

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DEL VALLE
GRUPO EDUCATIVO

Diseño y fabricación de una impresora 3D para extrusión de pastas

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional
presentado por
Carmen Lucía González Abril

para optar el grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2020

Diseño y fabricación de una impresora 3D para extrusión de pastas

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DEL VALLE
GRUPO EDUCATIVO

Diseño y fabricación de una impresora 3D para extrusión de pastas

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional
presentado por
Carmen Lucía González Abril

para optar el grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2020

Vo.Bo.:



(F) _____

Ing. Mayari Pérez

Tribunal examinador:



(F) _____

Ing. Víctor Hugo Ayerdi



Ing. Andrés Viau



(F) _____

Ing. Mayari Pérez

Fecha de aprobación del examen de graduación: 7 de diciembre de 2020

Índice

Resumen.....	i
1. Introducción.....	1
2. Justificación.....	3
3. Objetivos.....	5
4. Metodología.....	7
5. Marco teórico.....	9
5.1 Manufactura aditiva.....	9
5.1.1 ¿Qué es la manufactura aditiva y cómo se compara con métodos tradicionales de manufactura?.....	9
5.1.2 Materiales y aplicaciones de la impresión 3D.....	10
5.1.3 Parámetros de impresión 3D.....	10
5.2 Consideraciones de diseño.....	11
5.2.1 Tipos de impresora.....	11
5.2.2 Componentes electromecánicos.....	12
5.2.3 Módulo de control de la impresora.....	12
5.2.4 Extrusores y cabezal de la impresora.....	14
5.3 Materiales pastosos.....	14
5.3.1 Tipos de pastas para impresión 3D.....	14
5.3.2 Medición de plasticidad con el Método de Pfefferkorn para arcillas.....	15
5.3.3 Calidad de impresión con respecto a la similitud del modelo digital, dimensiones y forma.....	17
5.3.4 Condiciones óptimas para trabajar con arcilla/cerámica en Guatemala.....	20
5.3.5 Aplicaciones de la cerámica.....	21
5.4 Softwares CAD/CAM y de análisis de elementos finitos.....	22
5.4.1 Softwares CAD.....	22
5.4.2 Softwares CAM.....	23
5.4.3 Softwares de análisis de elementos finitos.....	23
6. Resultados.....	25
6.1 Entrevistas.....	25

6.2	Diseño de la impresora.....	27
6.2.1	Matriz de decisión.....	27
6.3	Diseño del extrusor	28
6.4	Ensamble de la impresora	31
6.4.1	Listado de piezas y costos.....	31
6.4.2	Ensamblaje.....	32
6.5	Software, Hardware y Firmware.....	34
6.5.1	Configuración del firmware.....	34
6.5.2	Configuración del software.....	35
6.5.3	Configuración del hardware.....	38
6.6	Pruebas de impresión	39
6.6.1	Pruebas de desplazamiento	39
6.6.2	Preparación de la mezcla de cerámica	40
6.6.3	Pruebas con el extrusor	41
7.	Discusión de resultados.....	45
8.	Conclusiones	47
9.	Recomendaciones	49
10.	Bibliografía	51
11.	Apéndice	53
	Anexo 1: Entrevista a Marissa Mendizábal	53
	Anexo 2: Bill of Materials impresora Mbau3D	55
	Anexo 3: Plano perfil 2020 (medidas en mm).....	57
	Anexo 4: Plano perfil 2024 (medidas en mm).....	57
	Anexo 5: Plano motor stepper Nema	58
	Anexo 6: Planos impresora	58

