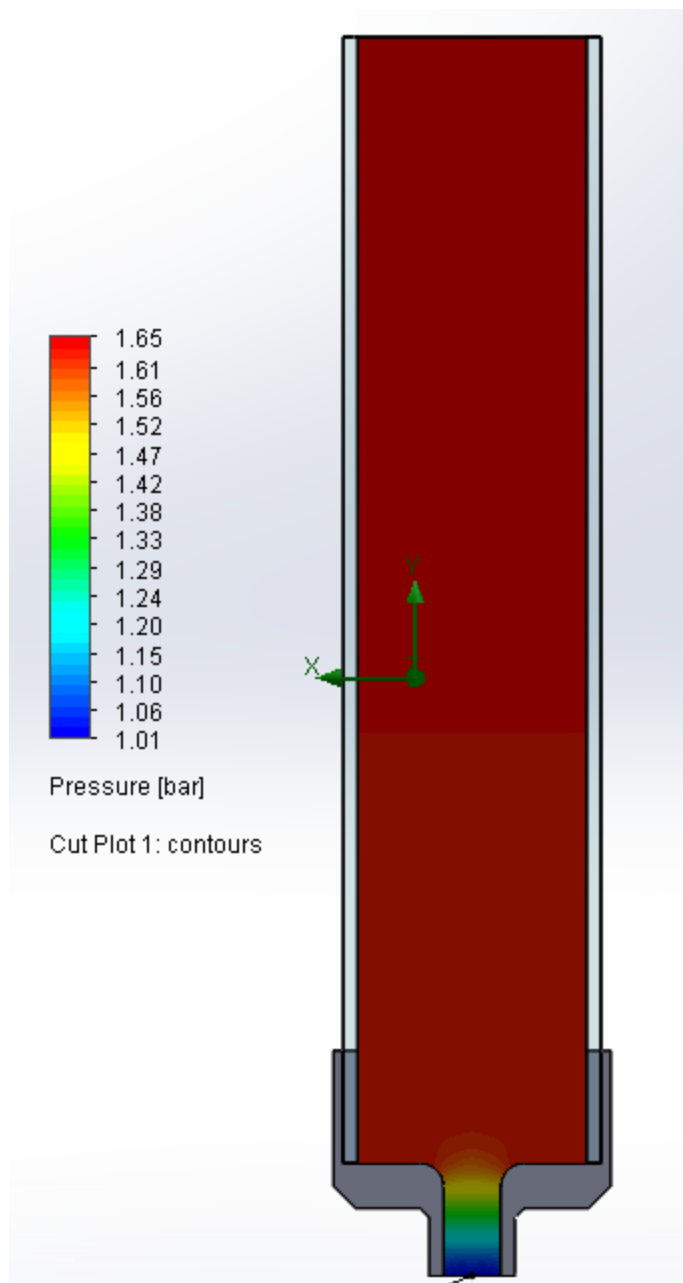


Figura 37: Simulación computacional que entrega la pérdida de presión en el contenedor según el diámetro del agujero de salida.

La tapa inferior se fabricó mediante impresión 3D con ABS por su mayor resistencia a la temperatura y se adhiere a su agujero con pegamento epóxico un tubo de polietileno de $\frac{1}{2}$ [pul] que se conectara a la manguera que lleva el bioplástico al extrusor mediante una unión rápida. Tiene sellos de silicona que evita filtraciones del biomaterial. La tapa se puede remover fácilmente para poder limpiar restos de material.

Para fijar la tapa al tubo y evitar que se salga del contenedor cuando se ejerce presión con el embolo, se creó un sistema de fijación entre el contenedor y el sistema de propulsión que mediante

un movimiento rotatorio se traban estos elementos, permite fijar el tapón y el contenedor a la vez. El sistema presenta una pieza de impresión 3D en PLA, la cual esta fija en el tubo del contenedor. En la Figura 39 se observa los componentes de la parte inferior del contenedor.

El contenedor presenta un émbolo con un sello a medida para garantizar el hermetismo del contenedor, donde se usa silicona de caucho de 25 shore. Este elemento se desplaza cuando el sistema propulsor funciona, lo que hace fluir el material hasta el extrusor. Se compone también de una parte plástica fabricada en ABS por impresión 3D que presenta dos orificios en su parte superior donde se conecta a la vara roscada del sistema propulsor.

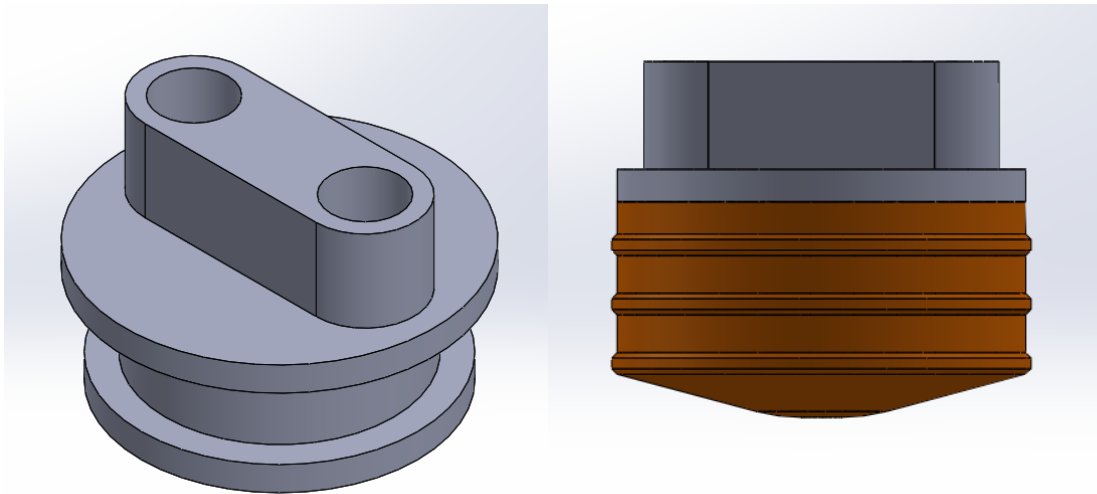


Figura 38: Embolo diseñado. A la izquierda parte de ABS del embolo en software C.A.D. A la derecha vista alzada del émbolo con su parte de silicona.



Figura 39: Parte inferior del contenedor

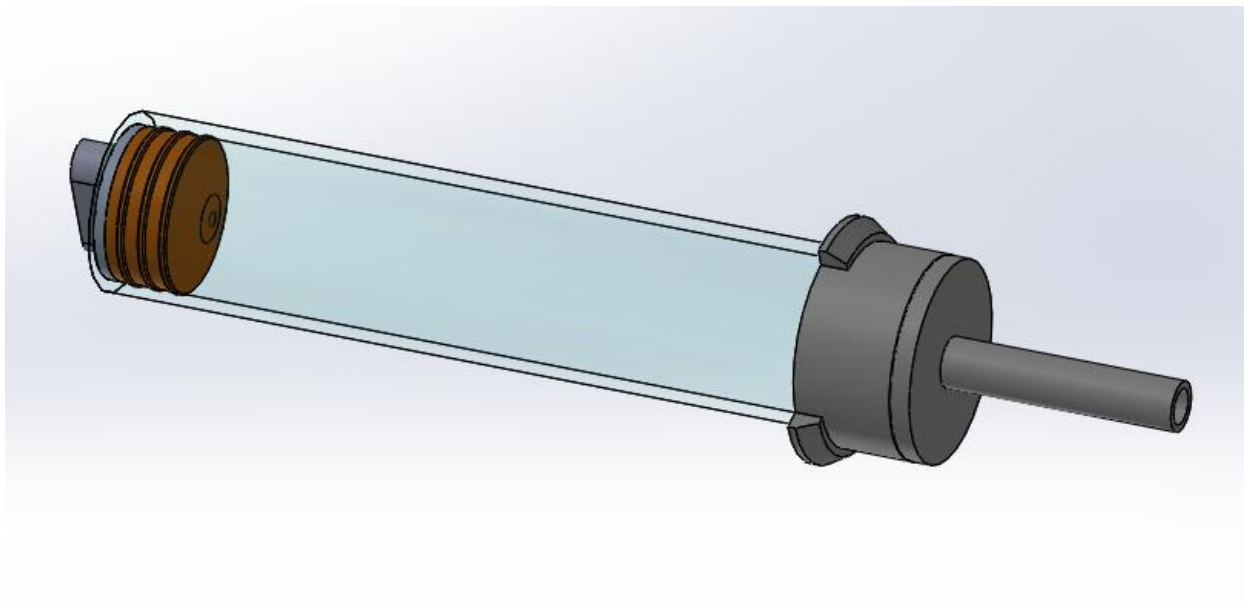


Figura 40: Contenedor diseñado. Modelo en 3D.

4.3.3. Sistema propulsor

La principal función de este sistema es generar el movimiento que desplaza al fluido. El movimiento se genera por la acción de un motor NEMA 17 con un sistema de reducción incluido con relación 5:1. Este motor se seleccionó ya puede generar un torque mayor al necesitado por el

sistema (1.091 [Nm] con 12.43 [RPM]) para propulsar el material. También se trabaja con este tipo de motor ya que se puede conectar directamente al sistema electrónico de la impresora y controlar desde ella.

El motor se fija a un sistema reductor, el que tiene por función aumentar el torque en una relación 3:1. Para el reductor se utilizan poleas GT2 de 20 y 60 dientes junto a una correa GT2 de 6 [mm] y 268 [mm] de perímetro. La polea menor se posiciona en el eje del motor NEMA 17.

La polea de 60 dientes se mantiene en su posición mediante un soporte que también permite girar a la polea libremente y resiste las fuerzas radiales. Se construye de Nylon 6 para evitar el desgaste en la polea. Esta polea también se le inserta una tuerca TR8 para transformar el movimiento rotatorio en lineal. Estos componentes se montan entre dos placas de Nylon 6 de 16 [mm] de espesor, donde el centro de las poleas está a una distancia de 93.75 [mm]. El reductor se puede ver en la Figura 41.

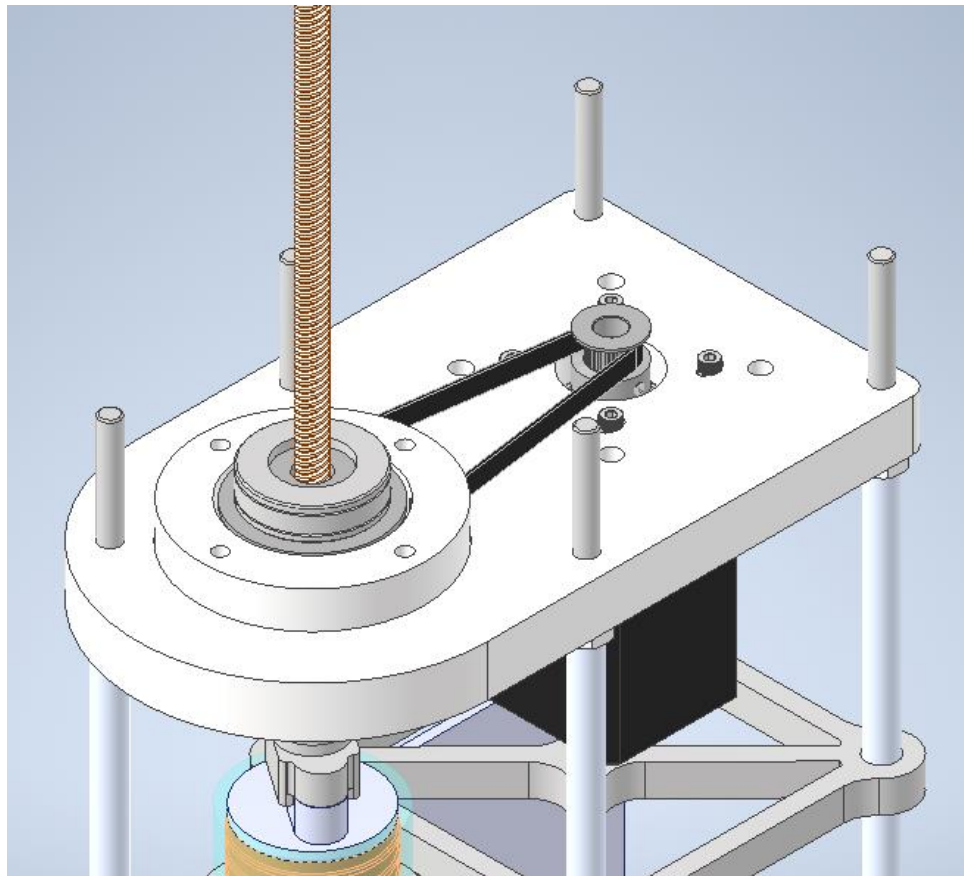


Figura 41: Interior del sistema de reducción, modelo tridimensional.

La polea GT2 de 60 dientes mueve una vara roscada TR8 de 400 [mm] linealmente. Esta vara se conecta al embolo del contenedor y así impulsar el bioplástico. La vara roscada se conecta al émbolo mediante la pieza plástica mostrada en la Figura 42. Su diseño permite que lavar roscada se mantenga alineada con la polea y el centro del contenedor, esto evita roces por desviación. También su diseño permite presionar el embolo de forma uniforme.

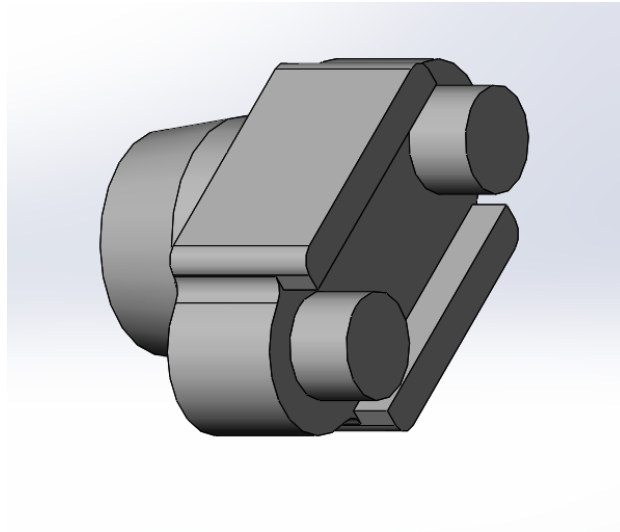


Figura 42: Pieza de PLA que une la vara roscada con el embolo.

El sistema cuenta con una placa inferior de Nylon 6 de 16 [mm] la que permite sostener el contenedor y mantener en su posición al reductor. Se encuentra a una distancia de 330 [mm] del reductor, y se unen por cinco varas roscadas de $\frac{1}{4}$ [pul] con tuercas y golillas. Se cubren estas barras con un tubo de aluminio de 9 [mm] de espesor que evita que los usuarios se dañen con la rosca de la barra.

Se diseño una pieza plástica la cual como finalidad tiene centrar el contenedor y se instala una placa plástica en los tubos inferiores que sirve para montar componentes eléctricos. Este equipo se puede observar en la Figura 43.

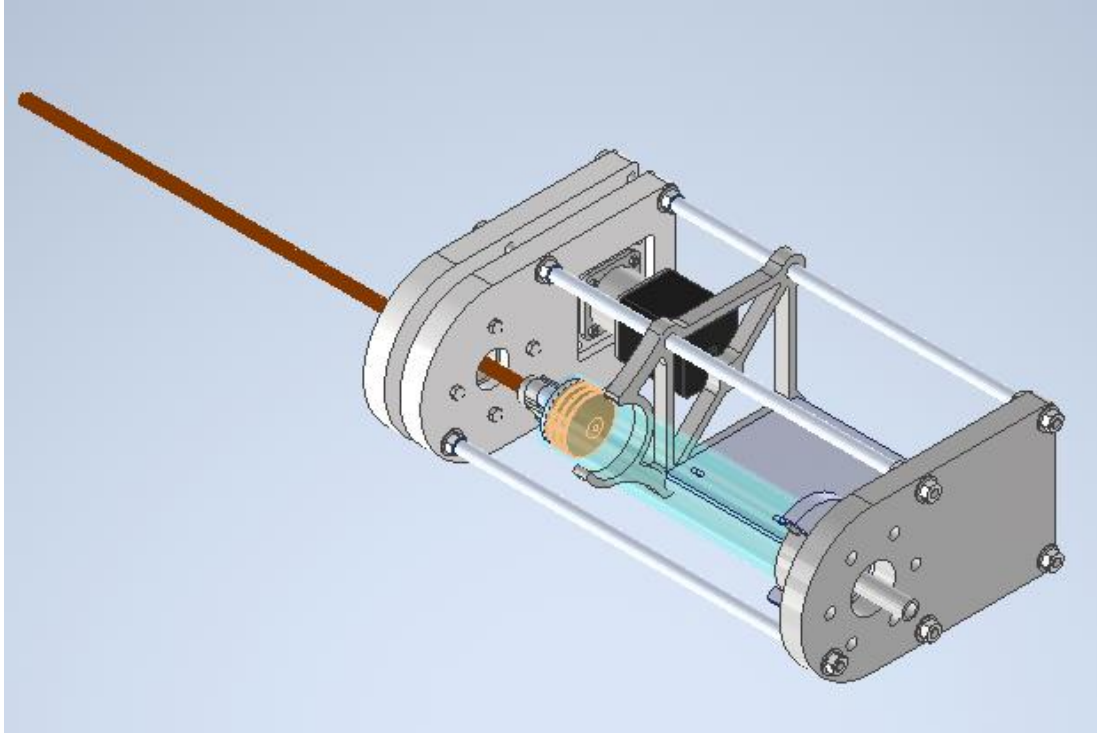


Figura 43: Sistema propulsor junto a contenedor en su posición final, modelo 3D.

4.4 Configuración de impresora

Firmware

Los pasos para que el motor del sistema de propulsión pueda desplazar 100 [mm] de bioplástico a la salida de la boquilla, se calcularon a partir de la ecuación de conservación de caudal y los pasos de la vara roscada TR8 incluyendo las reducciones del sistema. Este cálculo dio un valor de 101.7 [pasos/mm], los cuales se modificaron en la sección pertinente del código de programación.

```

/**
 * Default Axis Steps Per Unit (steps/mm)
 * Override with M92
 *
 *                               X, Y, Z [, I [, J [, K]]], E
 */
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80, 80, 400, 101.7 }
  
```

Figura 44: Configuración de pasos por milímetro para motores stepper de la impresora.

Otro parámetro modificado directamente en el código son los valores para el controlador PID. Al conectar el relé como se muestra en la Figura 45, se procede a configurar los valores mediante iteración, el mejor resultado para los constantes k_p , k_i y k_d son los mostrados en la Figura 46 en el recuadro rojo.

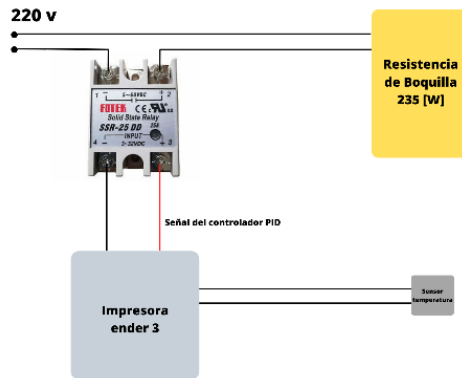


Figura 45: Conexión de resistencia de boquilla junto a relé.

```
#if ENABLED(PID_PARAMS_PER_HOTEND)
  // Specify up to one value per hotend here, according to your setup
  // If there are fewer values, the last one applies to the remaining
  #define DEFAULT_Kp_LIST { 21.73, 21.73 }
  #define DEFAULT_Ki_LIST { 1.54, 1.54 }
  #define DEFAULT_Kd_LIST { 76.55, 76.55 }
#else
  #define DEFAULT_Kp 31.73
  #define DEFAULT_Ki 0.54
  #define DEFAULT_Kd 76.55
#endif
#endif // PIDTEMP
```

Figura 46: Parámetros para constantes del control PID.

CURA

En el software CURA se configuró una Impresora 3D denominada “BioPrinter” personalizada con los parámetros similares a los pre establecidos para las impresoras ender 3 de Creality pero con modificaciones en el extrusor. Estos parámetros se muestran en la Figura 47.

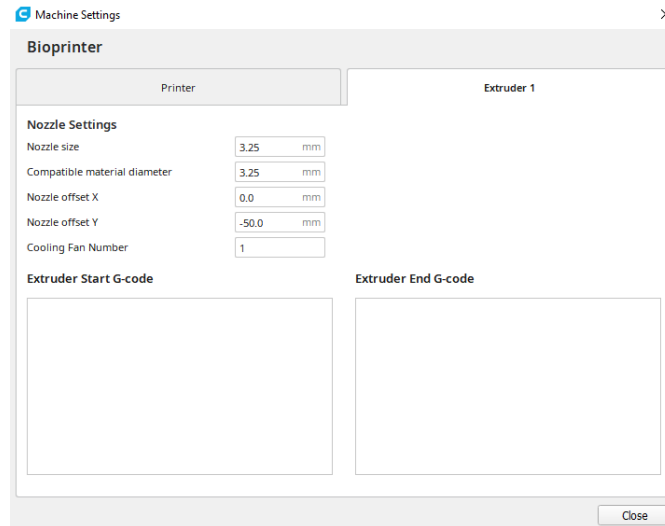


Figura 47: Parámetros ingresados a CURA para configuración de impresora ender 3D.

Aunque la medida de la boquilla de extrusión es de 4 [mm], se debió dar un valor de 3.25 [mm] a la boquilla y material, ya que el firmware presenta tope máximo del diámetro del material 3.25 [mm]. Esto generaba problemas en pruebas de impresión, por lo que se debe corregir este error con los parámetros de impresión. También el flujo se regula a 50% y no se utiliza retracción.

5. Resultados de Impresión

A continuación, se muestran los resultados de impresión que se obtuvieron con los bioplásticos a base de agar-agar y almidón.

5.1. Temperatura de impresión

En esta prueba se observó el comportamiento de ambos bioplásticos para las distintas temperaturas de impresión.

Agar-Agar

Al imprimir AA-W200-1210 a 60 [°C] se observa que el material puede formar el cuerpo geométrico por el método FDM y sus capas mantienen altura constante, pero sus bordes no están bien definidos y su textura es granular. Al secarse el color del material es blanco ámbar y las capas se mantienen unidas. El material es poco flexible. En la Figura 48 se puede observar la figura impresa.



Figura 48: Impresión de bioplástico a base de agar-agar a 60 [°C]

Al aumentar la temperatura de impresión a 80 [°C], la fórmula AA-W200-1210 puede crear el cuerpo geométrico por el método FDM y sus capas se mantienen constante. Las capas presentan bordes mejor definidos y la textura granular disminuye en comparación con la prueba anterior. Al secarse su color en blanco ámbar y las capas se mantienen unidas. En la Figura 49 se observa el cuerpo impreso.

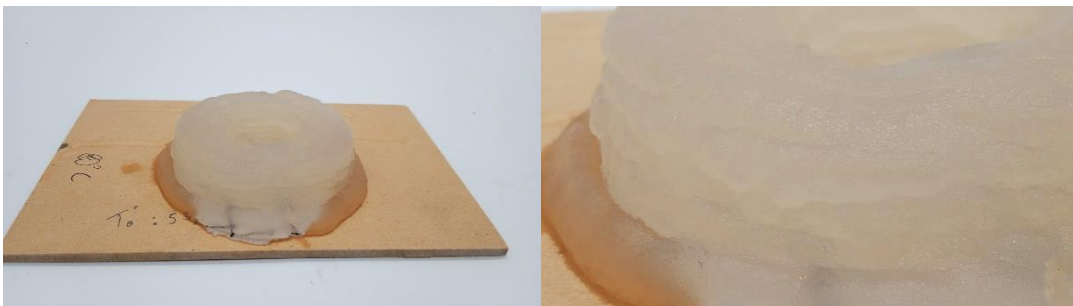


Figura 49: Impresión de bioplástico a base de agar-agar a 80 [°C]

El bioplástico al ser impreso a 90 [°C], puede crear volúmenes, pero no conserva las proporciones de la figura original. Sus capas se funden entre si y no se logran identificar. Su textura es lisa y al secarse su color se mantiene respecto a las pruebas anteriores. En la Figura 50 se aprecia el resultado de esta prueba.

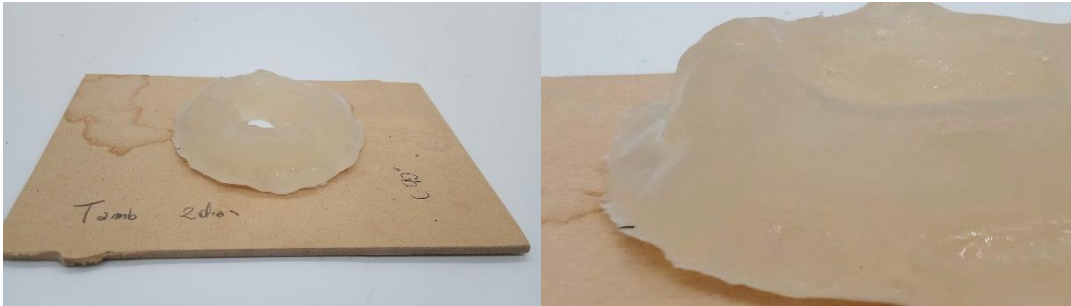


Figura 50: Impresión de bioplástico a base de agar-agar a 90 [°C]

Al imprimir la fórmula AA-W200-1210 a 100 [°C] no se pueden generar cuerpos mediante el método FDM, esto se debe a que el material está en un estado fluidizado que hace colapsar la estructura. El material depositado en la cama de impresión tiene una textura lisa y su color al secarse es un blanco ámbar, pero levemente transparente. La mayor fluidez de este material se puede dar por su propiedad de reversibilidad.