Tabla de contenido de ilustraciones

Ilustración 1: Ejemplo matriz de decisión	8
Ilustración 2: Pasos para configurar una impresión desde el Software Repetier Host	14
Ilustración 3: Medición de plasticidad con el método de Pfefferkorn	16
Ilustración 4: Relación entre la reducción de la altura contra el contenido de humedad de la muestra	16
Ilustración 5: Set de 12 cilindros impresos con pasta Gres-130-MP	17
Ilustración 6: Set de elementos con diferentes perfiles a diferentes ángulos.....	19
Ilustración 7: Sobreposición de los perfiles de los modelos digitales sobre el modelo impreso.....	20
Ilustración 8: Piezas de Contorno Cerámica por Marissa Mendizábal	26
Ilustración 9: Cerámica de Santiago Palopó	26
Ilustración 10: Vista frontal del extrusor	28
Ilustración 11: Posición del extrusor en la impresora, vista lateral	29
Ilustración 12: Vista frontal boquillas.....	30
Ilustración 13: Vista lateral boquillas	30
Ilustración 14: Vista isométrica de la impresora.....	33
Ilustración 15: Proceso de ensamblaje	34
Ilustración 16: Segmento del código modificado	35
Ilustración 17: Control Manual con Easy Mode activado	36
Ilustración 18: Control Manual con Easy Mode desactivado	37
Ilustración 19: Diagrama eléctrico.....	38
Ilustración 20: Desplazamiento posiciones mínimas	39
Ilustración 21: Desplazamiento posiciones máximas	40
Ilustración 22: Masa en estado inicial y agitador.....	40
Ilustración 23: Carga del extrusor con la pasta.....	41
Ilustración 24: Embolo después de rellenarse.....	42
Ilustración 25: Extrusor con rebalse	42
Ilustración 26: Purga de material	43

Tabla de contenido de tablas

Tabla 1: Mediciones de los modelos impresos con la pasta Gres-130-MP, después del proceso de secado y horneado.....	18
Tabla 2: Mediciones de los modelos impresos con la pasta Gres-130-MP, después del proceso de secado y horneado, con perfiles distintos	19
Tabla 3: Matriz de decisión para el diseño de la impresora.....	27
Tabla 4: Cuadro de cálculos.....	31
Tabla 5: Listado de piezas y costos.....	32

Resumen



Se construyó un prototipo de una impresora 3D para extruir pastas de arcilla con un diseño basado en los resultados de un análisis cualitativo de funcionalidad y cuantitativos en términos de resultados de desempeño y costos de los componentes. Dentro de las partes de la impresora podemos mencionar elementos mecánicos estructurales como perfiles 2020 y 2040, tornillos, poleas, fajas dentadas y planchas de aluminio. El sistema electromecánico está conformado por elementos que se pueden adquirir en una tienda de electrónica. El sistema operativo está basado en el código de Marlin en Arduino y para la interfaz se utilizó Repetier-Host. Se llevaron a cabo pruebas de extrusión, en ellas se pudo observar que a pesar de que la impresora logró realizar purgas aún no se puede obtener con ella objetos tangibles que se asemejen a los modelos hechos en computadora que se deseen imprimir.

1. Introducción

Las tendencias de diseño de piezas de cerámica han cambiado a lo largo de la historia, en la actualidad se buscan realizar piezas con estilos más orgánicos y patrones conocidos como Bio-inspired Designs. Realizar este tipo de piezas es complejo con métodos tradicionales como moldes, por ello se busca la alternativa de la impresión 3D. El presente trabajo de graduación tenía como fin elaborar un diseño de una impresora 3D con un extrusor para imprimir pasta, y fabricar un prototipo. El diseño de los distintos componentes se realizó utilizando el software Inventor de Autodesk, ensamblando los distintos componentes del prototipo previo a su fabricación. La fabricación se realizó en un taller metalmecánica particular y tomó aproximadamente 5 meses. Cabe recalcar que el tiempo se extendió debido a un atraso de los componentes importados desde Estados Unidos. Una vez construido el prototipo se realizaron pruebas básicas de impresión para verificar el funcionamiento de los componentes.

La elección de diseño se basó en un análisis cualitativo de funcionalidad y cuantitativos en términos de resultados de desempeño y costos de los componentes. El prototipo de impresora fabricado tuvo un costo de menos de Q3,000.00. Algunos de los materiales utilizados, se encontraron en el taller de UVG, entre ellos un cilindro neumático que se adaptó para volverlo extrusor. Se utilizó softwares y firmwares libres como Repetier Host y Marlin para controlar la impresora, a los cuales se les realizó ciertas modificaciones para que se acoplaran a las necesidades de la impresora de pastas.

2. Justificación

Emre Cam, ceramista turco reconocido a nivel mundial, dijo: “Mi objetivo es transformar las formas artificiales de una máquina en una estructura orgánica con diferentes estilos, para capturar la oposición entre lo artificial y lo orgánico” (Marphil, 2018). La imaginación es el límite para los diseños que estos artistas pueden crear y para que guatemaltecos también tengan acceso a poder realizar sus prototipos es importante que cuenten con la maquinaria específica. Una impresora 3D de pastas es necesaria para lograr estas piezas pues sería muy difícil fabricarlas con los métodos tradicionales como es el uso de moldes o esculpiéndolas.

Tal como expresa Manolo Gallardo en un reportaje emitido por el periódico La Hora: “los artistas cumplen un papel importante en la sociedad toda vez que representan la cultura del país” (La Hora, 2013). En el año 2012, la exportación de artesanías guatemaltecas tuvo un impacto de 56 millones de dólares en la economía del país. Esta industria ha tenido un crecimiento del 5% anual, con una fuerza laboral de casi un millón de artesanos a nivel nacional. Por ende, es importante destinar recursos económicos e investigación para la innovación y actualización de los métodos de trabajo de este campo (soy502, 2013).

El mercado de impresión 3D ofrece diferentes alternativas, dentro de las marcas más conocidas a nivel industrial se encuentran 3DCeram, Admatec, ExOne y Voxeljet. Sin embargo, las alternativas de escritorio están lideradas por otras marcas como 3D Potter (ofreciendo impresoras desde \$2,850.00) (3D Potter, 2020), LUTUM (desde €5,920.00) (LUTUM, 2020) y WASP (desde \$100,000) (Aniwaa, 2020). Actualmente la oferta es limitada y requiere de una alta inversión, lo cual hace difícil que los guatemaltecos adquieran una, sin mencionar que no hay distribuidores autorizados en el país.

El presente proyecto será de beneficio para los artistas, ingenieros y arquitectos guatemaltecos, ya que, por medio de él, se explorarán técnicas alternativas para manufacturas de piezas destinadas a los campos de sus determinadas áreas de trabajo. Mismo que se verá beneficiado al aumentar el alcance de eficiencia de la producción de los componentes de sus trabajos o productos; todo esto, sin necesidad de exceder su alcance económico; teniendo que los precios de mercado, a la fecha, no bajan de \$2, 850.00 (lo que representa para un guatemalteco, más de un 8,000% de su salario mínimo). Logrando así, que las futuras generaciones de estudiantes, artistas y artesanos guatemaltecos puedan aprovecharse del conocimiento existente y aportar más al estudio mundial de las impresoras en 3D.

3. Objetivos

General

Diseñar y fabricar un prototipo de una impresora 3D para extruir pastas.

Específicos

- Diseñar un módulo de movimiento del cabezal de la impresora.
- Diseñar un extrusor para pastas.
- Fabricar y/o adquirir las piezas necesarias y realizar el ensamble de la impresora.
- Adaptar un Software libre para controlar la impresora.
- Realizar pruebas de impresión con pasta cerámica.

4. Metodología

Se hizo una revisión bibliográfica en bases de datos académicas y bibliotecas digitales como Ebsco e Research4life. Parte de la información sobre los componentes de impresoras 3d como piezas, software y hardware se obtuvo de los sitios web oficiales del fabricante. Toda la información incluida en esta tesis es reciente, con menos de 10 años de antigüedad.