Para 90 [°C] y 100 [°C], se observó que el flujo ya no se depositaba en la cama de impresión controladamente, esto se puede deber por el vapor generado en el extrusor.

Almidón

La fórmula ST-W060-0606 al imprimirse con una temperatura de 60 [°C], no se pueden generar cuerpos geométricos con el método FDM. Esto se debe a que la pasta generada no puede soportar las capas que se superponen a ellas y la figura colapsa. Esto se puede dar por la viscosidad baja que posee.

Al imprimir este bioplástico con 80 [°C], se observa que este mediante el método de deposición de material fundido puede generar cuerpos tridimensionales. Las capas generadas presentan bordes redondeados que se unen con los bordes de las capas inferiores y superiores, distinguiendo con dificultad cada capa. Su textura es lisa y su color es blanco. La altura de capa es constante y al secarse las capas se mantienen unidas. Se puede observar el cuerpo impreso en la Figura 51.

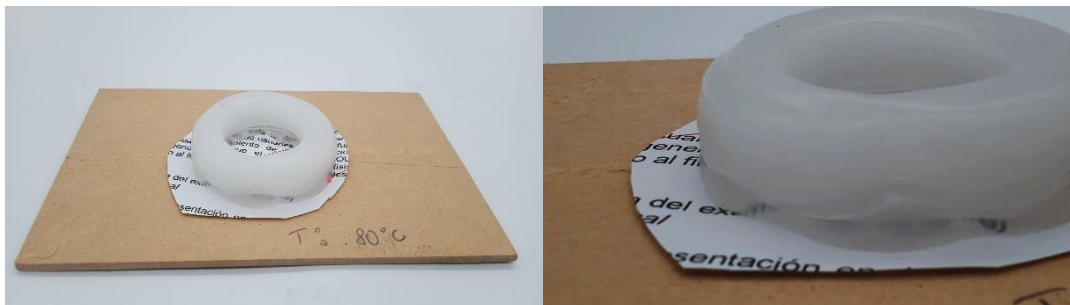


Figura 51: Bioplástico a base de almidón impreso a 80 [°C]

Con una temperatura de impresión de 90 [°C], la fórmula ST-W060-0606 genera figuras tridimensionales por el método FDM. Genera capas definidas con algunas irregularidades que se pueden dar por el vapor producido dentro del extrusor. Presenta un color blanco y al secarse las capas se mantienen unidas entre sí. El cuerpo se deforma levemente, curvando los bordes de la base hacia arriba.

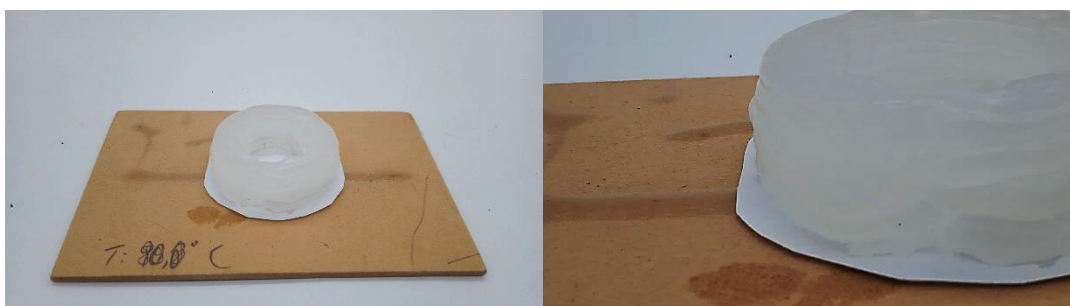


Figura 52: Impresión de bioplástico a base de almidón a 90 °C

Al aplicar una temperatura de impresión de 100 [°C] a la fórmula, el material puede formar cuerpos mediante el método por deposición de material fundido. Se generan capas irregulares, debido a que se genera mayor tasa de vapor dentro del extrusor. Al imprimirse su tono es blanco transparente y cuando se seca se opaca. El cuerpo se deforma curvando los bordes de la base hacia arriba y algunas capas se despegan de la otra. La Figura 53 muestra el cuerpo impreso.



Figura 53: Impresión de bioplástico a base de almidón a 100 °C

5.2. Temperatura de Cama de impresión

Agar-agar.

Este experimento solo se pudo realizar con el bioplástico a base de almidón. Esto se debe a que el equipo concebido no pudo propulsar el bioplástico a base de agar-agar ya que la correa de transmisión resbalaba de la polea GT2 de 20 dientes. Esto se puede dar por la viscosidad del material aumento debido a que se cambió la forma de cocinar la fórmula. Anterior mente se preparaban las fórmulas con una cocinilla eléctrica la cual se podía regular su potencia y se cambió por una cocina a gas. La cocina a gas no permite controlar la temperatura del bioplástico adecuadamente y dado la inercia térmica, al alcanzar el punto de gelificación, este se superaba entre 3 a 5 [°C], provocando en algunos casos que el material solidificara por completo dentro del extrusor. Todos los experimentos que se mostrarán serán resultados de las pruebas con almidón.

Almidón.

Para una temperatura de cama de 60 [°C], la figura impresa al secarse curva los bordes inferiores hacia arriba. Y sus capas se unen entre sí.

A una temperatura de 80 [°C] para la cama de impresión, los bordes inferiores al secarse no se curvan hacia arriba. Esto se puede dar ya que el material se imprime a la misma temperatura, lo que permite que el cuerpo se seque de una manera uniforme. La figura **Figura 54**, muestra la impresión a esta temperatura de cama.

Al aplicar temperaturas de 90 [°C] y 100 [°C] los bordes inferiores de la impresión no se curvan hacia arriba cuando el bioplástico se seca. Pero sus capas no se unen del todo y se separan en algunos puntos. Esto se puede deber ya que la cama está a una temperatura mayor que el material, se acelera el proceso de retrogradación, evitando que las capas se unan.

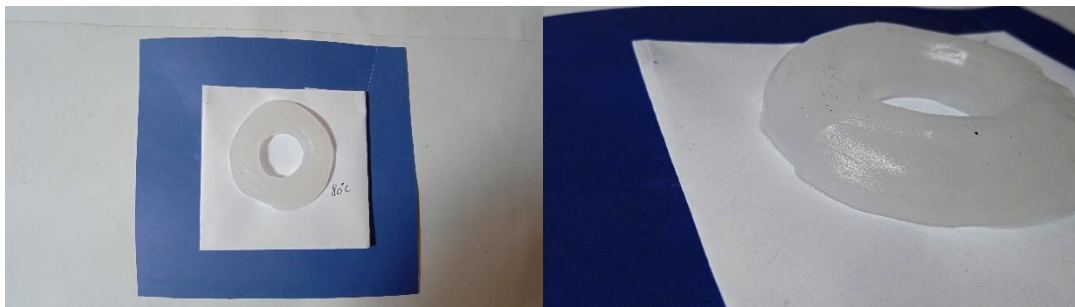


Figura 54: Impresión de bioplástico a base de almidón con T° de cama de impresión de 80 [°C]

5.3. Variación de Glicerina

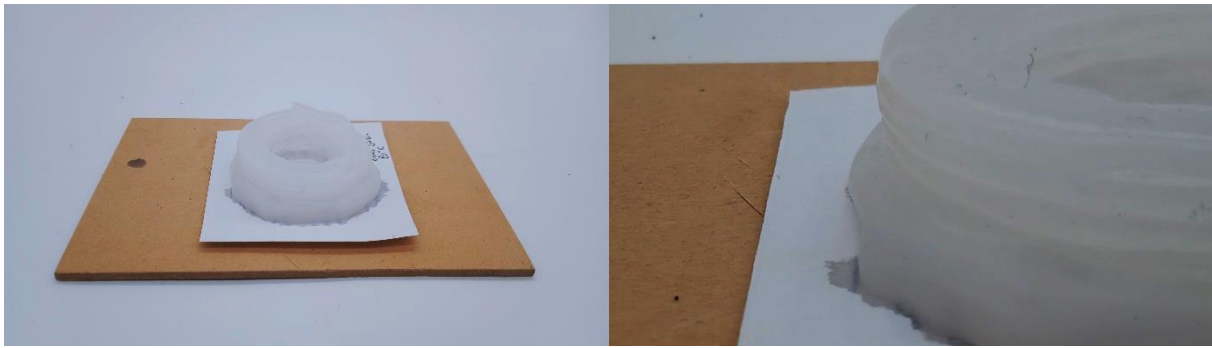
La fórmula ST-W060-0600 Se observa en la Figura 55 y se aprecia que genera capas definidas y de igual altura para ambas temperaturas de impresión. A la temperatura de 90 [°C] las capas tienden a separarse en algunos puntos.

Se genera una mejor definición con la temperatura de 90 [°C] y cuando ambas impresiones se secan, presentan un color blanco, textura lisa y el material es rígido. También se deforma la circunferencia cuando el material está completamente seco.

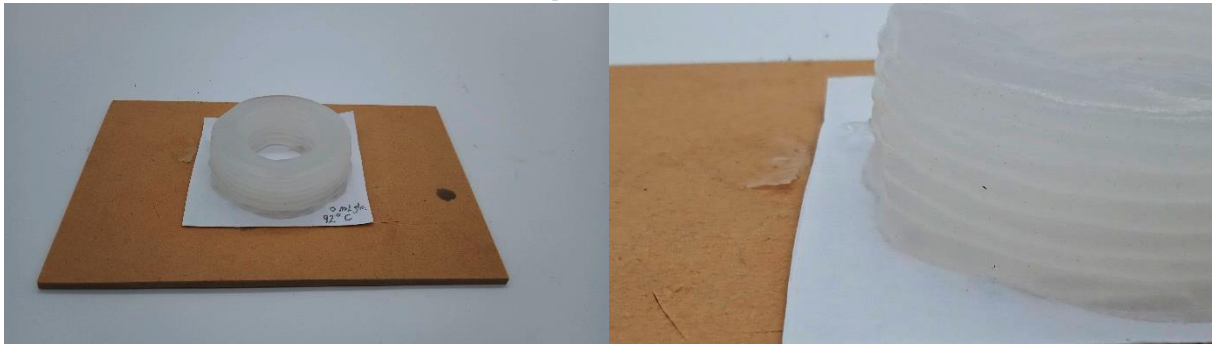
Las mediciones de las dimensiones del anillo se muestran en la Tabla 16. Donde se observa que el cuerpo se reduce un mayor porcentaje cuando se imprime a una mayor temperatura. Puede haber errores asociados a la medición.

Tabla 16: Dimensiones para receta ST-W060-0600

ST-W060-0600			
80°C	Inicial	Final	reducción %
D [mm]	54	-	-
h [mm]	16	8,7	54,4
e [mm]	11	5,5	50,0
90 °C			
D [mm]	53	-	-
h [mm]	17	7,1	41,8
e [mm]	13	5	38,5



a) Impresión a 80 [°C]



b) impresión a 90[°C]

Figura 55: Impresión con receta ST-W060-0600.

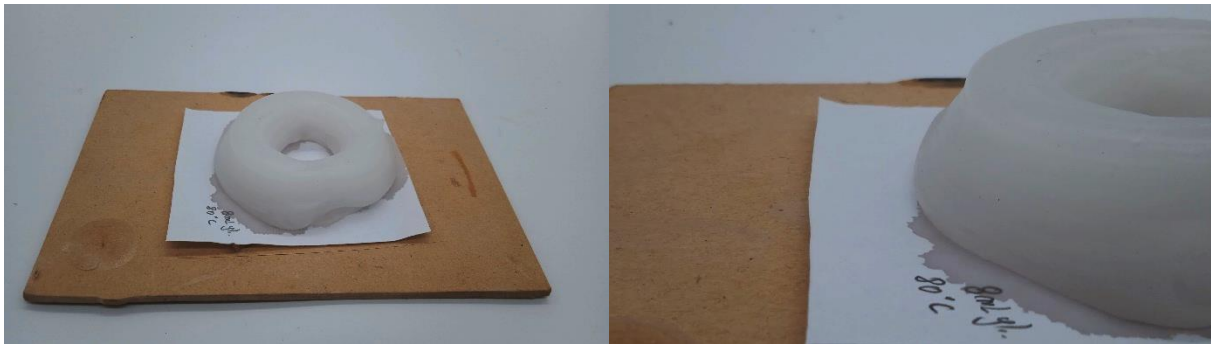
La fórmula ST-W060-0608 al ser impresas en ambas temperaturas genera cuerpos con altura constante, pero sus capas presentan distinta definición. Para una temperatura de impresión de 80 [°C] los bordes de sus capas tienden a fundirse levemente entre sí. Para 90 [°C] los bordes de capas están bien definidos e irregularidades se asocian al vapor producido dentro del extrusor. Se pueden observar los cuerpos en la Figura 56.

Al secarse, ambos cuerpos presentan color blanco, la circunferencia se mantiene y el material tiene una baja flexibilidad. En la Tabla 17 se puede ver la reducción de las figuras una vez seca. Para una mayor temperatura, presenta una reducción mayor y errores se pueden dar por medición.

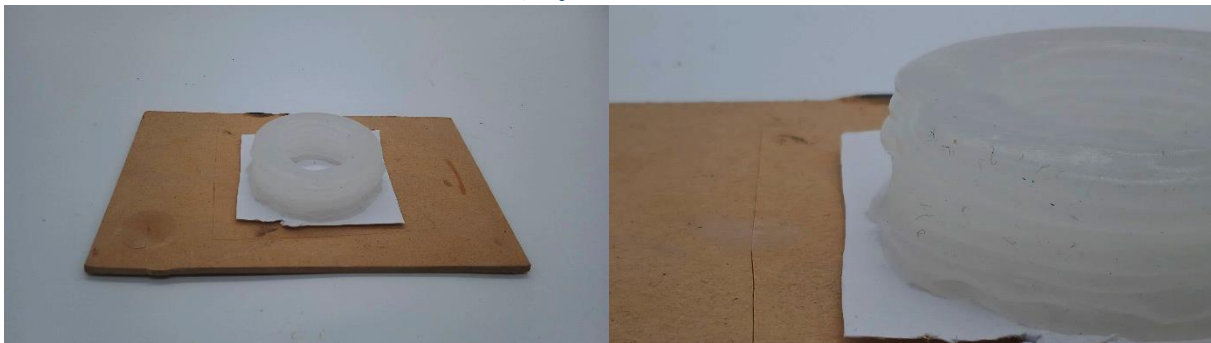
Tabla 17: Dimensiones para receta ST-W060-0608

ST-W060-0608			
80°C	Inicial	Final	reducción %
D [mm]	52	34,3	66,0
h [mm]	16	8,5	53,1
e [mm]	15	8,2	54,7
90 °C			
D [mm]	54	35,6	65,9

h [mm]	15	9,9	66,0
e [mm]	17	7,1	41,8



a) impresión a 80°C



b) impresión a 90 [°C]

Figura 56: Impresión con receta ST-W060-0608.

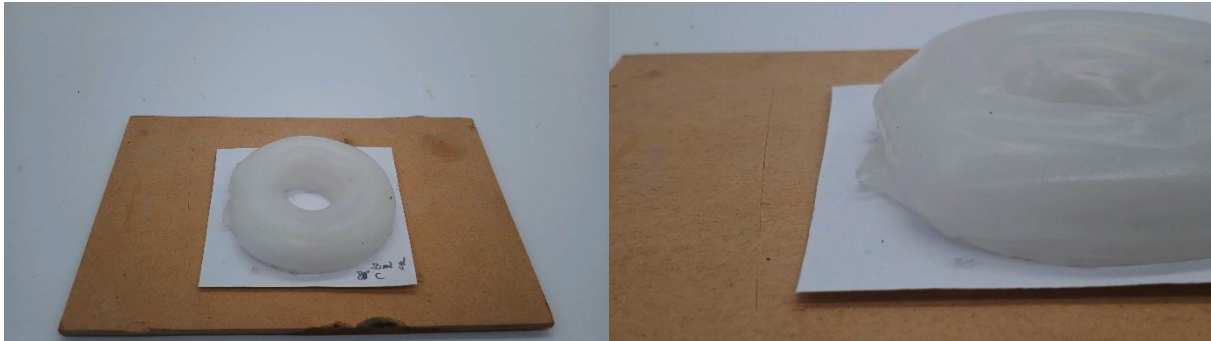
Al imprimir la fórmula ST-W060-0620, genera capas de misma altura. Para 80 [°C] las capas se fusionan en sus bordes, presentando una definición menor que al imprimir a 90 [°C]. Estos cuerpos se pueden observar en la Figura 57.

Al secarse ambos cuerpos presentan un color blanco y se reducen según lo mostrado en la Tabla 18. Se observa que para una mayor temperatura de impresión la reducción es mayor. Ambos cuerpos conservan su forma original y los cuerpos son flexibles, esto se puede dar por la mayor cantidad de glicerina en ellos. Hay errores asociados a la medición.

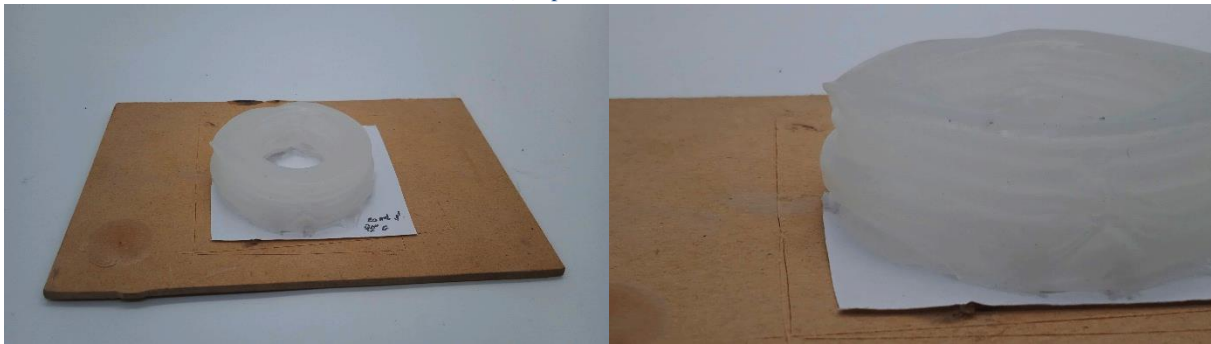
Tabla 18: Dimensiones receta ST-W060-0620

ST-W06-0620			
80°C	Inicial	Final	reducción %
D [mm]	60	48,1	80,2
h [mm]	15	8,4	56,0
e [mm]	21	15,2	72,4
90 °C			

D [mm]	55	40,7	74,0
h [mm]	17	9,6	56,5
e [mm]	14	8,1	57,9



a) impresión a 80 [°C]



b) impresión a 90 [°C]

Figura 57: Impresión con receta ST-W060-0620

Se puede observar que, a mayor cantidad de glicerina en los cuerpos, su reducción es menor, esto se puede dar porque la glicerina ocupa un mayor volumen en la fórmula una vez que el agua finalizó el proceso de sinéresis. Esto se puede observar en la Figura 58, donde las muestras 1,2 y 3 están impresas a 80 [°C] y 4,5 y 6 a 90 [°C].

Variación de Glicerina

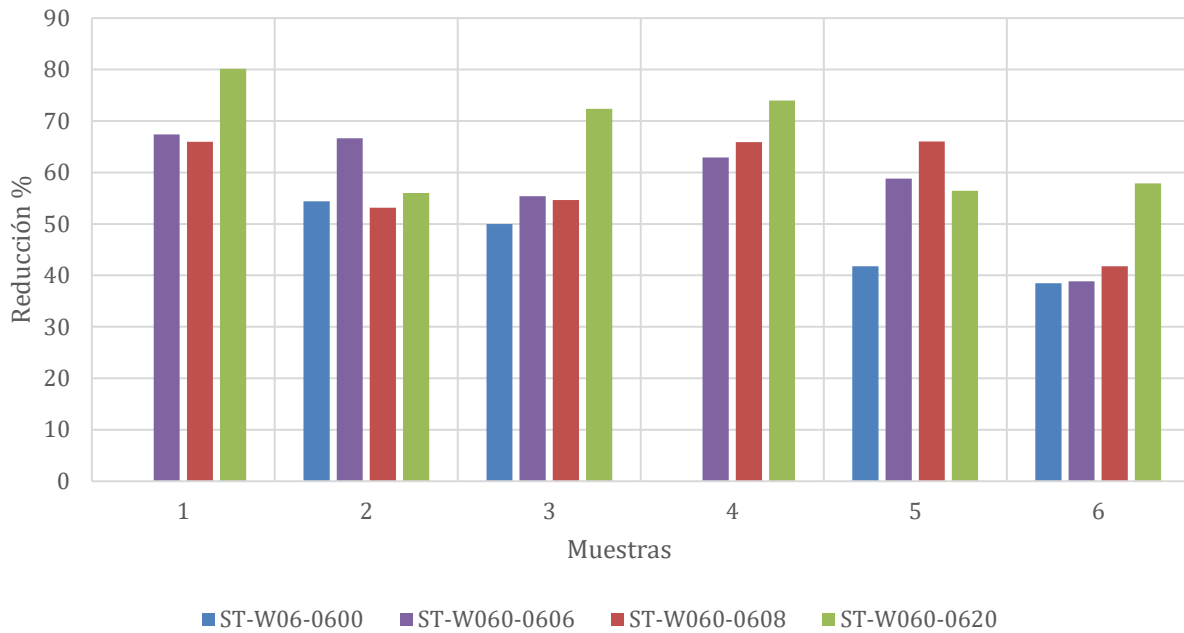


Figura 58: gráfico comparativo del porcentaje de reducción de cada receta.

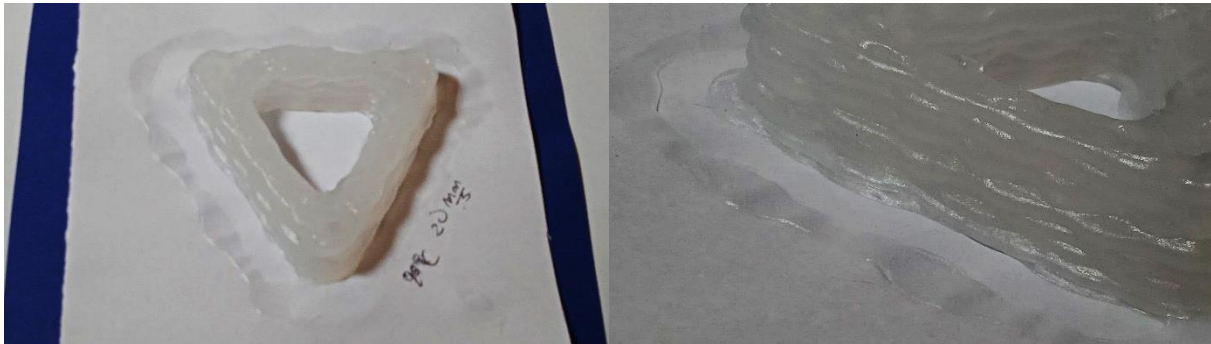
5.4. Variación de Velocidad de impresión

Al aplicar una velocidad de 20 [mm/s] a la impresión de bioplástico basado en almidón se observa que con una temperatura de impresión de 80 [°C] el cuerpo generado presenta capas de altura constante y los bordes de esta se unen con las de capas adyacentes, su textura es lisa y color blanco. Las irregularidades de sus capas se pueden deber a la viscosidad del material.