Se utilizó el método más común para recolección de información cualitativa, las entrevistas, durante una investigación. El formato de estas puede ser estructurado, con preguntas y respuestas cerradas y estandarizadas como en un cuestionario; obteniendo información específica minimizando la variación entre respuestas. Por el contrario, las entrevistas no estructuradas se asemejan a una conversación, donde el entrevistado tiene mayor libertad de expresión. Es posible combinar ambos tipos de preguntas en un formato de entrevista semi estructurado, dando mayor libertad en algunas preguntas abiertas y recopilando información específica en las preguntas cerradas. Cuando el entrevistado cambia un poco el curso de la conversación tiene la capacidad de proveer aportes importantes, como elementos que el investigador no había tomado en cuenta. (Jamshed, 2014)

Se empleó la herramienta de la matriz de decisión para la toma de decisiones. A continuación, se describe su significado acorde a Recursos en Project Management:

“La matriz de decisión ponderada es una herramienta que se usa para poder decidir entre diferentes opciones de forma objetiva y consensuada; permitiendo al mismo tiempo que este proceso sea transparente y quede documentado.” (Recursos en Project Management, 2020)

Se deben incluir las opciones disponibles para elección en formato de columnas, ejemplos serían diferentes proveedores, acciones o formas de ejecutar un trabajo. Los criterios de evaluación serán listados en el formato de filas separadas. Cabe recalcar que cada criterio debe de estar definido para que todos los implicados en el análisis entiendan su propósito bajo la misma perspectiva y deben de tener asignado un peso relativo. La ponderación de cada rubro se utiliza para dar prioridad a las características más necesarias para efectuar el proyecto.

Para calcular los resultados y elegir una opción se debe sumar la multiplicación de cada puntuación por el peso de su criterio y luego seleccionar el total más favorable. Es importante mencionar que queda a discreción del encargado del proyecto asignar un orden de puntuación, por ejemplo, si se tienen 5 opciones diferentes y se enumeran de 5 a 1, siendo el 1 el elemento menos favorable, entonces el resultado más alto será el que debemos elegir. Sin embargo, alguien podría diseñarla a la inversa, tomando en cuenta el 1 como la mejor opción.

Ilustración 1: Ejemplo matriz de decisión

Factores		Alternativas			
Descripción	Peso	A	B	C	D
Factor 1	3	7	9	6	8
Factor 2	5	5	6	5	6
Factor 3	2	6	9	6	6
Factor 4	6	6	8	6	9
Factor 5	9	5	7	9	6
Factor 6	4	9	5	9	6
Factor 7	5	9	10	5	10
Factor 8	5	9	6	8	9
Factor 9	7	5	10	7	7
Factor 10	6	7	5	6	6
Total puntos		342	386	358	378
Porcentaje alcanzado		65.8%	74.2%	68.8%	72.7%

5. Marco teórico

5.1 Manufactura aditiva

5.1.1 ¿Qué es la manufactura aditiva y cómo se compara con métodos tradicionales de manufactura?

La manufactura aditiva es un proceso de fabricación que engloba diferentes tecnologías que involucran la aportación de material para crear objetos tridimensionales. Chuck Hull fue el inventor de esta tecnología tres décadas atrás, según Andrés Oppenheimer, en su libro *¡Crear o Morir!*, el precursor de esta tecnología registro más de 60 patentes y entre ellas las impresoras 3D (aunque lo hizo bajo el nombre de “aparato para la producción de objetos tridimensionales mediante estereolitografía”). Él explicaba que la estereolitografía es un procedimiento en el cual se fabrican objetos mediante la adición sucesiva de capas de materiales que al solidificarse forman el producto deseado. A comparación de los métodos tradicionales de manufactura; esta no utiliza sustracción de material, por lo que es un concepto que rompe las barreras donde se encuentran impedimentos por la complejidad de las formas. (Oppenheimer, 2014)

Antes las impresoras 3D ocupaban cuartos enteros y posteriormente fueron reduciendo su tamaño. Hoy en día personajes emblemáticos en el campo de la impresión 3D como Bre Pettis y Josef Prusa (fundador de MakerBot y fundador de Prusa, respectivamente) han hecho posible que se cuente con opciones de estos aparatos con el tamaño adecuado para colocarlo en un escritorio. El proceso de creación para que cualquiera pueda fabricar algo a través de la impresión 3D inicia con un archivo digital (modelo 3D), que luego la impresora es capaz de interpretar para definir los desplazamientos que debe tener al momento de ir extruyendo material y así ir recreando de manera tangible el modelo a través de capas sucesivas. (Oppenheimer, 2014)