Para 90 [°C] de temperatura de impresión, se aprecia que las capas que componen al cuerpo impreso poseen altura constante y sus bordes están definidos, creando un cuerpo con mayor definición. Su color es blanco y las irregularidades se asocian al vapor producido dentro del extrusor. Estas impresiones se pueden observar en la Figura 59.



a) Temperatura de impresión de 80 [°C]

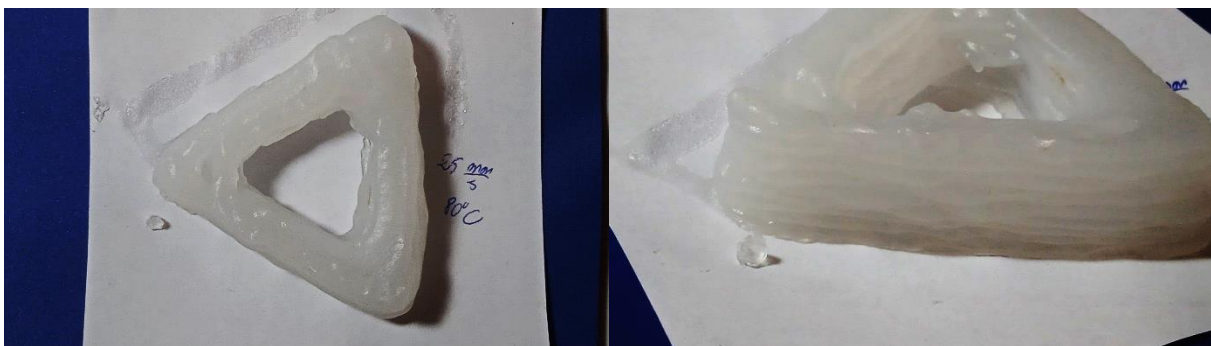


b) Temperatura de impresión de 90 [°C]

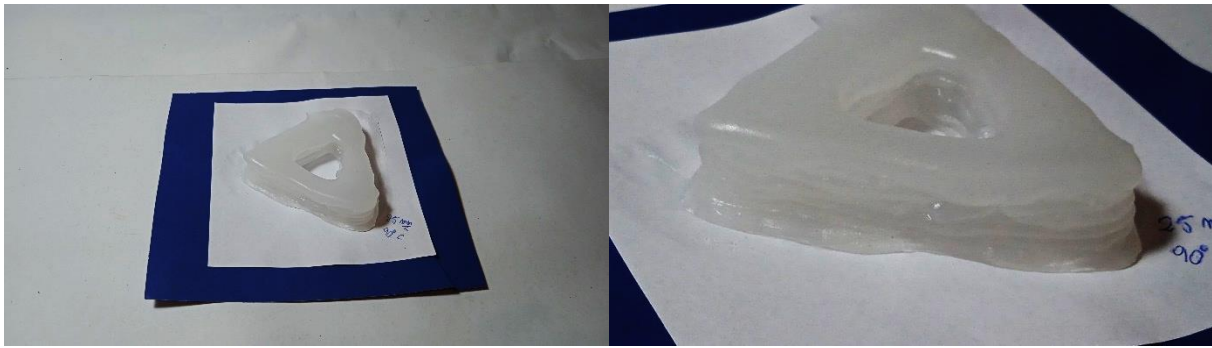
Figura 59: Prueba de velocidad de impresión a 20 [mm/s].

Se observa que a una velocidad de 25 [mm/s] de impresión a una temperatura de 80 [°C] las capas poseen una altura constante manteniendo la forma del cuerpo. Sus bordes se encuentran definidos y su textura es lisa. Presenta menos irregularidades que la prueba anterior y su color es blanco.

Con una temperatura de impresión de 90 [°C] las capas generadas presentan una mejor definición y su altura es constante. Las irregularidades producidas por el vapor disminuyen, esto se puede deber a que la temperatura del material disminuye ya que el flujo es mayor. Los cuerpos impresos se pueden apreciar en la Figura 60.



a) Temperatura de impresión de 80 [°C]

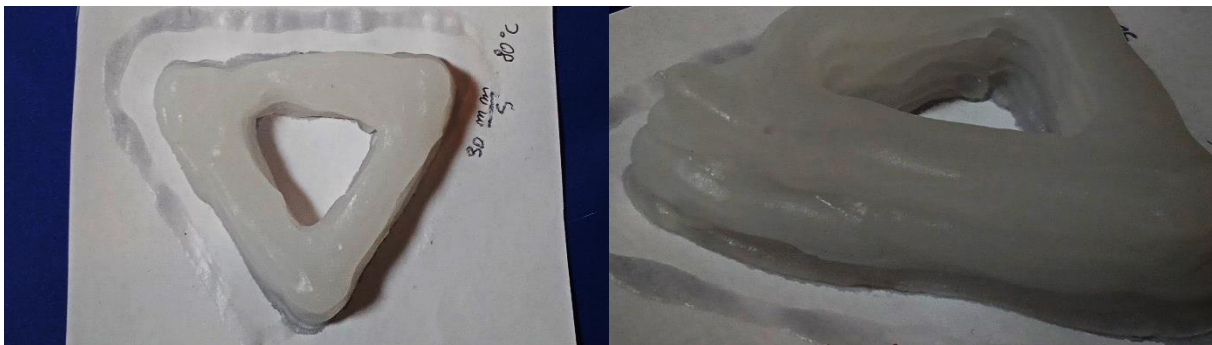


b) Temperatura de impresión de 90 [°C]

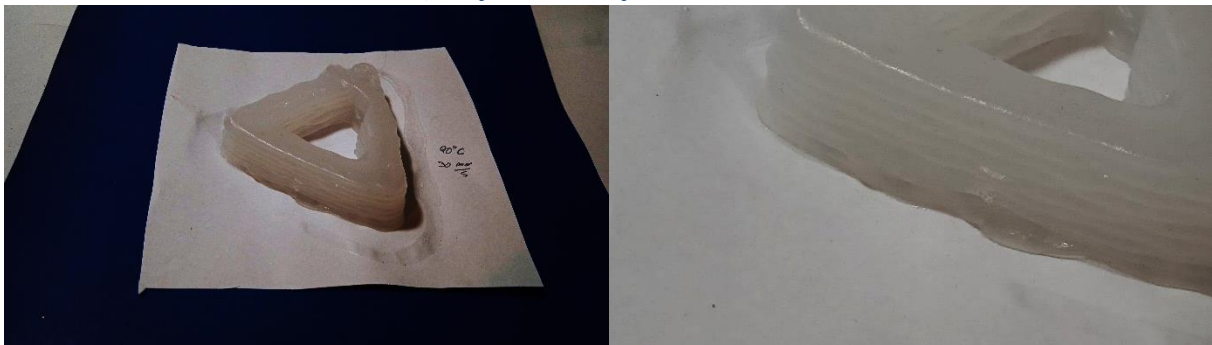
Figura 60: Prueba de velocidad de impresión a 25 [mm/s].

Al imprimir la Fórmula ST-W060-0608 a una velocidad de 30 [mm/s] se puede observar de la Figura 61 que a una temperatura de 80 [°C] las capas generadas van perdiendo su definición y los bordes de esta son irregulares. Las capas pueden mantener del cuerpo, pero disminuye su calidad en comparación a pruebas anteriores. El color del bioplástico es blanco y su textura es lisa.

Con una temperatura de 90 [°C] se ve que las capas generadas presentan buena definición y las irregularidades asociadas al vapor son casi nulas, también su altura de capas es constante. La mejor definición de capas se puede dar ya que el material disminuye su temperatura debido al mayor flujo y que la termo cupla que mide la temperatura de impresión, no se encuentra cercana al fluido midiendo la temperatura del cuerpo de aluminio. El cuerpo mantiene su geometría y el color del material es blanco.



a) Temperatura de impresión de 80 [°C]



b) Temperatura de impresión de 90 [°C]

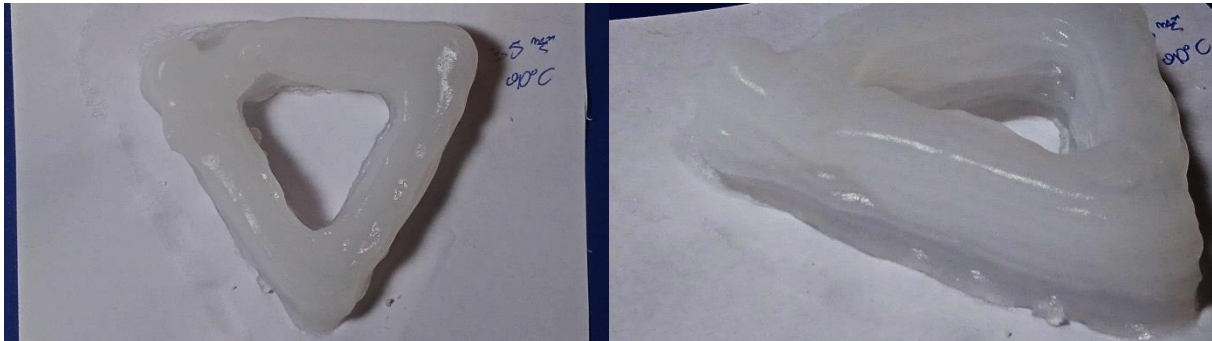
Figura 61: Prueba de velocidad de impresión a 30 [mm/s].

Al imprimir a una velocidad de 35 [mm/s], se observa de la Figura 62 que a una temperatura de 80 [°C], las capas generadas crean un cuerpo geométrico, pero pierden su definición. Sus bordes no se pueden distinguir ya que se han fusionado con los de las capas adyacentes. Esto se puede deber a que el material baja su viscosidad debido a la baja temperatura por el aumento de su flujo.

A una temperatura de impresión de 90 [°C] se genera un cuerpo con capas de altura constante, pero sus bordes no se encuentran bien definidos, donde se une en ciertos puntos con las capas siguientes. Un resultado similar para la impresión de 20 [mm/s] a 80 [°C].



a) Temperatura de impresión de 80 [°C]



b) Temperatura de impresión de 90 [°C]

Figura 62: Prueba de velocidad de impresión a 35 [mm/s]. Arriba 80 [°C]. Abajo 90 [°C]

5.5. Ángulos

Al realizar pruebas con un ángulo de 75° , se observa que la estructura colapsa después de 5 a 7 capas de la impresión. Este resultado se dio para cada intento, no logrando crear un cuerpo tridimensional. Las recetas utilizadas solo se pueden imprimir con un ángulo de pared a los 90° [°C]

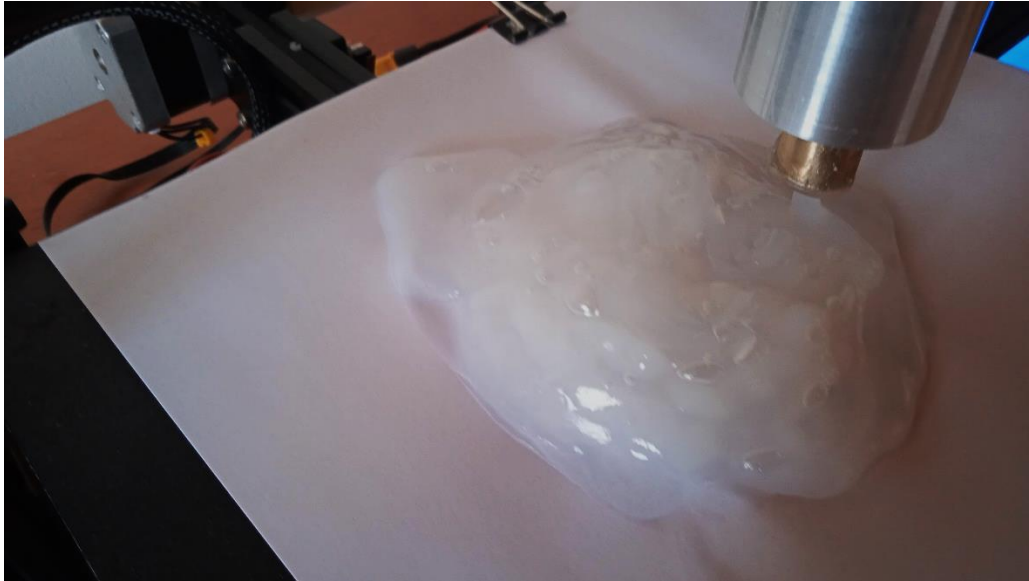


Figura 63: Impresión con almidón para ángulo de 75° .

6. Discusión y mejoras

Temperatura de Impresión

Agar-agar

De estos experimentos se puede analizar que a mayor temperatura la textura del bioplástico a base de agar-agar, se vuelve más lisa. Esto se debe ya que al almacenar el material inmediatamente después de alcanzar su punto de gelificación, este no se encuentra totalmente gelatinizado, hay granos de agar que aún no rompen su estructura por el efecto del calor y la temperatura lo que hace que el material tenga textura rugosa al ser impreso a menor temperatura. Al aumentar la temperatura las cadenas de agarosa y agarpectina se expanden completamente y al secarse crean estructuras semi cristalinas al secarse y producen una textura lisa.

También para esta fórmula se observó que a mayor temperatura el material se vuelve más fluido. Esto se debe al carácter reversible del agar-agar, que al estar en presencia de agua y temperatura cuando ya presenta grados de gelatinización, los enlaces internos entre las cadenas que componen a este gelatinizante se rompen y vuelven a un esta fluidizado. Esto presenta ventajas ya que reduce la fuerza necesaria para imprimir este material ya que los esfuerzos contantes disminuyen, pero las capas que generan no conservan su forma.

Esta receta debe ser controlada en su proceso de cocción continuamente para poder aplicarla a la impresión 3D. se observo que si se sobre pasa el punto de gelificación entre 3 a 5 [°C], el material aumenta su viscosidad o se gelatiniza dentro del contenedor.

Almidón

De igual manera, estos bioplásticos al ser almacenado inmediatamente después de alcanzar su temperatura de gelificación, las cadenas de amilos y amilopectina no se encuentra completamente abiertas lo que también genera una menor viscosidad de la pasta creada, influyendo directamente en la definición de las capas de los cuerpos. Esto va mejorando al aumentar la temperatura ya que su viscosidad aumenta por un mayor grado de gelatinización y a que mayor temperatura de impresión el material retrograda más rápido, secando la superficie externa de las capas, donde el material se reorganiza en estructuras semi cristalinas y da un mejor soporte a las capas. Por este mismo efecto es que en ciertos puntos las capas se despegan ya que estas zonas se retrogradaron antes de que la capa siguiente se posicionara sobre ellas.

Ambos bioplástico se observó que al secar sus bases se curvaban hacia arriba. Esto se da porque la capa superior presenta una mayor superficie, lo que permite ir retrogradarse más rápido lo que hace que se contraiga por la reorganización interna de sus cadenas mediante enlaces de puente de hidrógeno y genera la curvatura por los esfuerzos que se van generando. Esto se puede solucionar

imprimiendo sobre una base que permita el paso del agua que deja el biomaterial o una vez impresa las figuras se introduzcan a un horno eléctrico que garantice el secado uniforme de todas las partes del cuerpo impreso.

Temperatura de cama de impresión

Mantener la temperatura de la cama a una temperatura similar a la temperatura de impresión, ayuda a solucionar el problema de que las capas inferiores se curven hacia arriba cuando las figuras se secan. Esto sucede porque las capas se retrogradan en tiempos similares evitando que esfuerzos producidos por el reordenamiento estructural de los bioplásticos deformen la figura. Temperaturas de la cama de impresión mayores a la del flujo, retrogradan las primeras capas más rápido, esto genera que las capas no se unan completamente entre sí.

Variación de glicerina

Se observó que las fórmulas que presentaban una mayor cantidad de glicerina presentan una mayor flexibilidad, esto se debe a que la glicerina forma enlaces con las cadenas que componen al bioplástico. Estos enlaces son débiles comparados con los enlaces entre las mismas cadenas del material, lo que da la flexibilidad observada. Para posteriores estudios se podría realizar mediciones con equipos para este propósito, del esfuerzo de fluencia ruptura y flexibilidad de probetas impresas, esto para dar a conocer a futuros usuarios de la resistencia de cada fórmula para una mejor selección al uso que le desea dar.

En estos experimentos se observó que, a mayor cantidad de glicerina en las fórmulas, las figuras se reducirán en una menor proporción. Esto sucede ya que la glicerina no abandona la mezcla como el agua cuando los biomateriales se retrogradan, quedando en el interior y aportando a un mayor volumen. Se podrían mejorar las recetas y utilizar un material de relleno como aserrín, lo que permitiría disminuir la reducción de tamaño de los cuerpos.

también se observó que, a una mayor temperatura de impresión, los cuerpos se reducen más. Esto se debe a que una mayor temperatura las partículas de agua al interior de las fórmulas presentan mayor energía, evaporándose en una tasa mayor. Esto reduce el volumen ya que en el interior quedan menos moléculas de agua cuando se va secando el bioplástico.

Variación de velocidad de impresión

El principal aprendizaje en este experimento fue que para cada temperatura de impresión hay una velocidad de impresión óptima. Como se pudo observar para una temperatura de impresión de 90 [°C] se obtuvieron capas definidas y con una mejor calidad que en las otras pruebas y para una temperatura de 80 [°C] fue una velocidad de 20 [mm/s]. Esto se debe al aumentar la velocidad de impresión el flujo se incrementa, también lo hará el flujo que se imprime. A un mayor flujo se

obtiene una menor temperatura del flujo de salida. Para estudios posteriores se postula realizar una correlación matemática entre la temperatura de impresión y la velocidad de impresión, para que usuarios puedan predecir temperatura de impresión según la velocidad que se imprimirá.

Ángulos de impresión

De este experimento se pudo observar que no se podían imprimir cuerpos geométricos que tengan una inclinación en sus paredes. Esto se da a que el material que se va depositando en la impresora no se retrograda de manera inmediata, esto evita que las capas se unan entre si mientras se genera el proceso de impresión, el mismo peso de las capas produce el colapso de estas ya que no se pueden adherir a las capas inferiores.

En estudios futuros se podría imprimir con figuras tridimensionales distintas, como conos, esferas, entre otras y ver si la geometría influye en una impresión con ángulos. También se podrían realizar la impresión de estos bioplásticos con una altura de capa menor, para que el cambio de la geometría sea más lento, permitiendo que el centro de gravedad de cada pared varíe lentamente, así el material pueda retrogradar y tener un mejor sustento.

Equipo

El equipo diseñado necesita mejoras que solucionen los problemas producidos por la generación de vapor y que pueda imprimir el bioplástico a base de agar-agar aunque independiente de la forma de preparación.

El equipo actual se podría implementar un tensor para la correa del sistema reductor, permitiendo que se soporte una mayor fuerza antes de que deslice. También se pueden implementar otro tipo de poleas que resistan mayores fuerzas. También una solución ya desarrollada es mover el embolo con aire a presión mediante un sistema neumático mediante un compresor de aire, pero esto restringe que el equipo desarrollado en este trabajo se accesible para todos.

Se debe crear un extrusor capaz de expulsar el vapor generado al interior por el aumento de la temperatura, por un lugar distinto de la boquilla de impresión y que la presión que produce este gas no afecte el flujo al cual se imprime, con el fin de evitar las irregularidades que se observaron en los experimentos de temperatura de impresión.

7. Conclusiones

De este estudio se puede concluir los bioplásticos a base de almidón de papas y agar-agar pueden ser aplicados en tecnologías de manufactura aditiva mediante el método de deposición de material fundido. Esto fija un precedente para futuros estudios en la aplicación de bioplásticos en impresión 3D. Se pudieron imprimir figuras simples sin ángulo de inclinación en sus paredes, por lo que mejorar las fórmulas y procesos de impresión en el futuro será esencial para que estos materiales puedan reemplazar a plásticos de impresión 3D tradicionales y que los objetivos del Nodo de bio-fabricación impulsado por el FabLab permitan una alternativa viable en todo aspecto.

Uno de los hallazgos importante de este estudio es que los materiales pueden ser almacenados en contenedores herméticos y retrasar el proceso de retrogradación de estos materiales manteniéndolos en un estado fluidizado, que simplifica su aplicación en impresión 3D ya que las fórmulas se pueden preparar previamente.

Con el bioplástico a base de almidón se pudieron realizar todas las pruebas planteadas en impresión 3D, mostrando que la temperatura de impresión, velocidad, temperatura de cama de impresión y variación de glicerina afectan a la textura, color, definición de capa y flexibilidad del material. También estas fórmulas no pueden ser impresas con ángulos en sus paredes debido a que la estructura creada colapsa.

Las fórmulas a base de agar-agar solo pudieron ser aplicadas en la prueba de temperatura de impresión, donde pudieron crear capas por el método FDM y donde se concluye que la temperatura de impresión afecta en la calidad y definición de estas. Estas fórmulas se pueden seguir estudiando y se debe preparar controlando adecuadamente su temperatura de cocción para evitar un aumento de su viscosidad o que gelatinice completamente dentro del contenedor.

Una de las dificultades en las pruebas de impresión fue la generación de vapor que se producía al imprimir las fórmulas con temperaturas sobre los 90 [°C] y no permitía controlar de manera adecuada el flujo de los biomateriales, produciendo irregularidades en sus capas. Este problema se puede solucionar al iterar el diseño del extrusor y crear uno que permita separar el vapor generado del bioplástico y que sea expulsado por otro lugar distinto a la boquilla de impresión.

Se creó un repertorio open source en la página web del FabLab denominado “*Bioprinter- Aplicación de bioplásticos a base de Almidón y Agaragar a tecnologías FDM*” donde se documentó los procesos realizados durante este trabajo de título y los archivos necesarios para realizar el equipo diseñado. Esto ayudará a que personas interesadas en esta aplicación de los biomateriales puedan desarrollar la mejoras y estudios futuros planteados.

8. Bibliografía

- [1.] Heinrich Böll Stiftung. 2019. Plastic Atlas: Facts and figures about the world of synthetic polymers. Henrich Böll Foundation
- [2.] Fablab U. de Chile. 2021. Nodo Bio-fabricación digital. Santiago, Chile. consultado el 26 de marzo del 2022. <https://gitlab.com/fablab-u-de-chile/NBD>
- [3.] López, Alfred. 8 de marzo del 2017. ¿Sabías que el plástico se inventó como sustituto al marfil? . <https://blogs.20minutos.es/yaestaellistoquetodosabe/tag/el-plastico-se-invento-como-sustituto-al-marfil/>
- [4.] European Bioplastics. (20 de abril del 2022) What are bioplastics?. <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>
- [5.] Ad vanWijk. Iris van Wijk. 2015. 3D printing with Biomaterials: Towards a Sustainable and circular economy.-: IOS PRESS.
- [6.] Fen Xu. 2021 .Physicochemical and Structural Characterization of Popato Starch with Different Degrees of Gelatinization. Foods ,vol. 10, 1104.
- [7.] Berríos F, Muñoz M, Rubio M. 2020. Estudio de Biomateriales. Valparaíso, Chile. Consultado 8 de enero del 2022. https://wiki.ead.pucv.cl/Estudio_de_Biomateriales
- [8.] Dianursanti, Gozan, M., & Noviasari, C. (2018). The effect of glycerol addition as plasticizer in *Spirulina platensis* based bioplastic. E3S Web of Conferences, 67, 03048. doi:10.1051/e3sconf/20186703048
- [9.] Mostafavi, F. S., & Zaeim, D. (2020). *Agar-based edible films for food packaging applications*.
- [10.] Desconocido. 19 de agosto del 2010. Cuarta parte de la producción nacional de agar-agar se verá mermada por incendio de Proagar. *Sonapesca*. [https://www.sonapesca.cl/incendio-proagar/#:~:text=En%20Chile%20existen%20tres%20f%C3%A1bricas,\(US%24%202%20millones\)](https://www.sonapesca.cl/incendio-proagar/#:~:text=En%20Chile%20existen%20tres%20f%C3%A1bricas,(US%24%202%20millones))
- [11.] Ruban W. (2009). Biobased Packaging-Application in Meat Industry. *Veterinary World*, Vol 2, 79-82.
- [12.] Holguín J. (2019). Obtención de un plástico a partir de almidón de papa. Facultad de ingenierías Universidad de américa. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7388/1/6132181-2019-1-IQ.pdf>
- [13.] Desconocido. Octubre del 2016. Mercado de la papa en Chile. *El Journal del Packaging*. <http://cenem.cl/newsletter/octubre2016/detalle-30.php>
- [14.] Alicia M. 25 de Marzo del 2020. Las características de Cura, el laminador más extendido en el mercado de la impresión 3D. *3DNatives*. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/cura-laminador-para-impresion-3d-250320202/#!>
- [15.] Chao-Fan Guo, Min Zhang, Bhesh Bhandari. (2019). A COMPARATIVE STUDY BETWEEN SYRINGE-BASED AND SCREW-BASED 3D FOOD

PRINTERS BY COMPUTACIONAL SIMULATION. Computers and Electronics in Agriculture, 162, 397-404.

- [16.] Seongik Hong, Cesar Sanchez, Hanuel Du, Namsoo Kim. (2015). FABRICATION OF 3D PRINTED METAL STRUCTURES BY USE OF HIGH-VISCOSITY Cu PASTE AND A SCREW EXTRUDER. Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 44, -.
- [17.] J. González, P. Partal, M garcía-Morales, C. Gallegos. (2010). DEVELOPMENT OF HIGHLE-TRANSPARENT PROTEIN/STARCH-BASED BIOPLASTICS. Bioresource Technology, 101, 2007-2013.
- [18.] Juan J. (sin fecha). Partes importantes de una impresora 3D componentes clave, como elegirlos y mejorar tu impresora 3D. 1 de agosto del 2021, de HTA3D Sitio web: <https://www.hta3d.com/es/blog/partes-importantes-de-una-impresora-3d-componentes-clave-como-elegirlos-y-mejorar-tu-impresora-3D>

Anexos.

Anexo A: Memoria de cálculo

A.1. Calor específico de la mezcla

El calor específico para una mezcla se estima mediante el promedio ponderado del calor específico de cada componente presente en ella. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera.

$$c_{pm} = X_1 * c_{p1} + X_2 * c_{p2} + \dots + X_n * c_{pn} \quad (1)$$

Donde:

c_{pm} : calor específico de la mezcla [$kJ/kg * ^\circ K$]

c_{pi} : calor específico del componente i [$kJ/kg * ^\circ K$]

X_i : la fracción de masa del componente i

A.2. Selección de motor

Para seleccionar el motor se debió calcular lo siguiente

Cálculo de torque en tornillos de potencia

Para esto se ocupó la ecuación

$$T = \frac{F * d_m}{2000} * \frac{p + \pi * \mu * d_m * \sec(\theta)}{\pi * d_m - \mu * p * \sec(\theta)} \quad (2)$$

Donde:

T : Torque requerido [$N * m$]

F : Fuerza total axial que actual sobre el tornillo [N]

d_m : diametro medio del tornillo [mm]

p : paso del tornillo [mm]

μ : coeficiente de roce entre tornillo y tuerca

θ : Angulo de inclinación respecto al eje longitudinal del tornillo

Calculo torque motor

El cálculo del torque del motor se calcula según la siguiente ecuación

$$T_m = \frac{1}{R} * T \quad (3)$$

Donde:

T_m : Torque necesario del motor [$N * m$]

T : Torque del tornillo de potencia [$N * m$]

R : Relación de reducción

Cálculo de revoluciones

Las revoluciones del motor se calculan como se muestra a continuación

$$RPM = \frac{60 * A_1 * V_1}{A_2 * m} * R \quad (4)$$

Donde:

RPM : revoluciones por minuto del motor [$\frac{rev}{min}$]

V_1 : Velocidad de diseño de impresión [$\frac{mm}{s}$]

A_1 : Sección transversal de la boquilla [mm^2]

A_2 : Sección transversal del contenedor [mm^2]

m : milímetros por revolución del tornillo [$\frac{mm}{rev}$]

R : Factor de reducción

A.3. Cálculo de resistencia térmica

Se utiliza la siguiente ecuación para determinar el calor requerido para aumentar la temperatura del bioplástico.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_{pm} * (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

Donde:

\dot{Q} : Flujo de calor necesario [kW]

\dot{m} : Flujo másico [$\frac{kg}{s}$]

c_{pm} : calor específico del bioplástico [$\frac{kJ}{kg * ^\circ K}$]

T_{out} : Temperatura a la salida del extrusor [$^\circ K$]

T_{in} : Temperatura a la entrada del extrusor [$^\circ K$]

Anexo B: Tablas variación de velocidad

B.1. 20 [mm/s]

Tabla 19: Dimensiones de impresión a 20 [mm/s]

20 [mm/s]			
80°C	Inicial	Final	reducción %
L [mm]	54,7	38,4	70,2
h [mm]	18	10,9	60,6
e [mm]	13,6	8,8	64,7
90 °C			
L [mm]	54,7	38,9	71,1
h [mm]	18,2	9,2	50,5
e [mm]	12,2	6,2	50,8

B.2. 25 [mm/s]

Tabla 20: Dimensiones de impresión a 25 [mm/s]

25 [mm/s]			
80°C	Inicial	Final	reducción %
L [mm]	51,5	38,8	75,3
h [mm]	17,9	10,5	58,7
e [mm]	16,1	8,6	53,4
90 °C			
L [mm]	52,6	38,5	73,2
h [mm]	17,1	10,8	63,2
e [mm]	13,4	8,6	64,2

B.3. 30 [mm/s]

Tabla 21: Dimensiones de impresión para 30 [mm/s]

30 [mm/s]			
80°C	Inicial	Final	reducción %
L [mm]	55,1	38,7	70,2
h [mm]	17,3	11,9	68,8
e [mm]	13	9,2	70,8
90 °C			
L [mm]	54,5	38,8	71,2
h [mm]	18,7	11,3	60,4
e [mm]	12,3	7	56,9

B.4. 35 [mm/s]

Tabla 22: Dimensiones para impresión a 35 [mm/s]

35 [mm/s]			
80°C	Inicial	Final	reducción %
L [mm]	52,3	37,1	70,9
h [mm]	16,9	8,7	51,5
e [mm]	17,1	7,9	46,2
90 °C			
L [mm]	54,8	37	67,5
h [mm]	17,3	10,1	58,4
e [mm]	12,6	7,7	61,1

Anexo C: Figuras

C.1. Generación de capas



A. 1: Experimento de generación de capas con Agar-Agar 1.



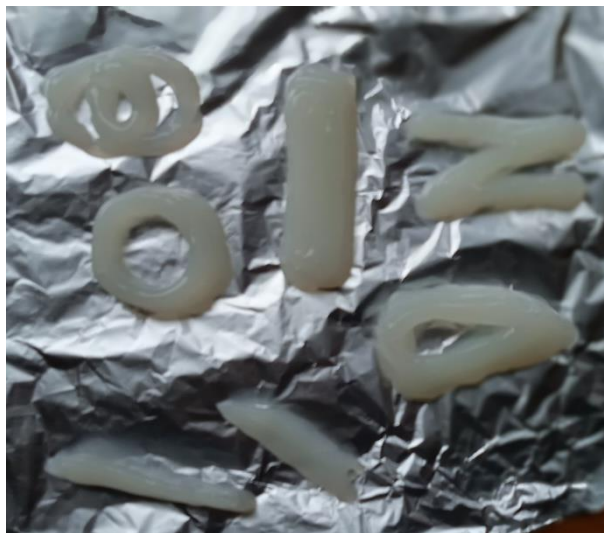
A. 2: Experimento de generación de capas 2.



A. 3: Experimento de generación de capas con almidón. figura triangular.



A. 4: Experimento generación de capas con almidón. cuerpo triangular vista lateral.



A. 5: Experimento de generación de capas con almidón. distintas figuras.

C.2. Almacenamiento Hermético.



A. 6: Bioplástico a base de almidón almacenado en jeringas para prueba.



A. 7: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 1



A. 8: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 2



A. 9: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 3



A. 10: Bioplástico después de 1 día dentro de jeringa. Línea 4



A. 11: líneas secas de bioplástico almacenado durante 2 días en jeringas.



A. 12: Líneas secas realizadas con bioplástico con 5 días almacenado en jeringa.



A. 13: Línea con bioplástico a base de Agar Agar. Almacenada durante 3 días.

C.3 Decantación



A. 14: Prueba de decantación con receta AA-W200-1210 a 45 [°C]



A. 15: Prueba de decantación con receta AA-W200-1210 a 65 [°C]



A. 16: Prueba de decantación con receta ST-W060-0606 a T° ambiente.

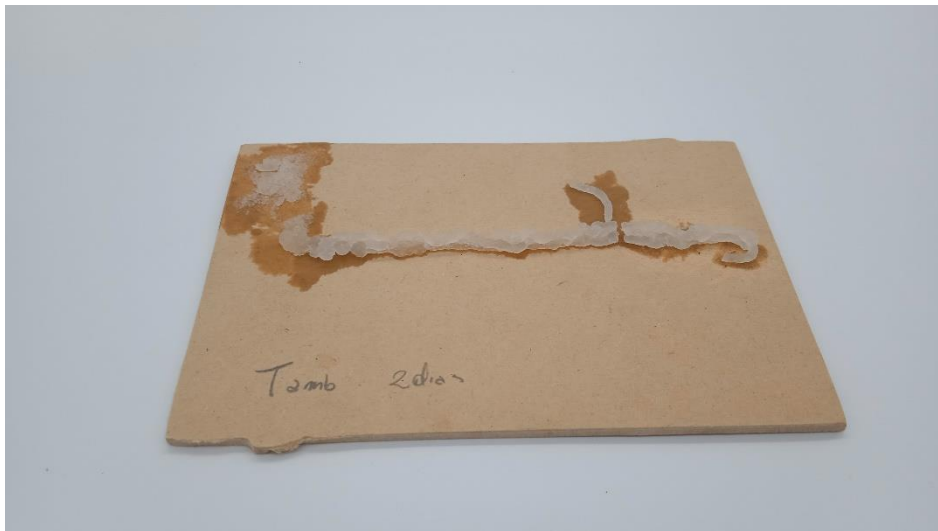


A. 17:A. 16: Prueba de decantación con receta ST-W060-0606 a 45 [°C]

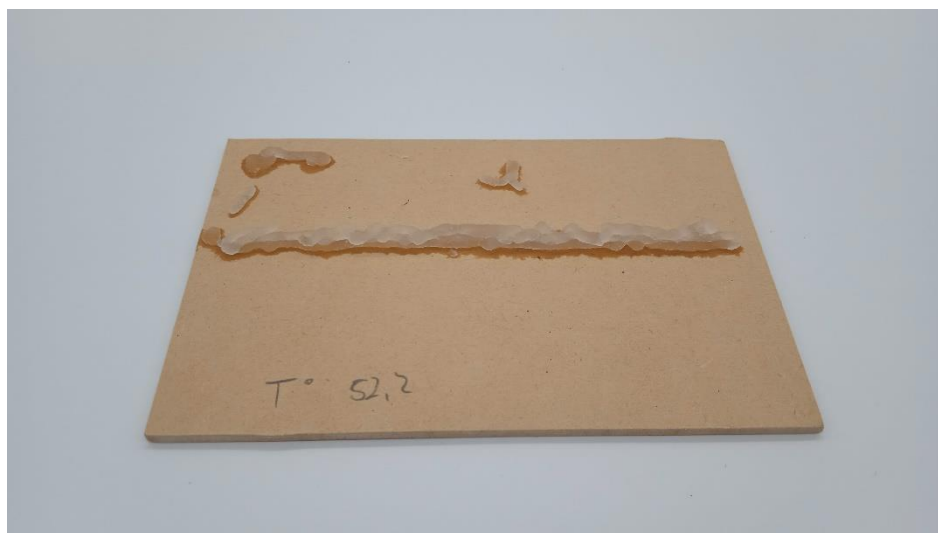


A. 18:A. 16: Prueba de decantación con receta ST-W060-0606 a 60 [°C]

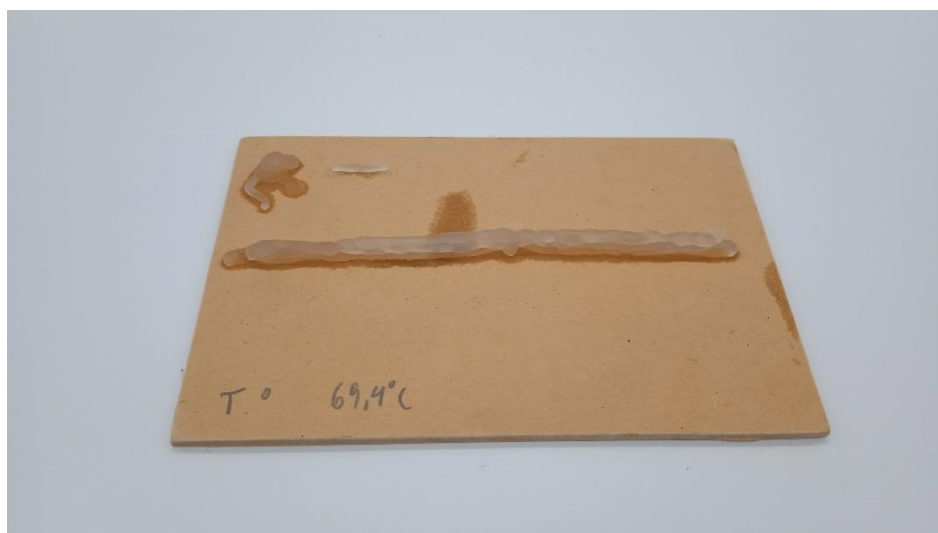
C.4. Calentado posterior



A. 19: prueba de calentado posterior agar agar. T° ambiente.



A. 20: prueba de calentado posterior agar agar. 52 [°C]



A. 21: prueba de calentado posterior agar agar. 70 [°C]



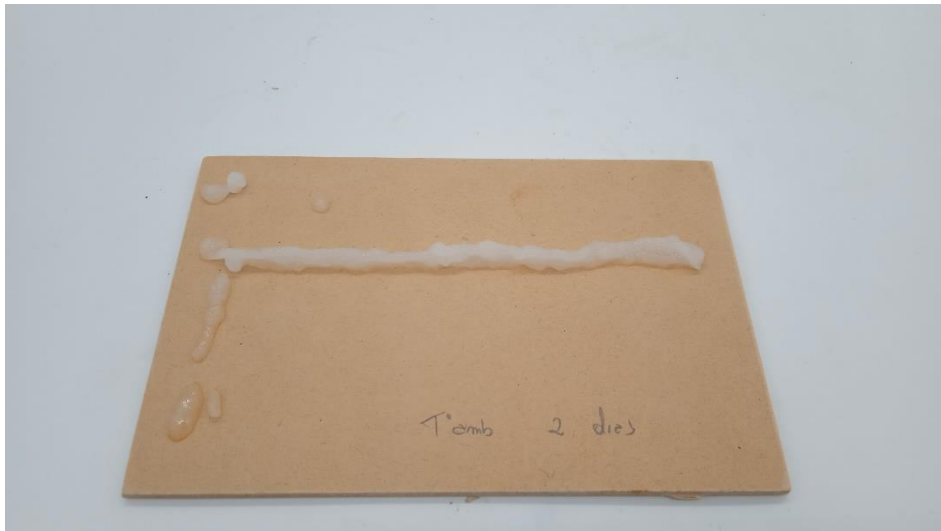
A. 22: prueba de calentado posterior agar-agar. 90 [°C]



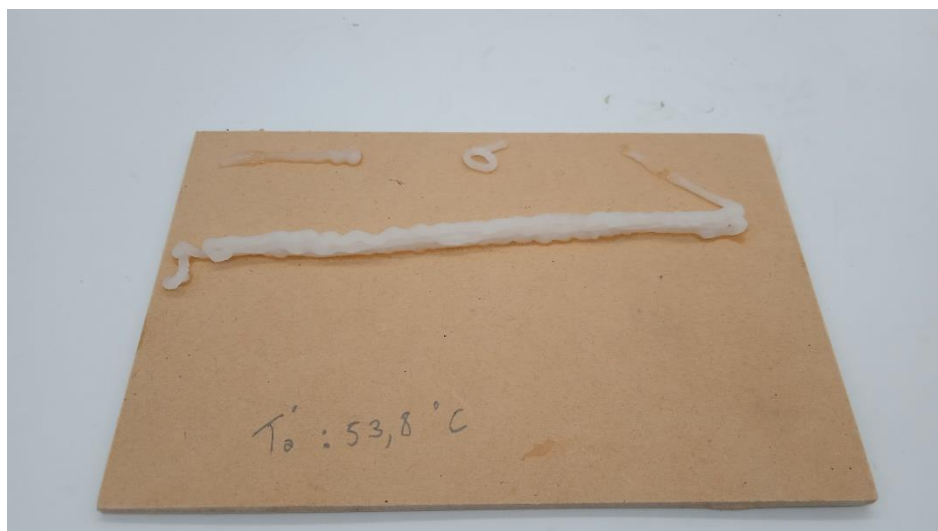
A. 23: prueba de calentado posterior agar agar . 100 [°C]



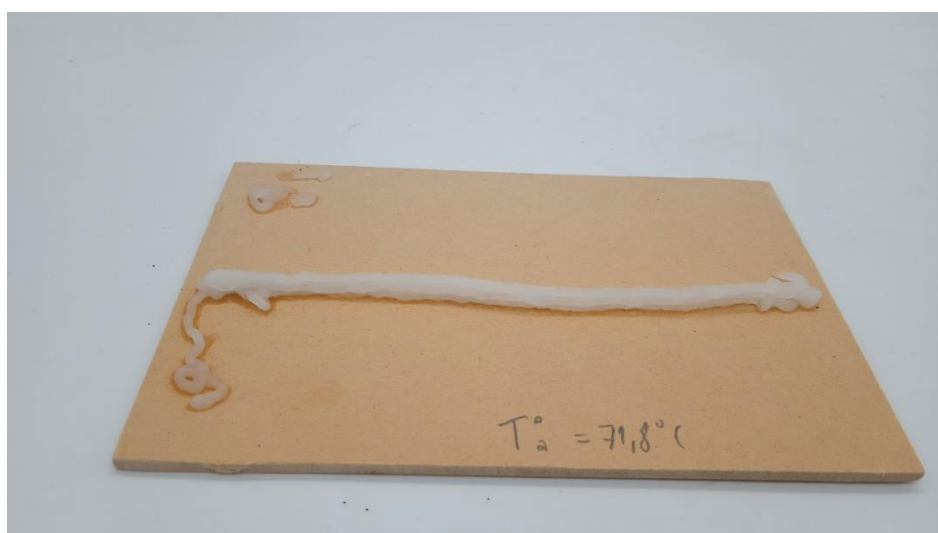
A. 24: prueba de calentado posterior agar-agar . 100 [°C] separación de capas por que el proceso de retrogradación superficial es demasiado rápido



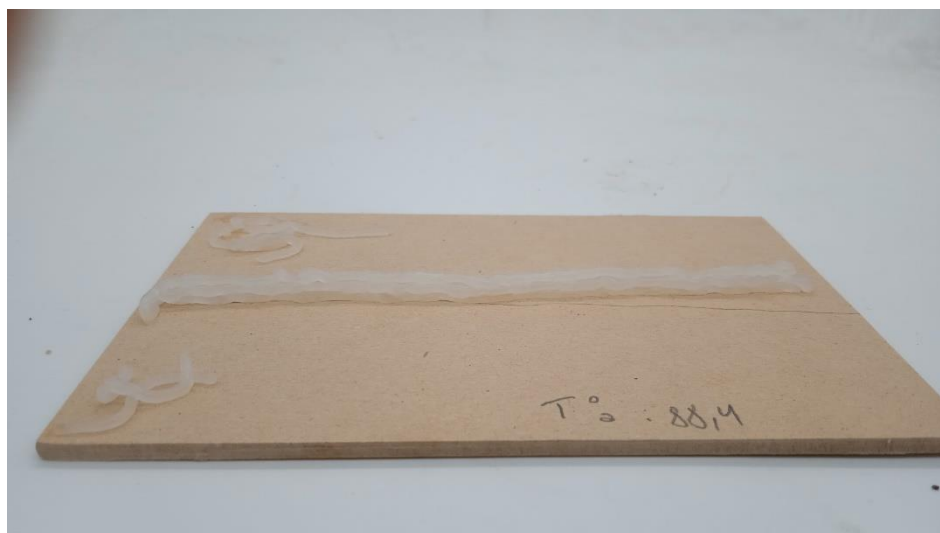
A. 25: prueba de calentado posterior almidón. T° ambiente



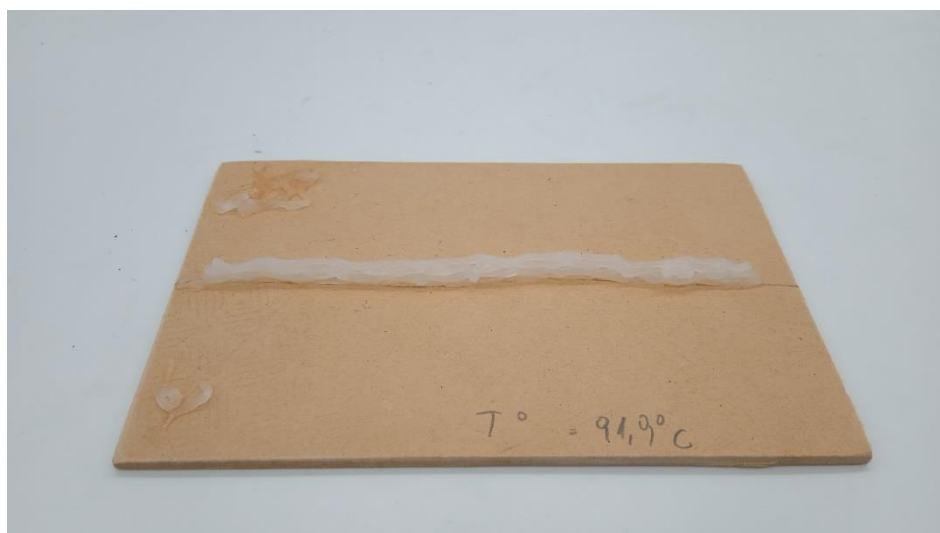
A. 26: prueba de calentado posterior almidón. 50 [°C]



A. 27: prueba de calentado posterior almidón. 70 [°C]



A. 28: prueba de calentado posterior almidón. 90 [°C]

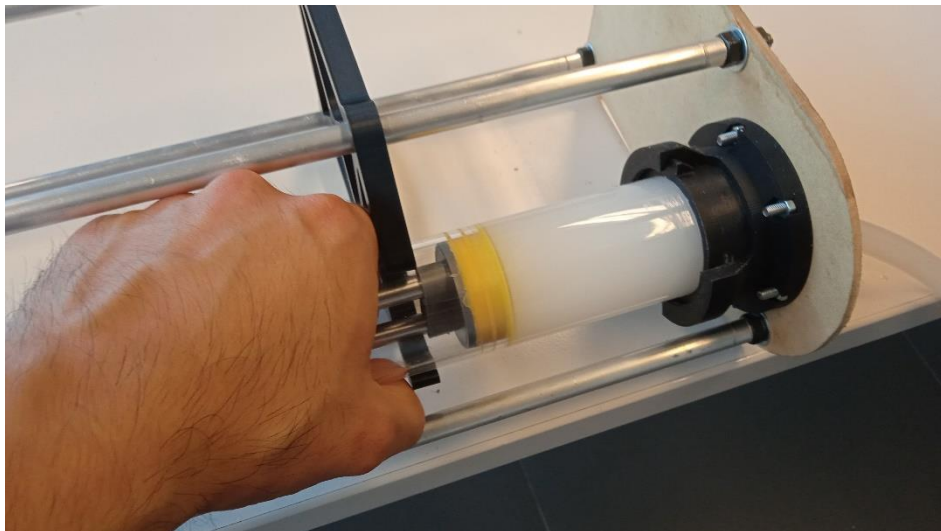


A. 29: prueba de calentado posterior almidón. 100 [°C]

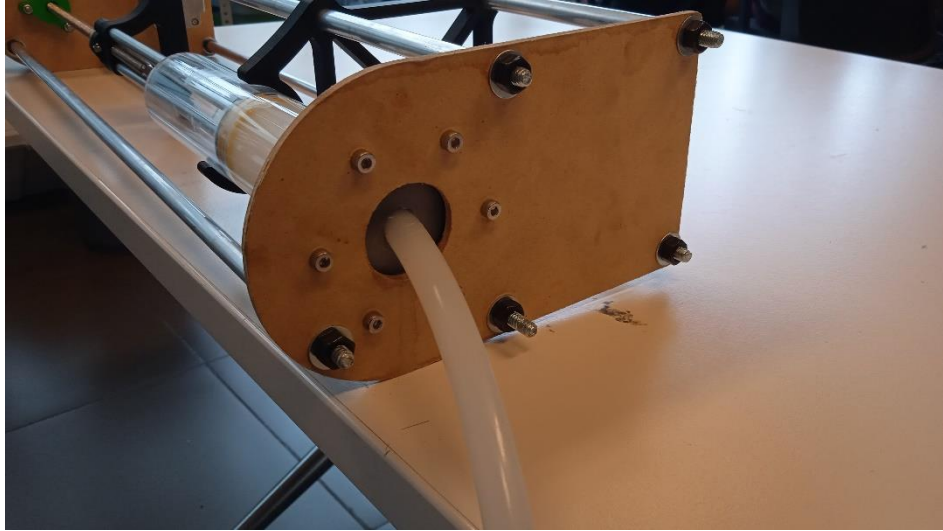
C.5. Equipo.



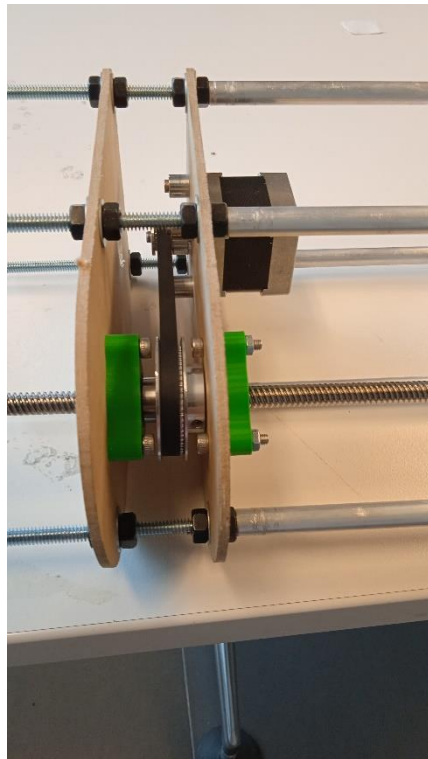
A. 30: Primer modelo de sistema de extrusión



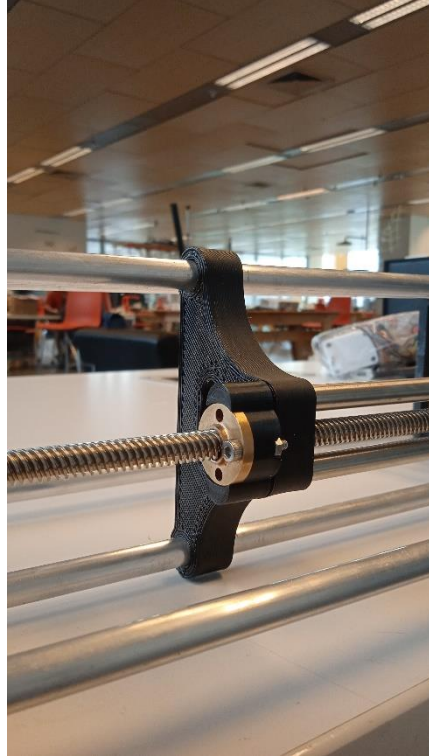
A. 31: Sistema de fijación del contenedor al equipo propulsor.



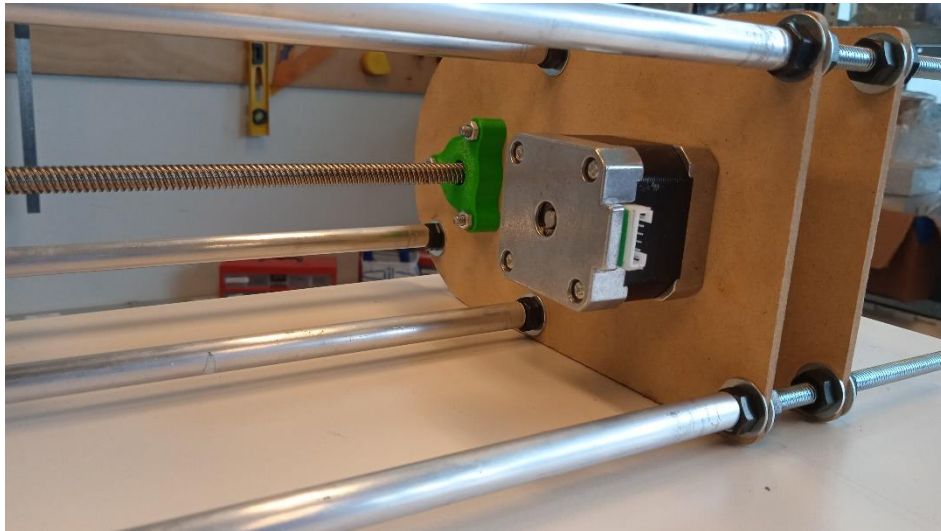
A. 32: Parte inferior del primer modelo.



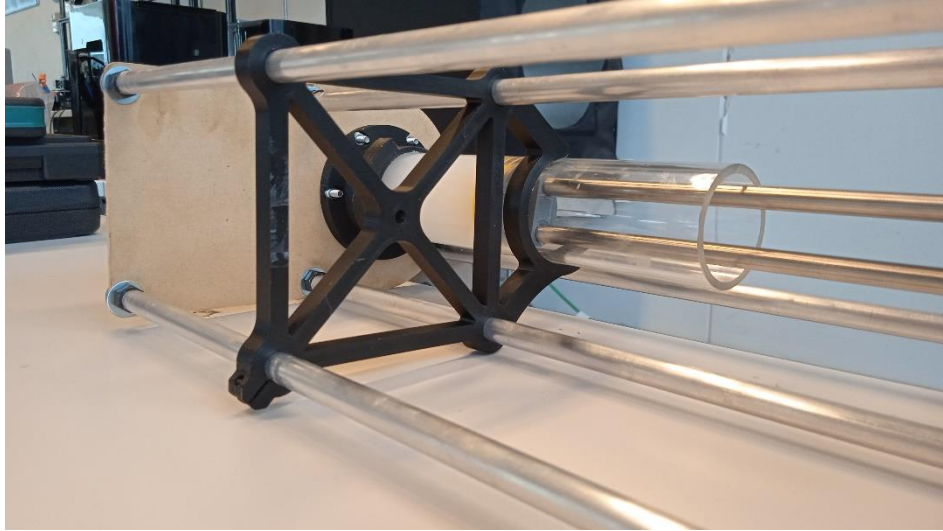
A. 33: Sistema de reducción de poleas del primer modelo.



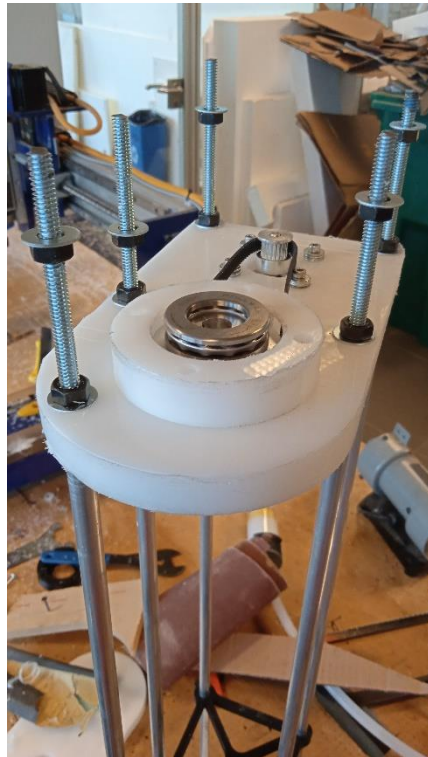
A. 34: Sistema propulsor del embolo mediante husillo móvil.



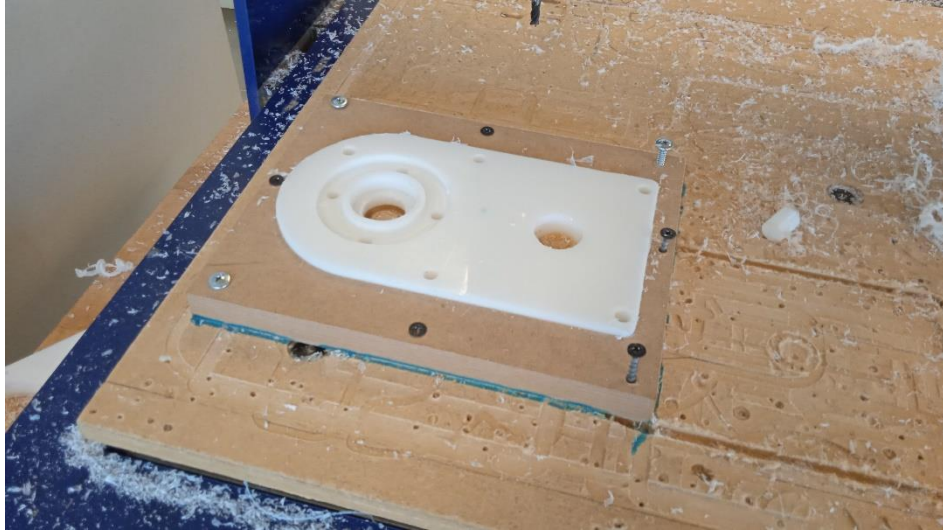
A. 35: Sistema reductor primer modelo. vista del motor.



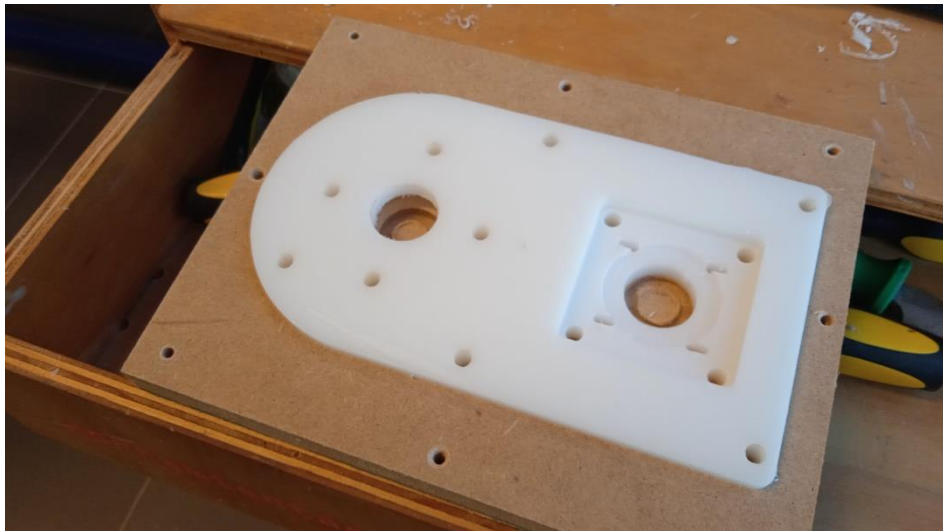
A. 36: Pieza de sujeción y centrado del contenedor de bioplástico.



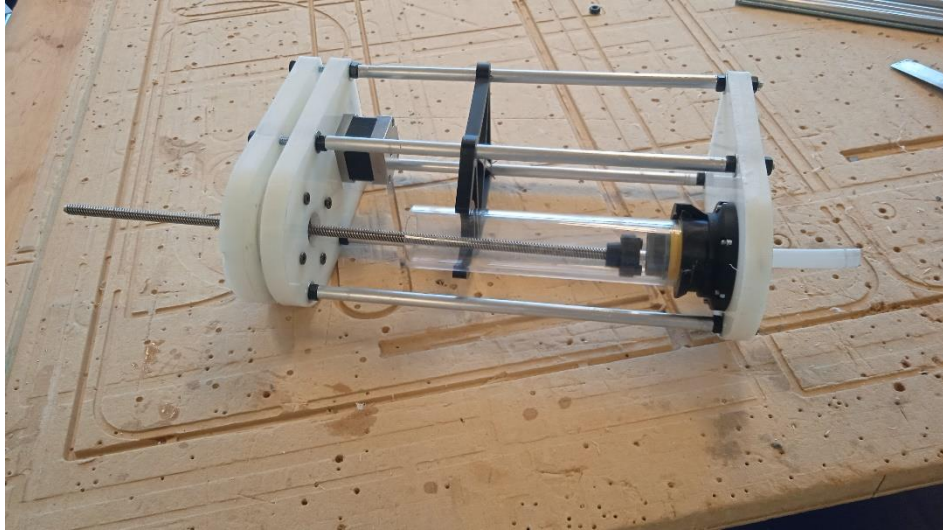
A. 37: Sistema reductor final, donde la tuerca se incorpora en la polea dentada.



A. 38: Mecanización placa superior sistema reductor.



A. 39: Mecanizado placa inferior sistema reductor.



A. 40: Sistema propulsor final junto a contenedor de bioplásticos.

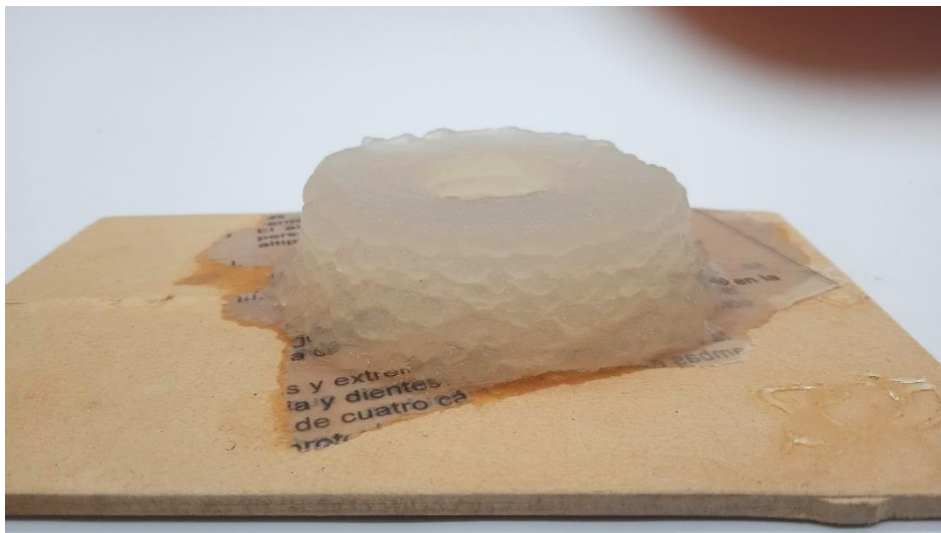


A. 41: Extrusor previo a la mecanización de roscas



A. 42: Extrusor, ensamble final.

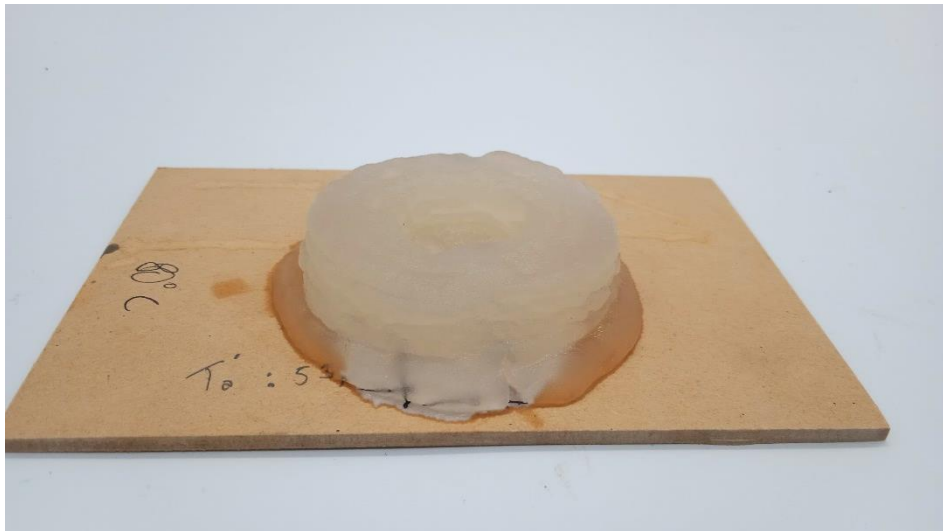
C.6. Pruebas de impresión



A. 43: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 60 [°C]



A. 44: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 60 [°C] acercamiento a capas.



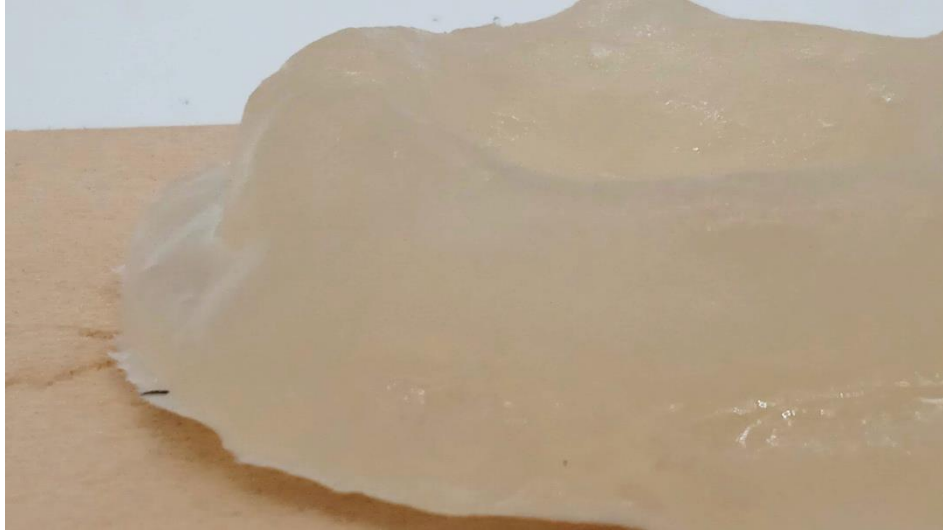
A. 45: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 80 [°C]



A. 46: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 80 [°C] acercamiento de capas.



A. 47: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 90 [°C]



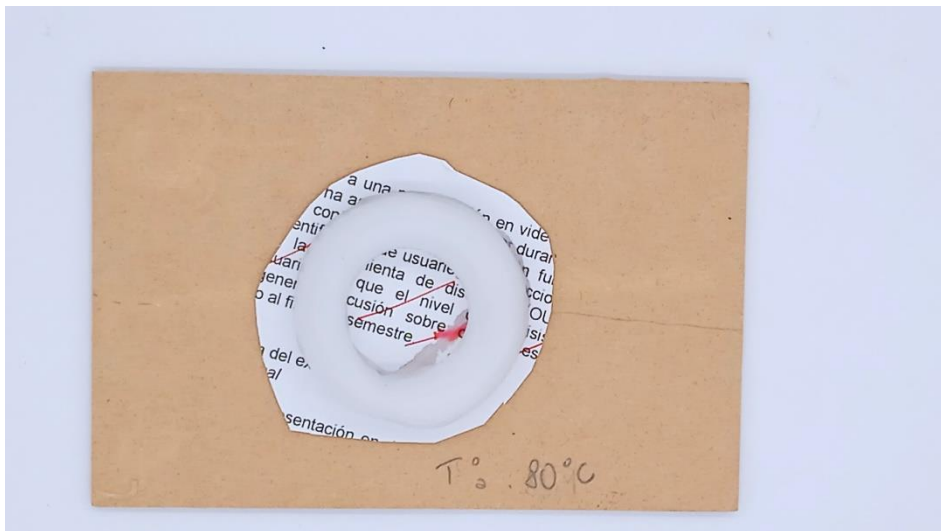
A. 48: Prueba de temperatura en impresión 3D. Agar-agar 90 [°C] acercamiento de capas.



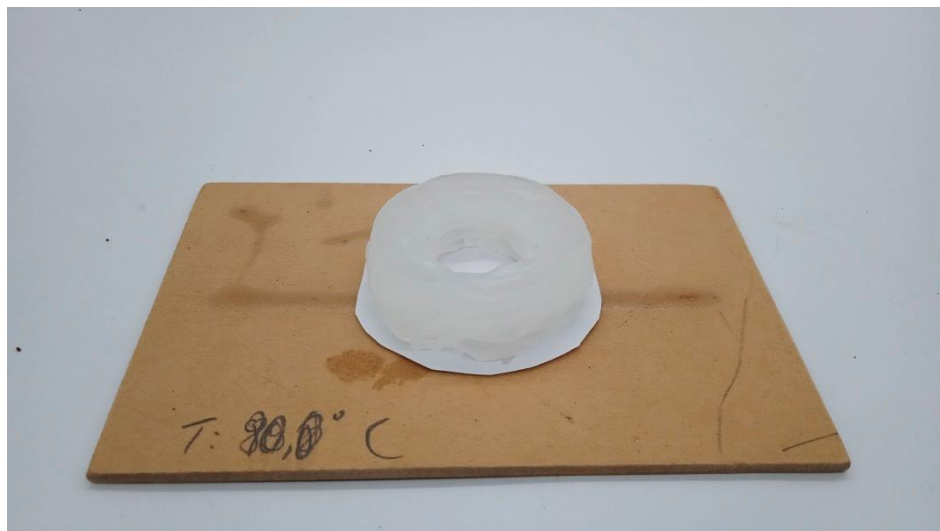
A. 49: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 80 [°C]



A. 50: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 80 [°C] acercamiento de capas.



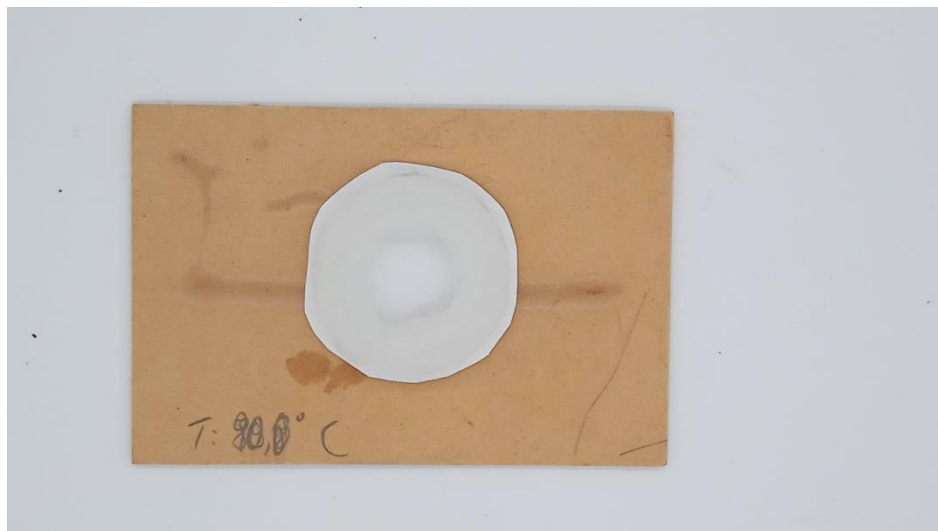
A. 51: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 80 [°C] vista superior.



A. 52: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 90 [°C]



A. 53: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 90 [°C acercamiento de capas.]



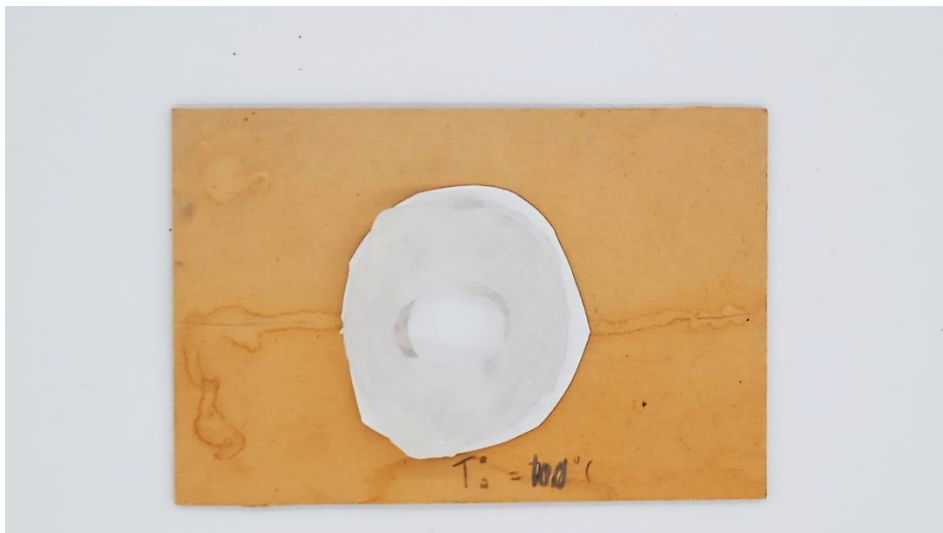
A. 54: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 90 [°C] vista superior



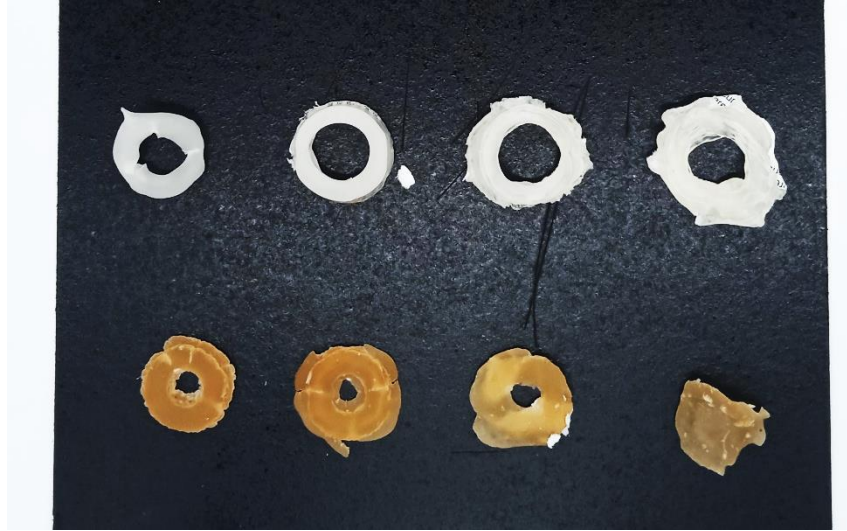
A. 55: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 100 [°C]



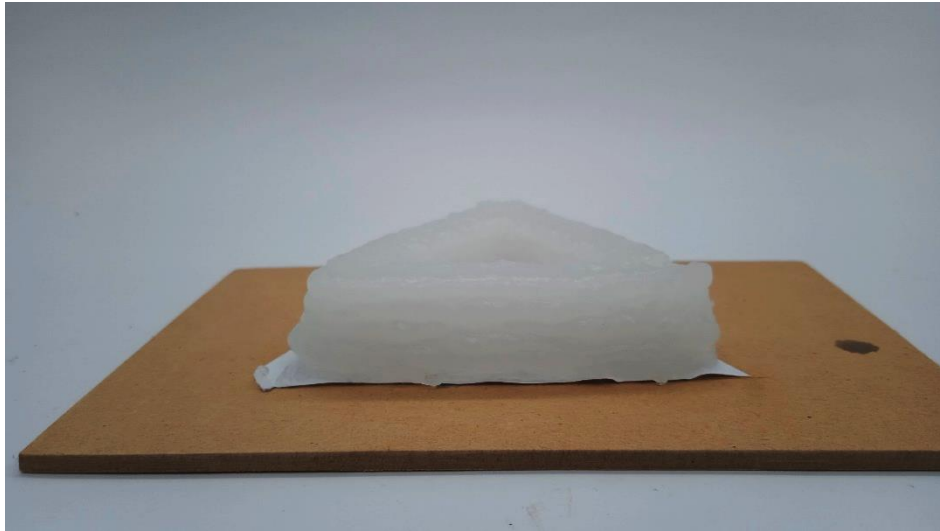
A. 56: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 100 [°C] acercamiento de capas.



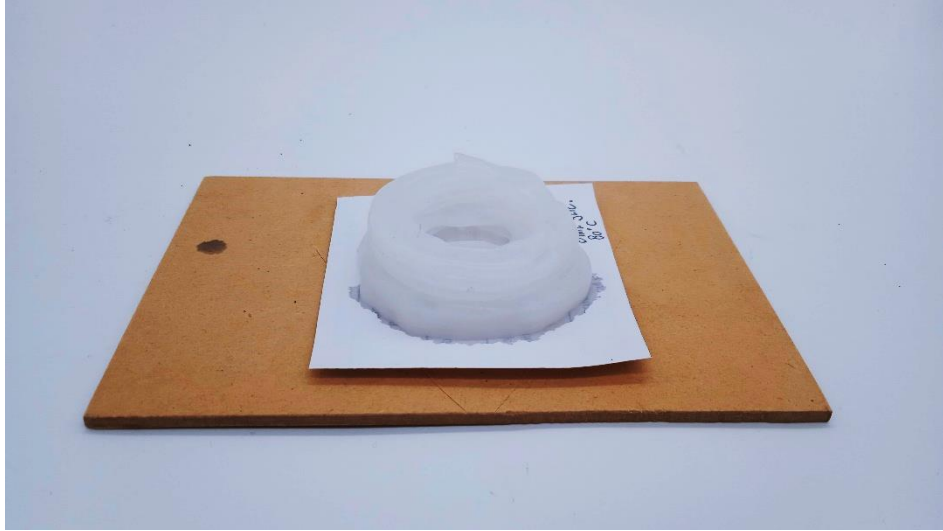
A. 57: Prueba de temperatura en impresión 3D. Almidón 100 [°C] Vista superior



A. 58: Variación de temperatura en impresión 3D. en la parte superior, bioplástico a base de almidón. Abajo a base de Agar-Agar. de izquierda a derecha temperatura de impresión de 60 a 100 [°C]



A. 59: Figura impresa con receta ST-W060-0606 a 80°C, prueba de geometría.



A. 60: Receta ST-W060-0600, 80 [°C]



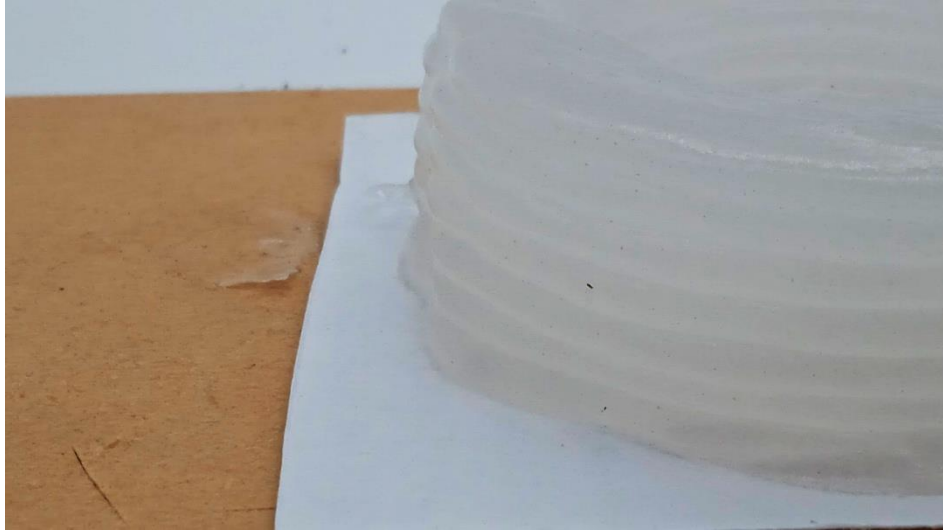
A. 61: Receta ST-W060-0600, 80 [°C] acercamiento de capas.



A. 62: Receta ST-W060-0600, 80 [°C] vista superior.



A. 63: Receta ST-W060-0600, 90 [°C]



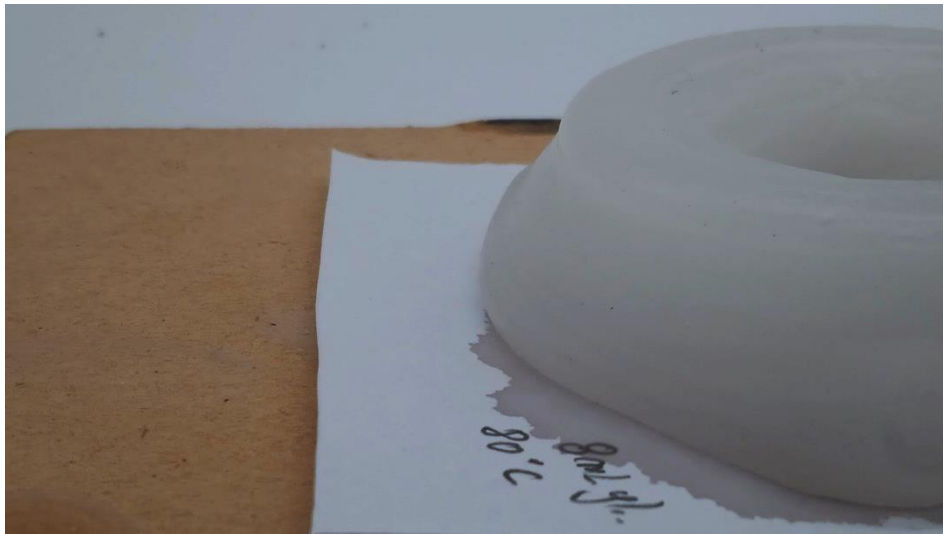
A. 64: Receta ST-W060-0600, 90 [°C] acercamiento de capas



A. 65: Receta ST-W060-0600, 90 [°C] vista superior.



A. 66: Receta ST-W060-0608, 80 [°C]



A. 67: Receta ST-W060-0608, 80 [°C] acercamiento de capas.



A. 68: Receta ST-W060-0608, 80 [°C] vista superior



A. 69: Receta ST-W060-0608, 90 [°C]



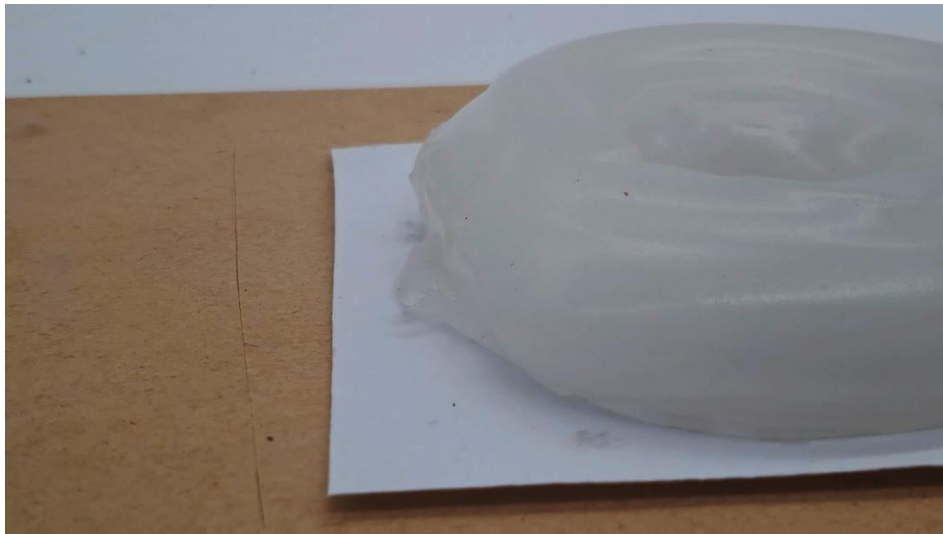
A. 70: Receta ST-W060-0608, 90 [°C] acercamiento de capas.



A. 71: Receta ST-W060-0608, 90 [°C] vista superior



A. 72: Receta ST-W060-0620, 80 [°C]



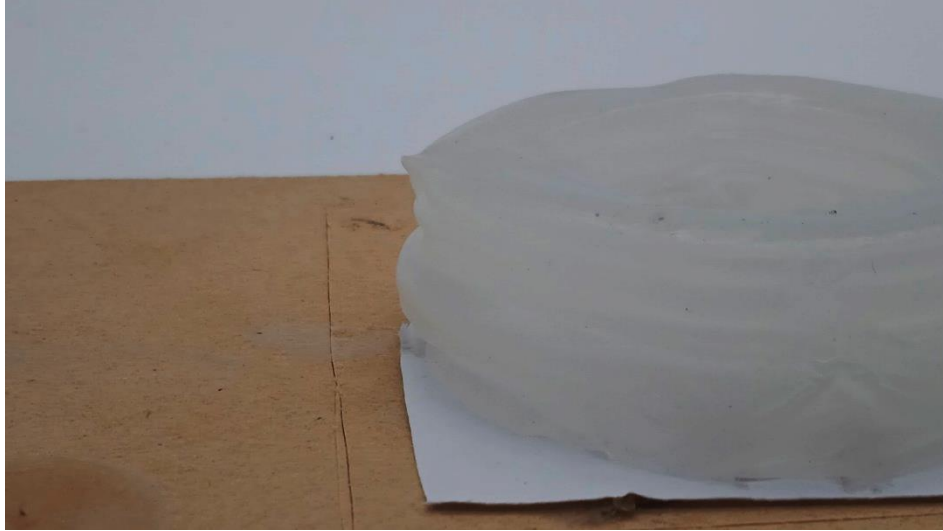
A. 73: Receta ST-W060-0620, 80 [°C] acercamiento de capas.



A. 74: Receta ST-W060-0620, 80 [°C] vista superior.



A. 75: Receta ST-W060-0620, 90 [°C]



A. 76: Receta ST-W060-0620, 90 [°C] acercamiento capas.

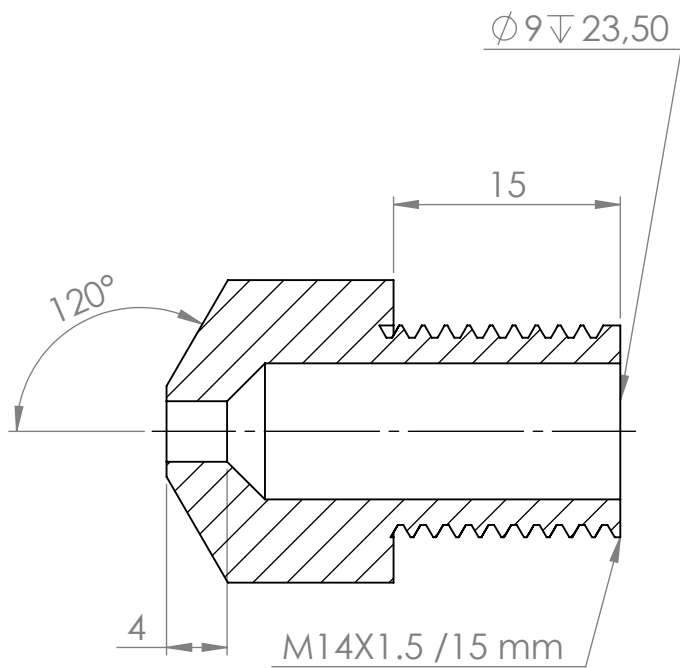
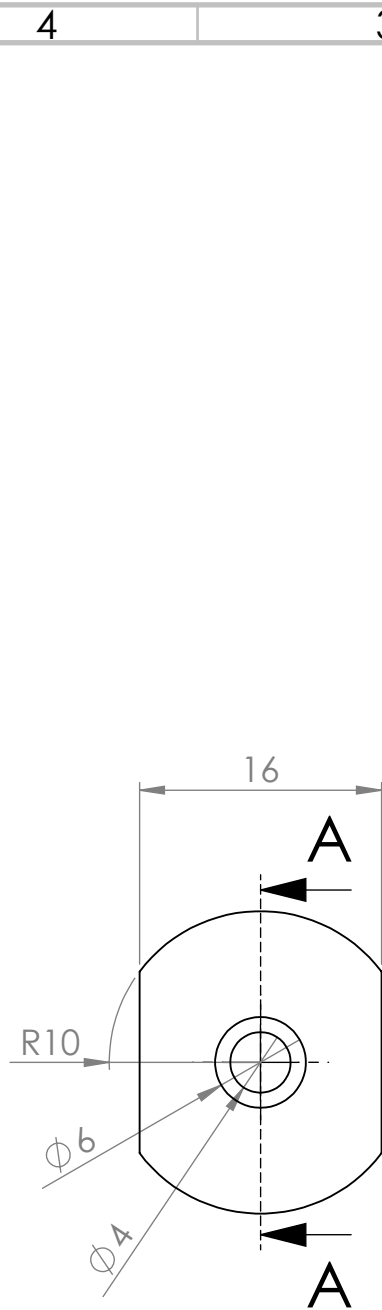


A. 77: Receta ST-W060-0620, 90 [°C] vista superior.

Anexo D: Planos

A continuación, se presentan los planos de las piezas mecanizadas y los sistemas que componen al sistema de extrusión.

Página dejada en blanco apropiado.



SECCIÓN A-A

escala 2:1

DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INSTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
Pieza Boquilla extrusor			REV. 0	HOJA 1/1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

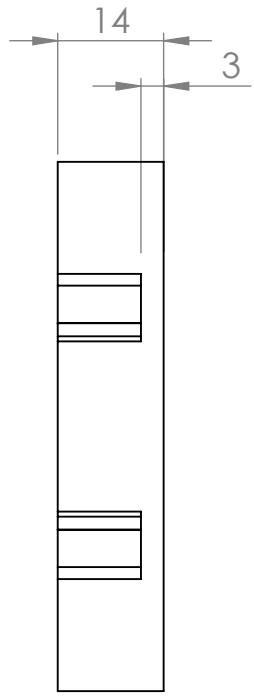
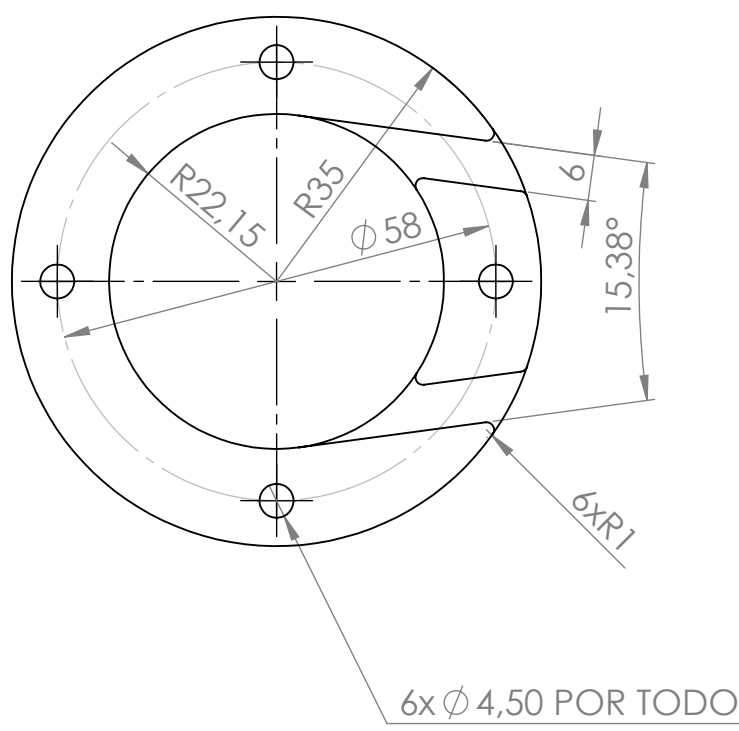
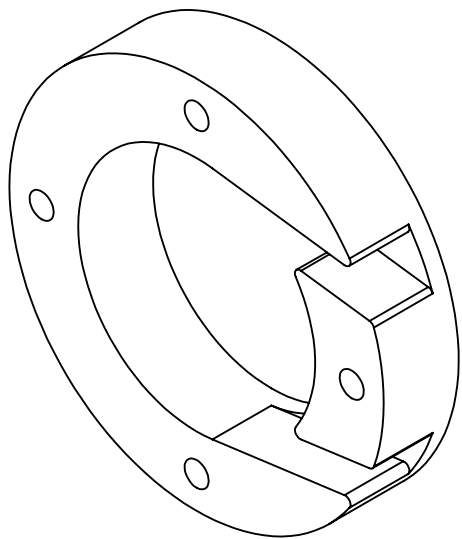
C

B

B

A

A

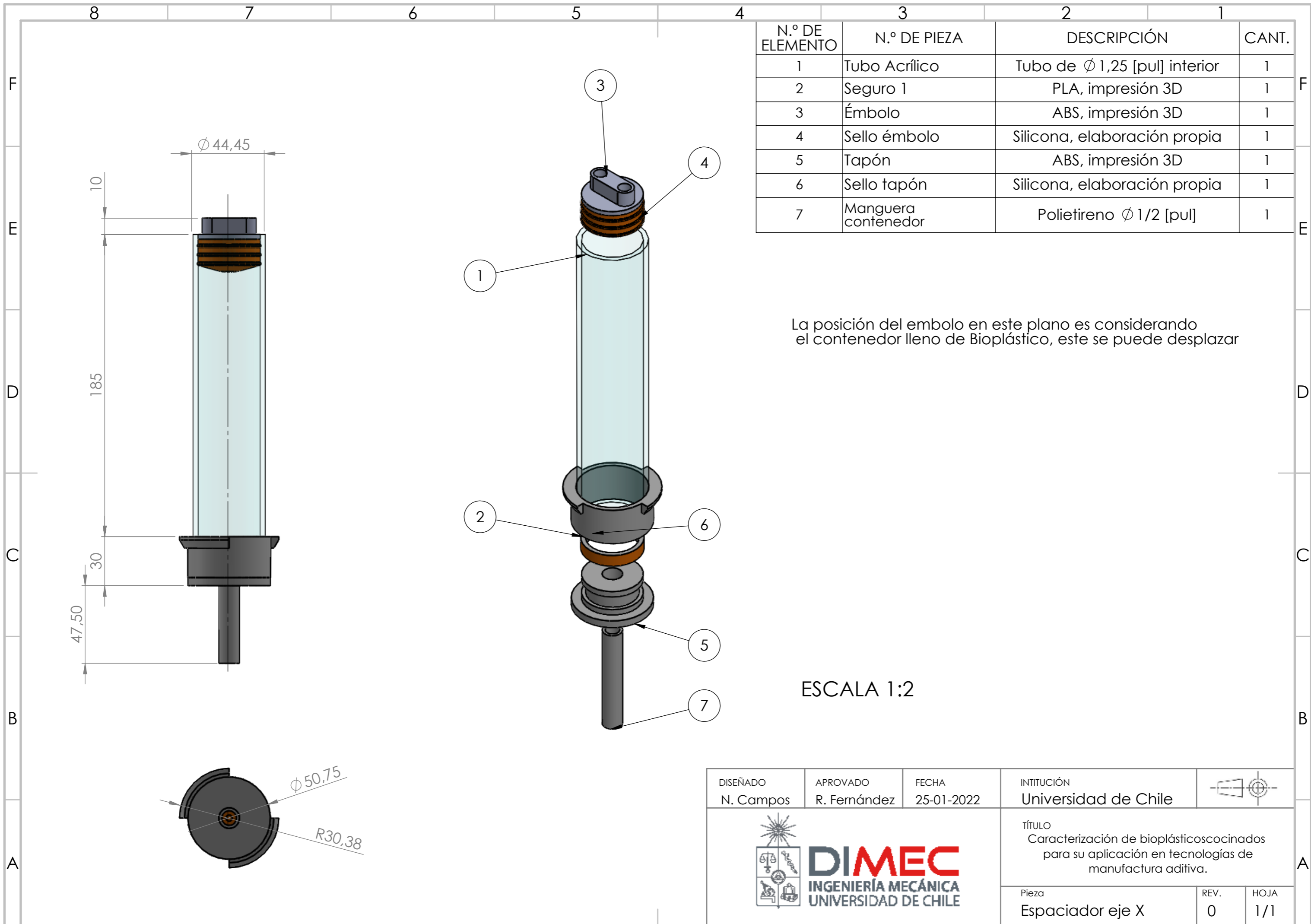


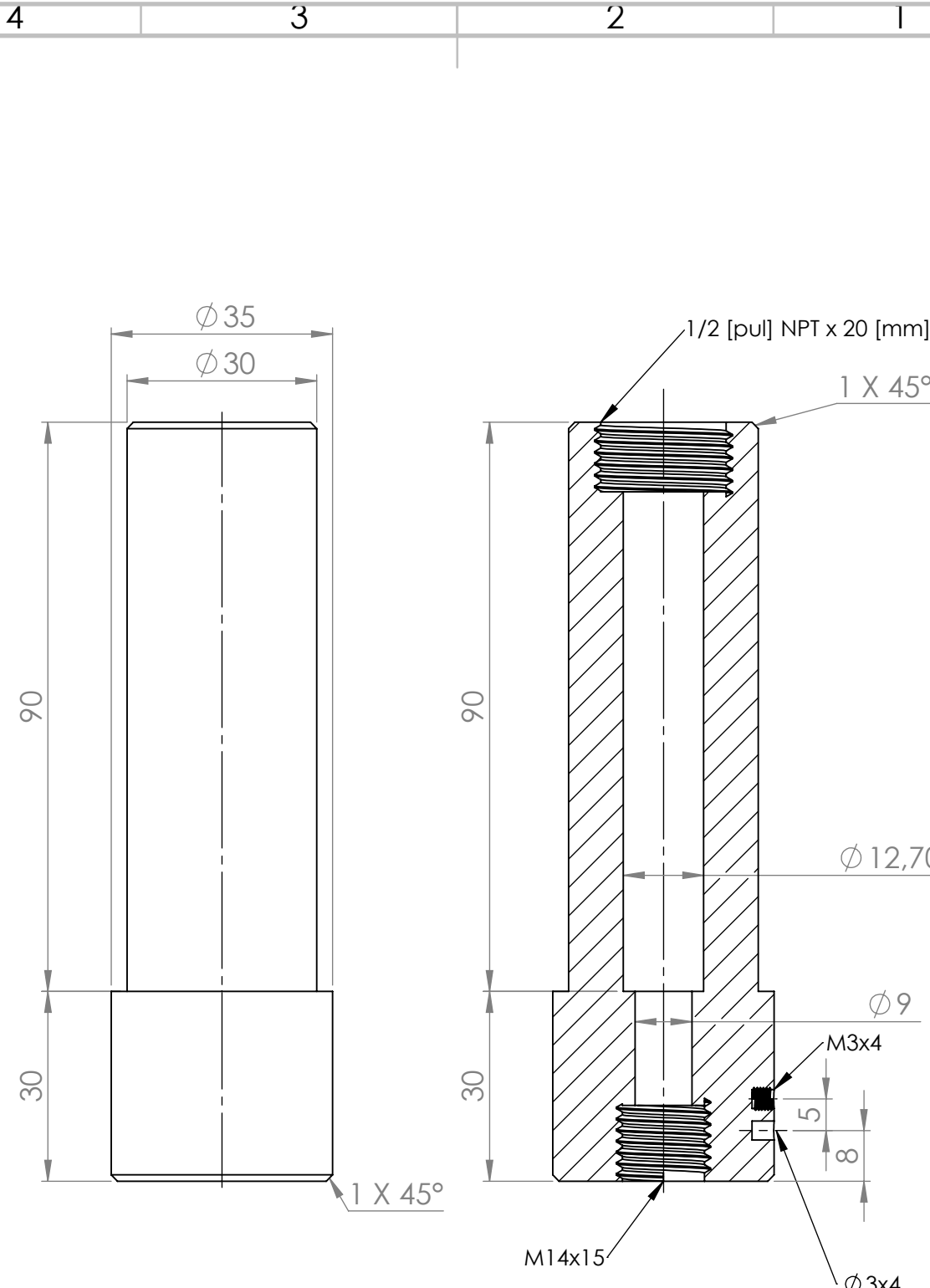
DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INTITUCIÓN Universidad de Chile	
-----------------------	--------------------------	---------------------	------------------------------------	--

DIMEC
INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD DE CHILE

TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.		
Pieza Case Polea	REV. 0	HOJA 1/1

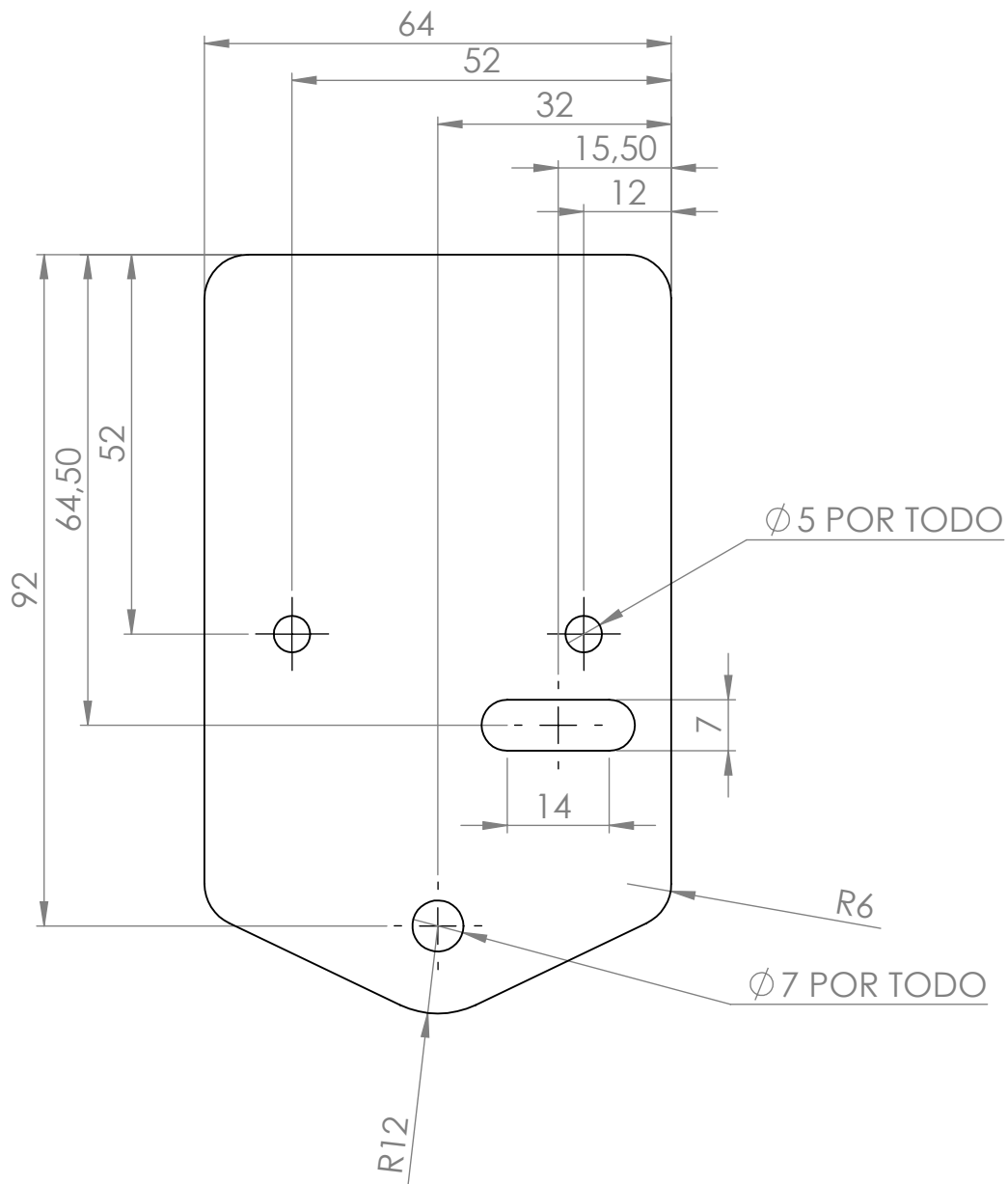
4 3 2 1





SECCIÓN
B-B
ESCALA 1 : 1

DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INSTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
Pieza Cuerpo del extrusor			REV. 0	HOJA 1/1



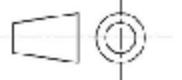
PLACA DE 3 [mm] DE ESPESOR

DISEÑADO
N. Campos

APROVADO
R. Fernández

FECHA
25-01-2022

INTITUCIÓN
Universidad de Chile



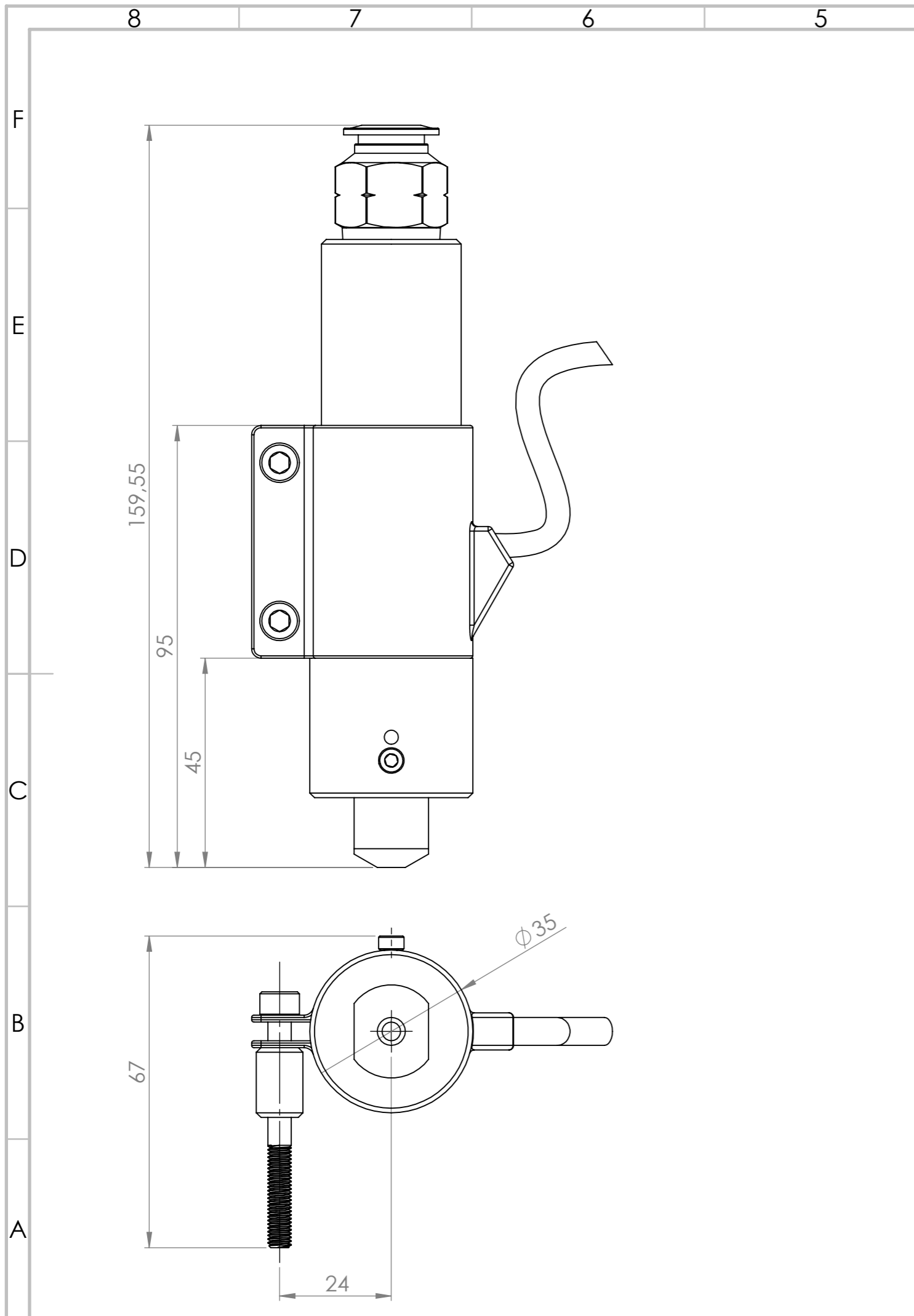
DIMEC
INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD DE CHILE

TÍTULO
Caracterización de bioplásticos cocinados
para su aplicación en tecnologías de
manufactura aditiva.

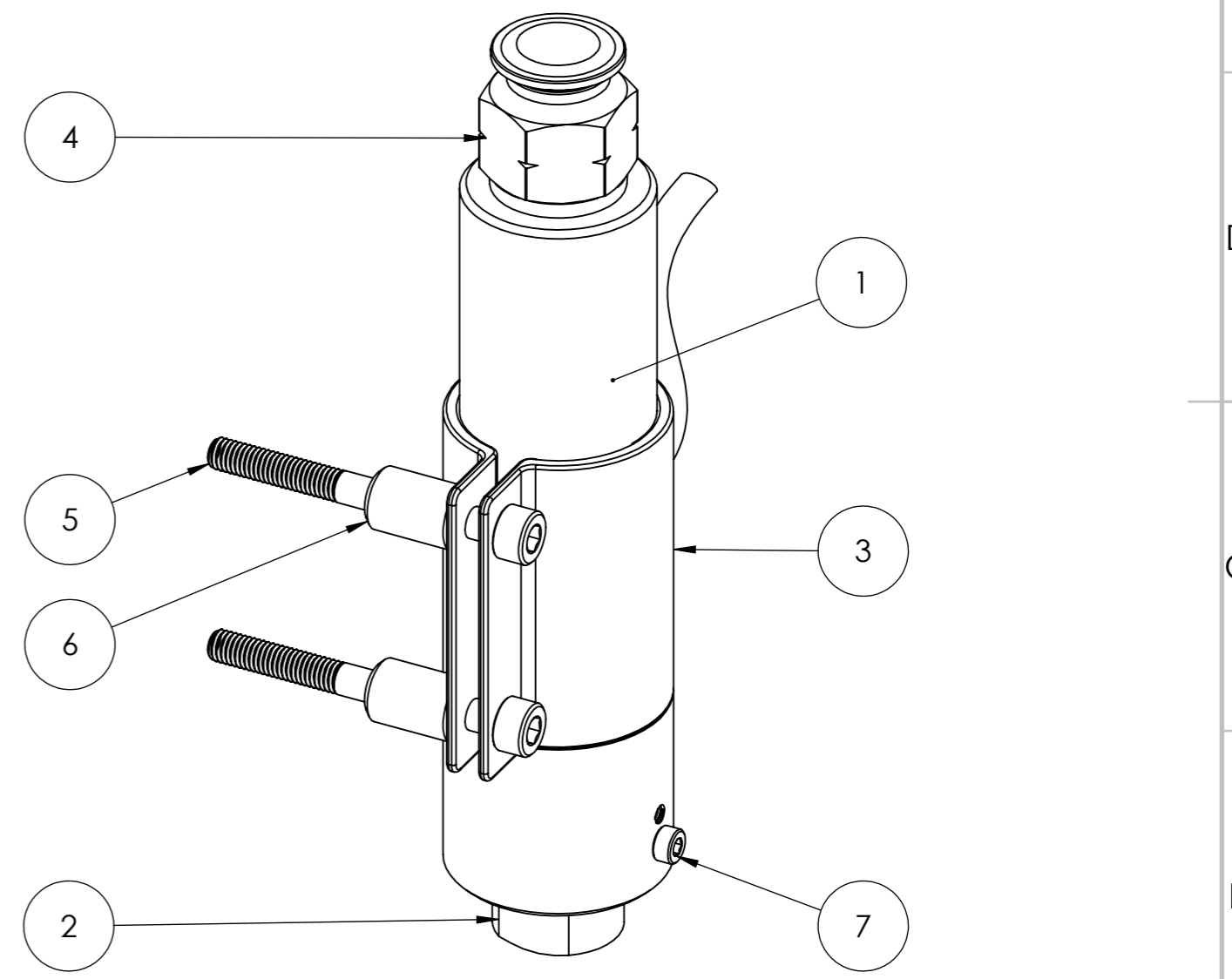
Pieza
Espaciador eje X

REV.
0

HOJA
1/1

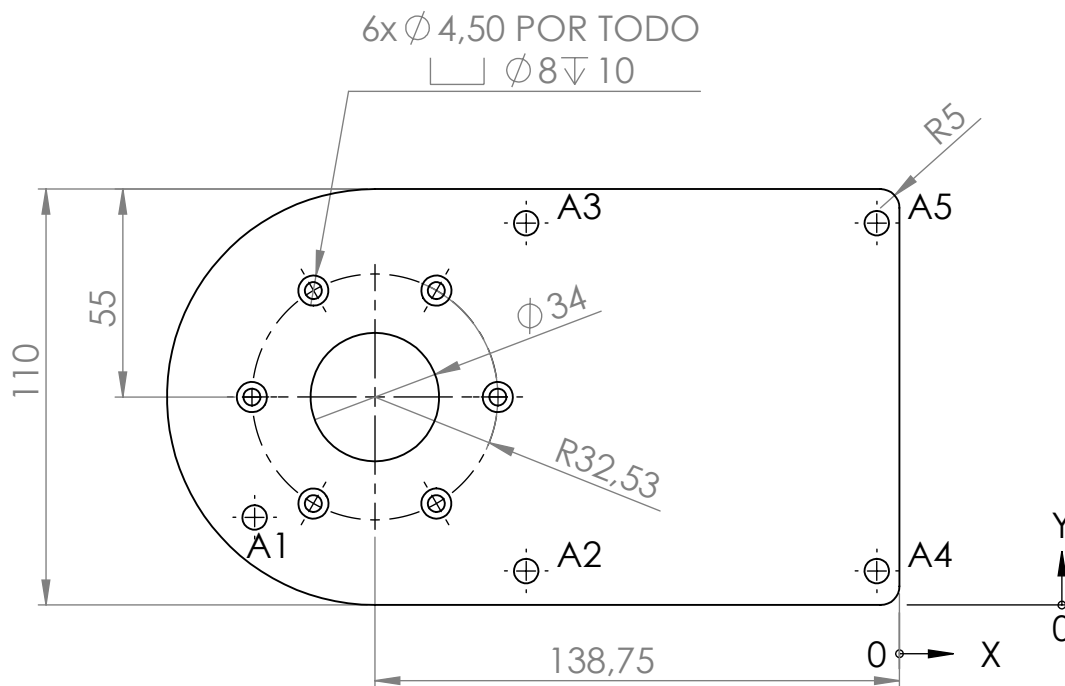


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Cuerpo del extrusor	Aluminio 6061	1
2	Boquilla	Bronce RG7	1
3	Resistencia	Resistencia de 235 [W] 30x50 [mm]	1
4	Unión Rápida	Unión 1/2" x 1/2" NPT Acero inoxidable PN 10	1
5	Perno M5	Acero Inox. 316 M5x50 [mm]	2
6	Espaciador	Espaciador 15 [mm] comercial	2
7	Perno M3	Acero al carbono pintado, M3x4 [mm]	1



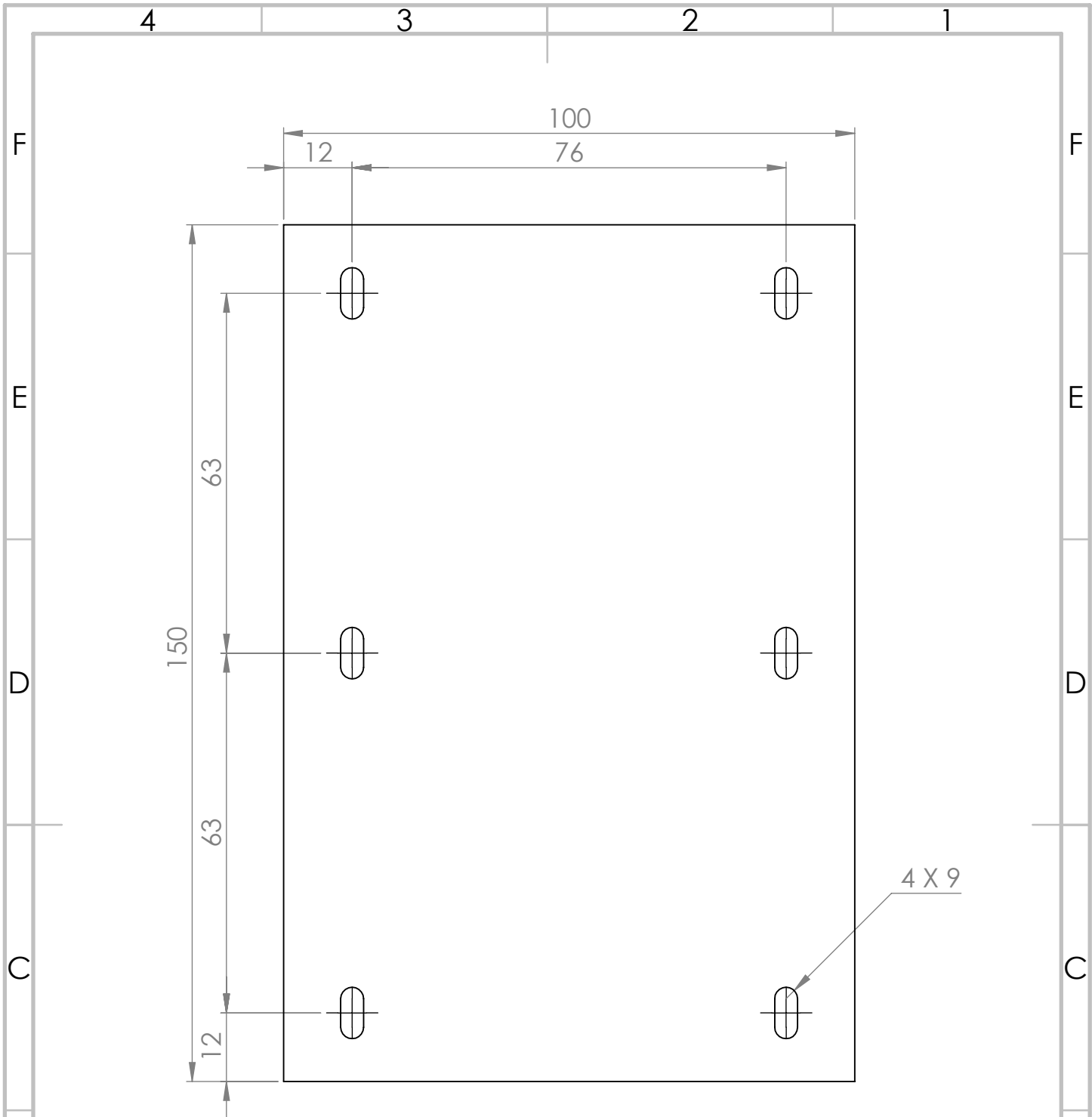
DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
			Pieza Extrusor	REV. 0

RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	-170,57	23,18	∅ 6,50 POR TODO
A2	-98,75	9	∅ 6,50 POR TODO
A3	-98,75	101	∅ 6,50 POR TODO
A4	-6	9	∅ 6,50 POR TODO
A5	-6	101	∅ 6,50 POR TODO



PLACA DE 15 [mm] DE ESPESOR

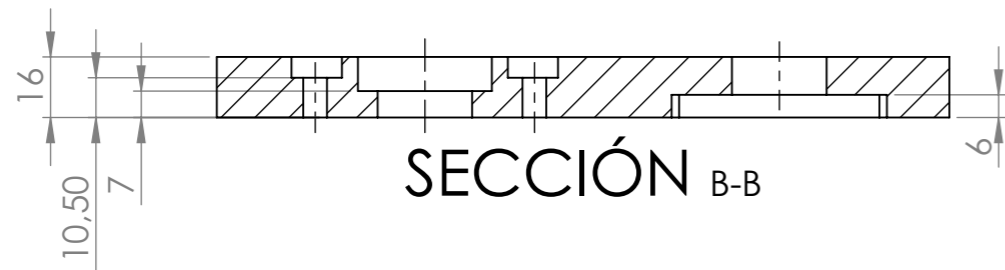
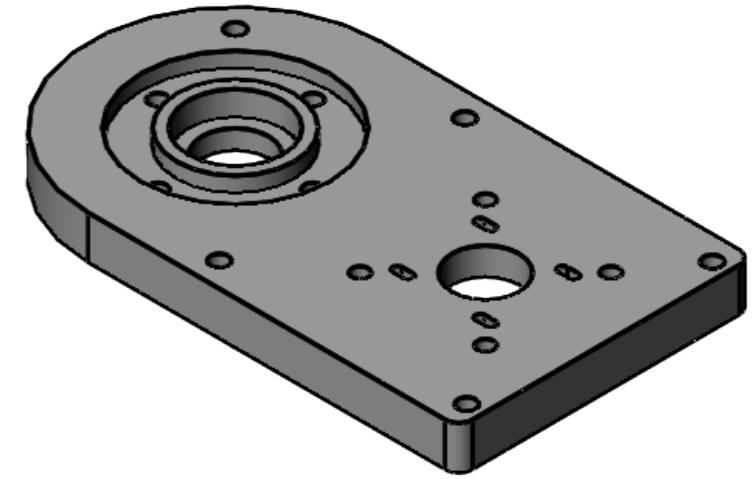
DISEÑO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
			Pieza Plato de fijación inferior	REV. 0



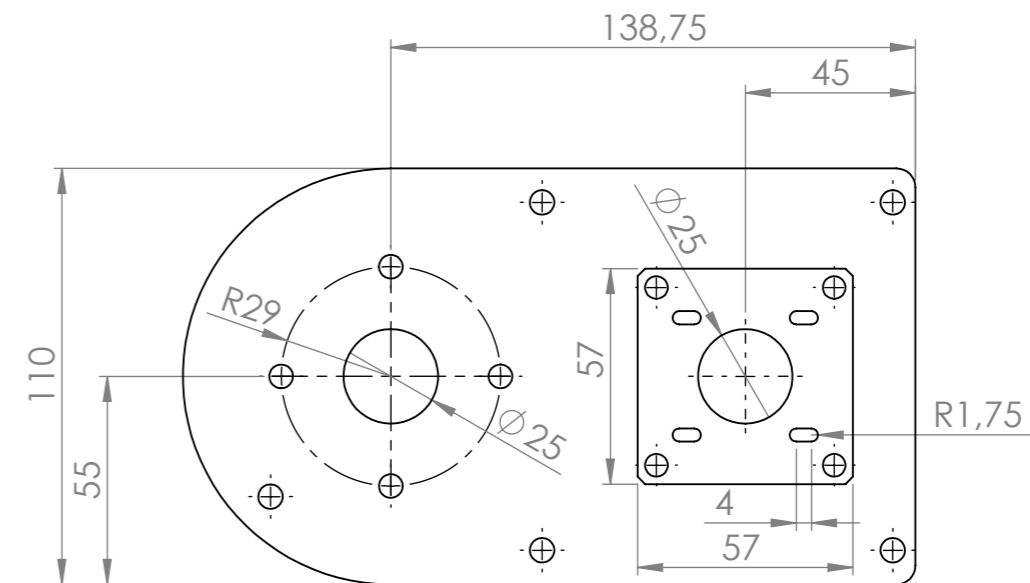
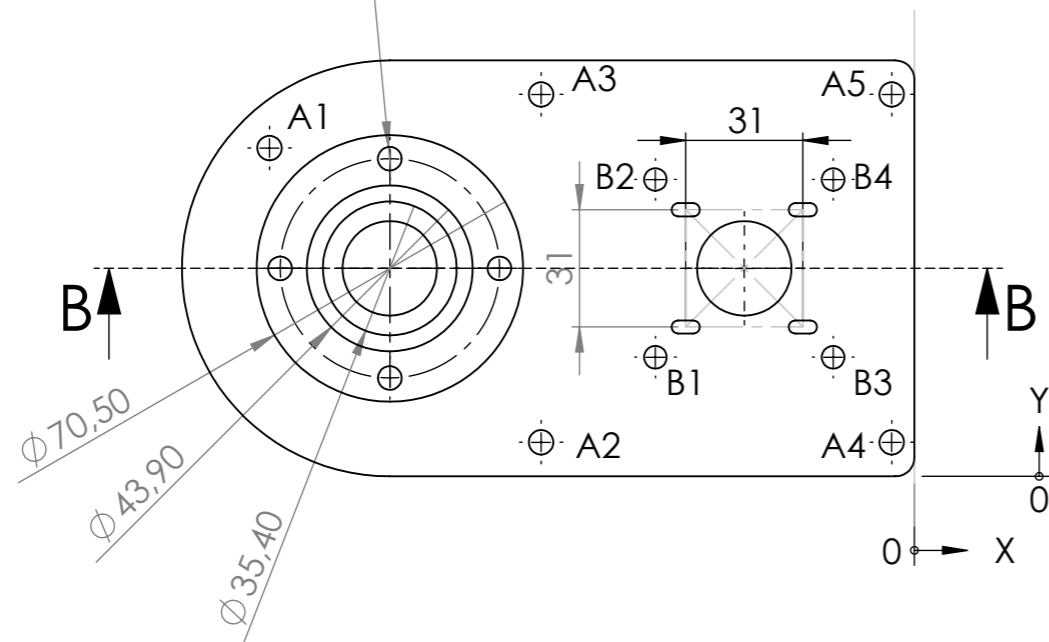
PLACA DE 3 [mm] DE ESPESOR

DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INSTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
Pieza Placa electrónica			REV. 0	HOJA 1/1

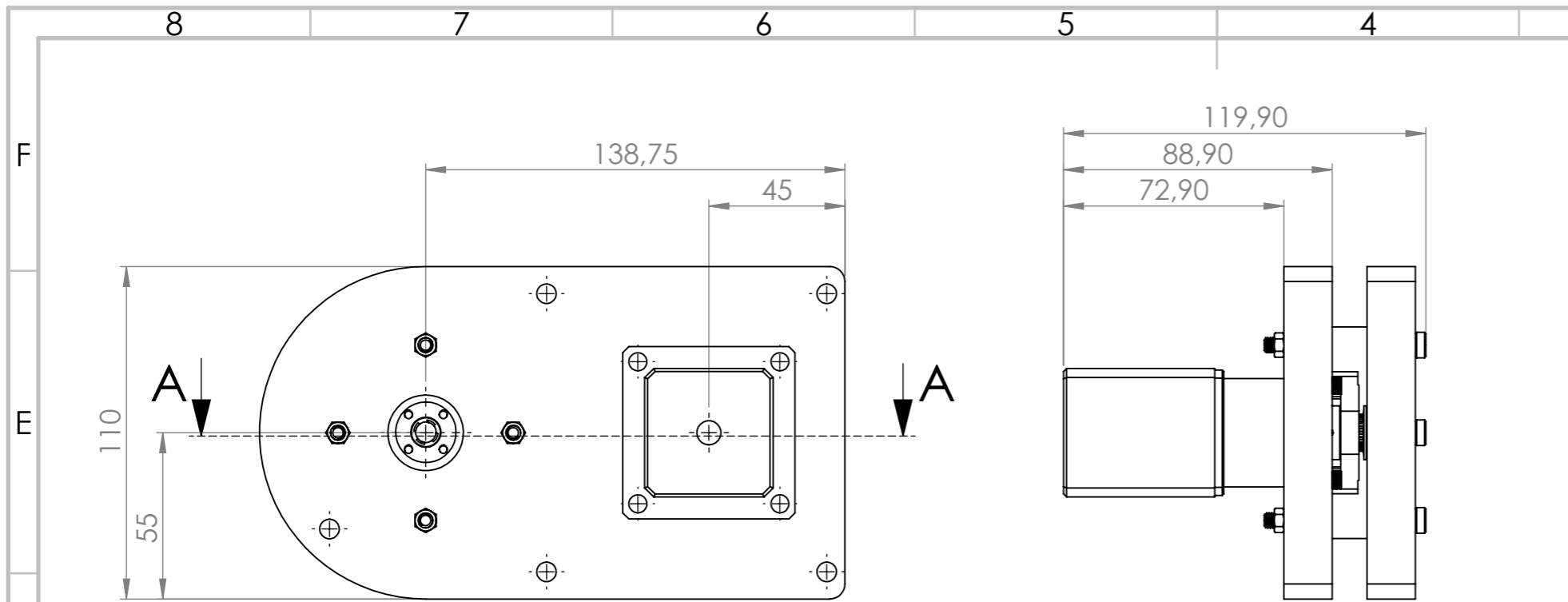
RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	-170,57	86,82	Ø 6,50 POR TODO
A2	-98,75	9	Ø 6,50 POR TODO
A3	-98,75	101	Ø 6,50 POR TODO
A4	-6	9	Ø 6,50 POR TODO
A5	-6	101	Ø 6,50 POR TODO
B1	-68,50	31,50	Ø 6 POR TODO
B2	-68,50	78,50	Ø 6 POR TODO
B3	-21,50	31,50	Ø 6 POR TODO
B4	-21,50	78,50	Ø 6 POR TODO



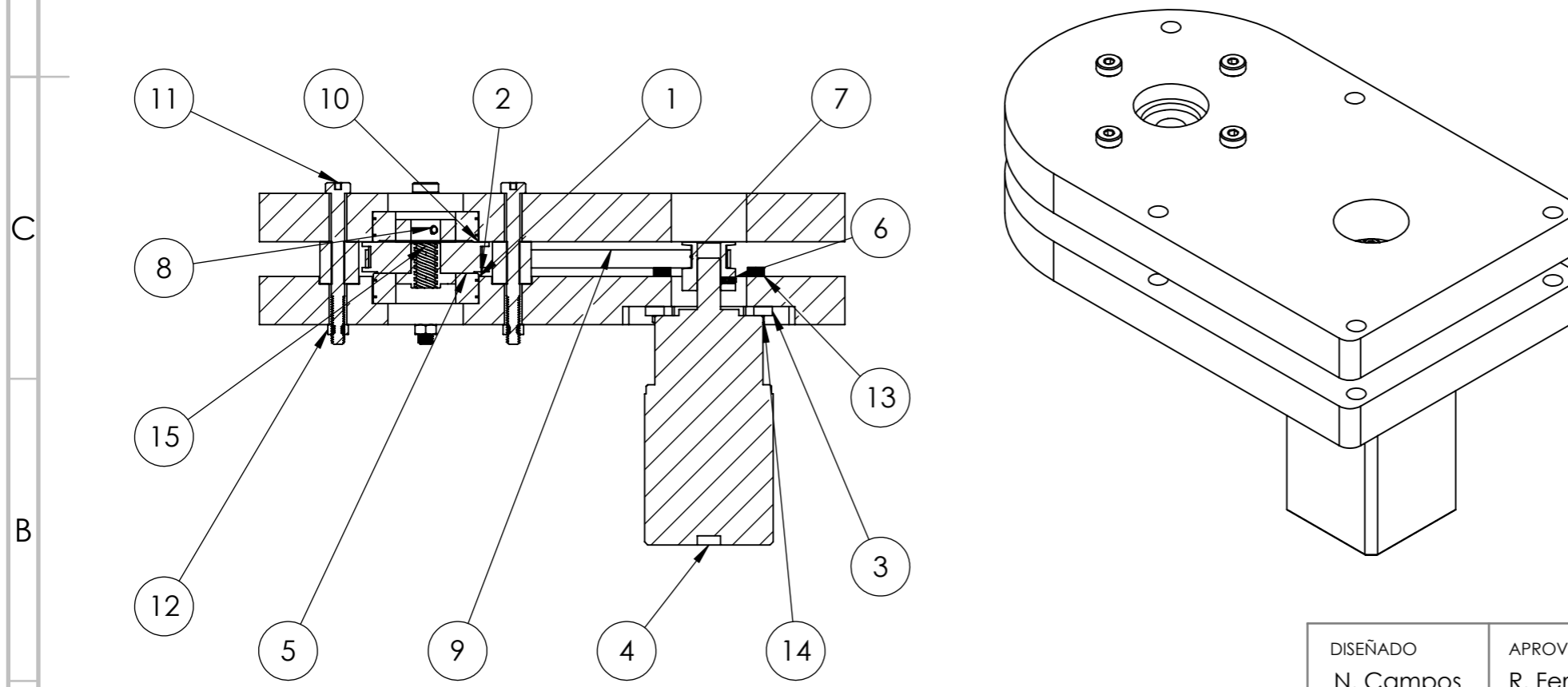
4 x Ø 6,30 POR TODO



DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
			Pieza Tapa Reductor Motor	REV. 0

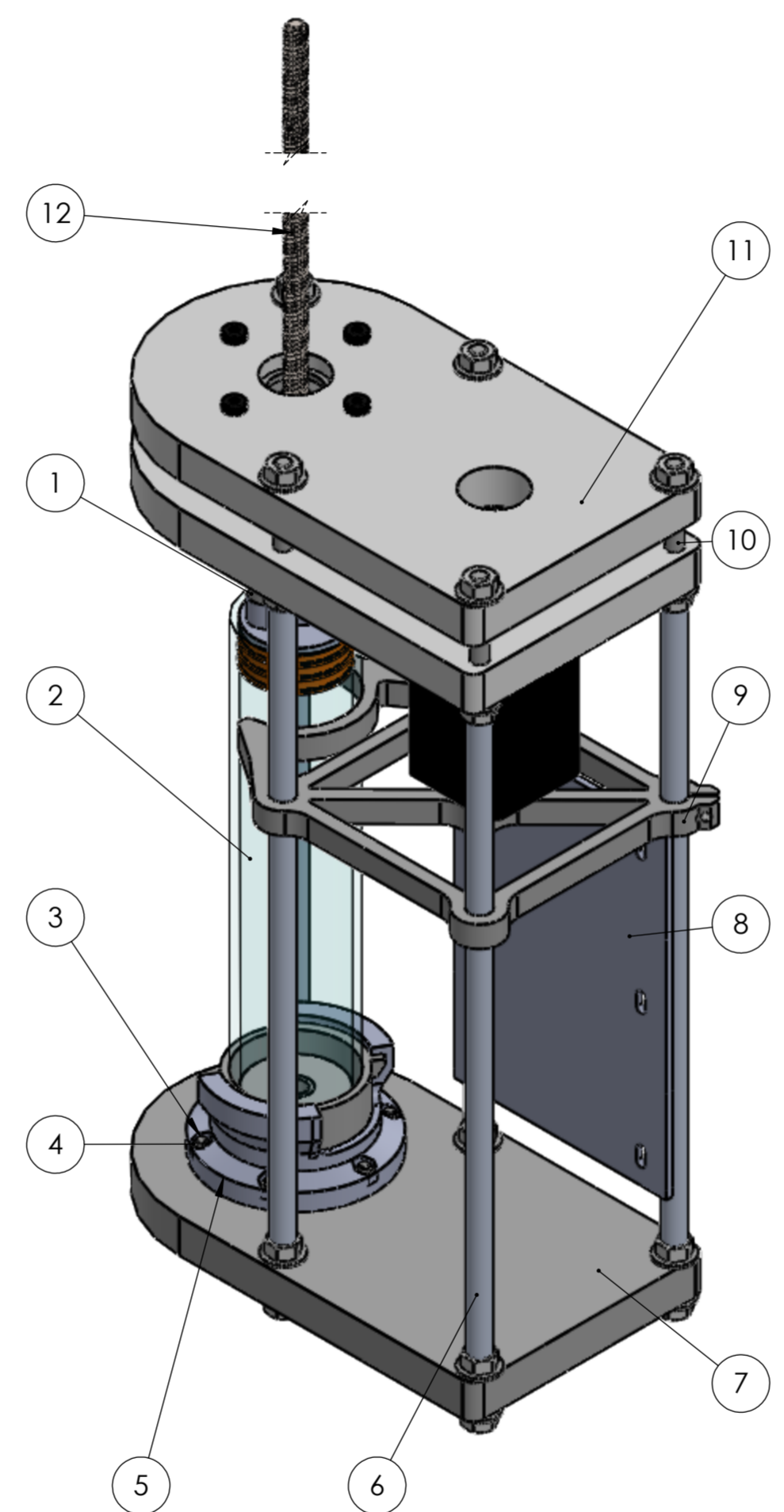
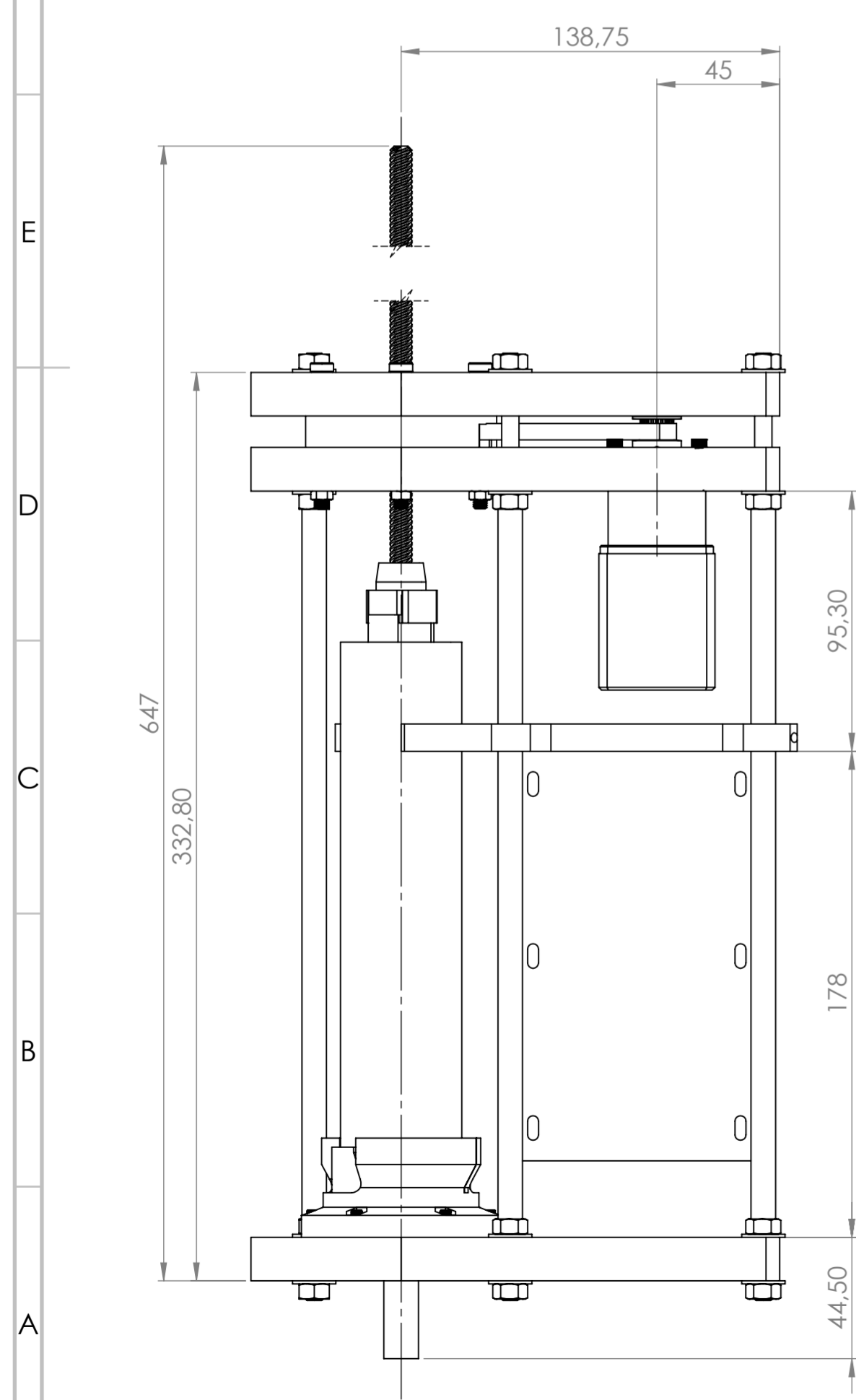
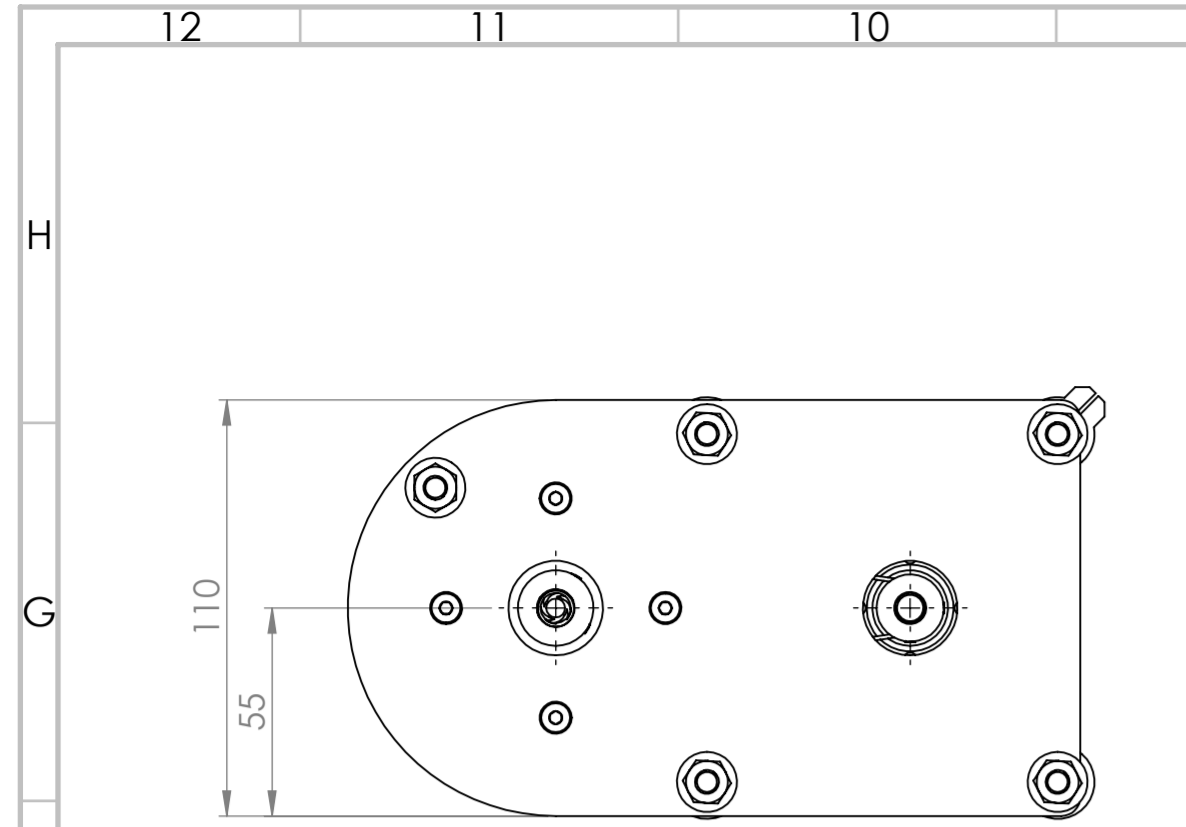


N.º DE ELEM.	Pieza	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	Tapa reductor inferior	Nylon 6	1
2	Case polea 60 dientes	Nylon 6	1
3	Soporte Motor	PLA, Impresión 3D	1
4	Motor Nema 17	Con reducción 5:1	1
5	Rodamiento axial	$\phi 35 \times \phi 20 \times 10$	2
6	Prisionero allen M3		2
7	Polea dentada GT2	20 dientes	1
8	Polea dentada GT2	60 dientes	1
9	CORREA GT2	Largo 268 [mm]	1
10	Tapa reductor superior	Nylon 6	1
11	Perno bajo perfil M4x 50 [mm]	Acero Carbono	4
12	Tuerca M4	Acero inox. 316	4
13	Perno M3x 16 [mm]	Acero inox. 316	4
14	Tuerca M3	Acero Inox. 316	4
15	Tuerca TR8	Latón	1



SECCIÓN A-A

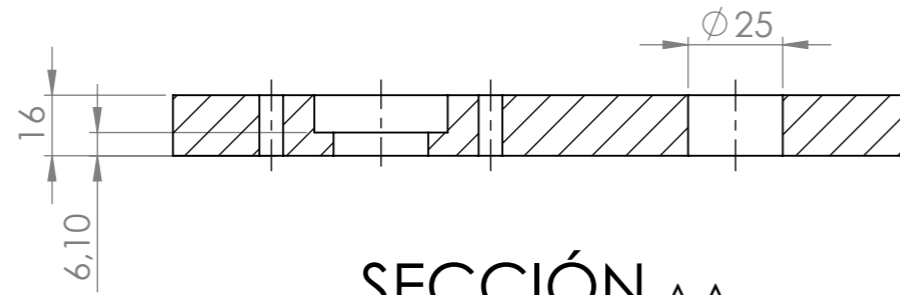
DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
			Pieza Reductor	REV. 0



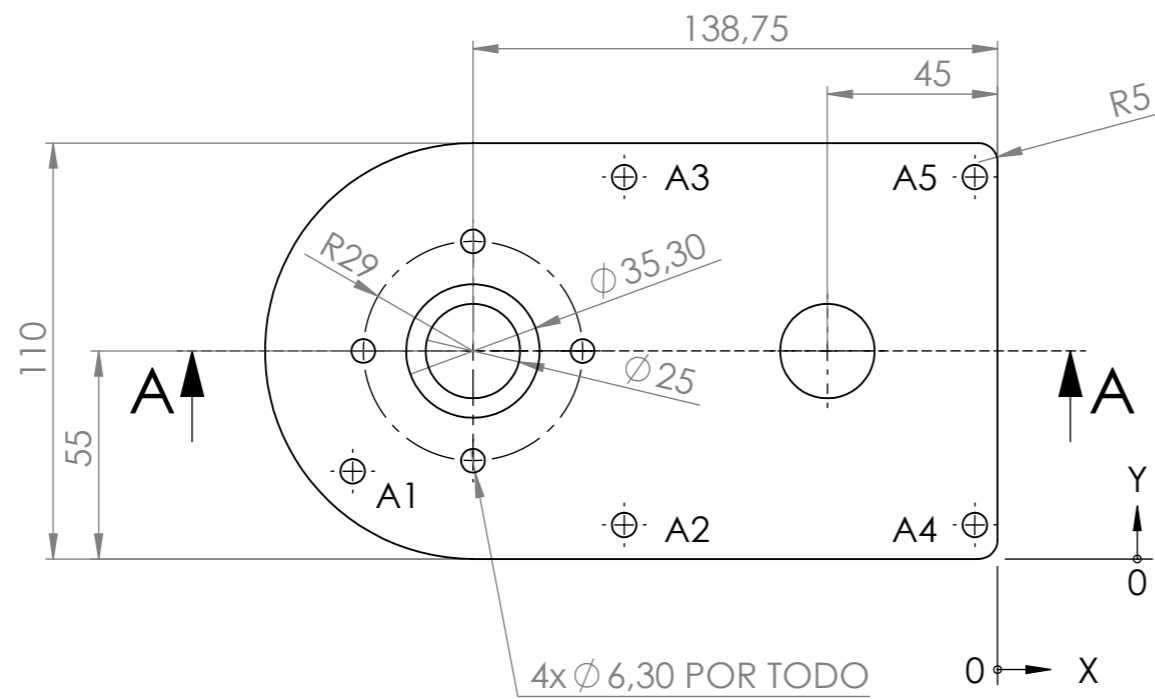
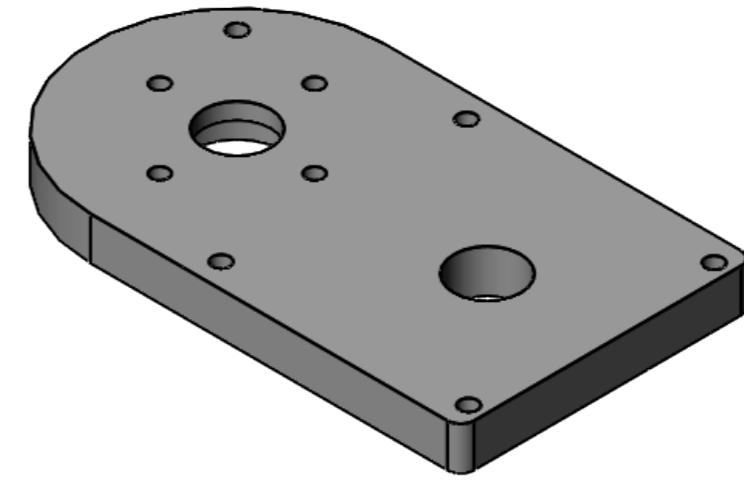
4	3	2	1
Nº DE ELEMENTO	PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	UNIÓN EMBOLO/VARA ROSCADA	PLA, IMPRESIÓN 3D	1
2	CONTENEDOR	DETALLES EN PLANO CORRESPONDIENTE	1
3	PERNO M4X 16 [mm]	ACERO INOX. 316	6
4	TUERCA M4	ACERO INOX. 316	6
5	SOPORTE CONTENEDOR	PLA. IMPRESIÓN 3D	1
6	TUBO DE ALUMINIO	ALUMINIO Ø9 EXT.	4
7	PLACA INFERIOR	NYLON 6	1
8	PLACA ELECTRÓNICA	ACRÍLICO 3 [mm]	1
9	SOPORTE SUPERIOR	PLA, IMPRESIÓN 3D	1
10	VARA ROSCADA 1/4 [PUL]	ACERO ZINCADO	4
11	REDUCTOR	DETALLES EN PLANO COORRESPONDIENTE	1
12	HUSILLO TR8	ACERO INOX 316	1

DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
			Conjunto Sistema propulsor	REV. 0

RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	-170,57	23,18	Ø 6,50 POR TODO
A2	-98,75	9	Ø 6,50 POR TODO
A3	-98,75	101	Ø 6,50 POR TODO
A4	-6	9	Ø 6,50 POR TODO
A5	-6	101	Ø 6,50 POR TODO



SECCIÓN A-A



DISEÑADO N. Campos	APROVADO R. Fernández	FECHA 25-01-2022	INTITUCIÓN Universidad de Chile	
			TÍTULO Caracterización de bioplásticos cocinados para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.	
			Pieza Tapa reducto superior	REV. 0