Oppenheimer expone que muchos economistas pronostican que las impresoras 3D producirán una nueva revolución industrial. Este tipo de aparatos de uso personal vienen a cambiar el mundo en cuanto a la producción industrial masiva como se conoce hoy en día, reemplazándola progresivamente a una de tipo individualizada. Las empresas cambiaran su giro de negocio y exportaran diseños, no productos. El consumidor final tendrá la capacidad de personalizar los objetos que desea cambiándoles los colores, materiales y modificándolos a su conveniencia. (Oppenheimer, 2014)

Según Abraham Reichenal, presidente de 3DSystem pronto habrá tiendas de impresoras 3D por todos lados, similares a los centros de impresión a donde se puede imprimir una fotografía o un documento con un acabado especial. De acuerdo con Forbes, el incremento de este tipo de centros y el hecho que los usuarios tengan sus propias impresoras en casa creara una nueva lucha en torno a la propiedad intelectual pues las personas podrían copiar los productos sin pagar regalías a las compañías que desarrollan los mismos. (Oppenheimer, 2014)

Según Oppenheimer, de acuerdo con datos de Gartner Inc. (Una de las firmas consultoras más reconocidas por estudiar el mercado tecnológico), se tenía previsto que para el año 2017 las ventas de impresoras 3D de escritorio aumentarían más de un 40%, empezando con un piso bajo de tan solo 826, 000 unidades en todo el mundo. Al contrario de otras predicciones este tipo de tecnología sería más usado por las grandes empresas a nivel mundial y no por usuarios que les deseen dar un uso personal. (Oppenheimer, 2014)

Los escépticos dudan que esta tecnología vendrá a reemplazar la producción industrial a como es hoy en día dado a que las mismas no tienen la capacidad (hasta el momento) de producir masivamente aparatos complejos funcionales, como lo hacen la industria manufacturera en China con electrodomésticos o dispositivos móviles. Además, aunque las impresoras sean modificadas para lograr estos objetivos sería mucho más caro que los métodos tradicionales de producción en línea. Sin embargo, es innegable que la utilización de las impresoras 3D alterará las cadenas de suministro, pues los consumidores encontrarán beneficios en ellas como el hecho de que no tienen que importar productos desde lugares lejanos, no tienen que gastar en bodegas, costos de transporte e importación y además en muchos casos se reducirá la necesidad de pagarle a operarios manufactureros. (Oppenheimer, 2014)

5.1.2 Materiales y aplicaciones de la impresión 3D

El futuro apunta a que la humanidad será capaz de producir en casa artículos personales como ropa, joyas, zapatos y vajillas de materiales diversos. La Nasa ya está usando impresoras 3D en el espacio para fabricar repuestos para sus naves espaciales, de manera análoga lo hacen la industria marítima y aeronáutica para poder reemplazar de forma inmediata una pieza y no tener que quedarse varados a la espera de que la misma sea enviada por un fabricante lejano. La industria médica las utiliza cada vez más para fabricar prótesis de titanio personalizadas o audífonos que se acoplan al canal auditivo de cada persona. Dentro de poco se podrá encontrar a la venta comida producida con estos aparatos, pero no solo se limitarán a las formas peculiares que pueden crear si no que tendrán el atractivo de poder seleccionar los nutrientes que desees aportarles. (Oppenheimer, 2014)

Reichental aclara que 3DSystems ya cuenta con más de 100 materiales disponibles como el nylon real, plásticos adaptados, metales completamente densos y químicamente puros, materiales similares al caucho y otros materiales similares a la cera. (Oppenheimer, 2014)

5.1.3 Parámetros de impresión 3D

Dentro de los parámetros más importantes podemos mencionar los siguientes

- La altura de capa define el grosor de cada capa en el eje Z. Entre más delgada sea esta las piezas tendrán mayor definición, pero su tiempo de impresión incrementará.
- Cada capa de la impresión tiene n número de perímetros que definen el contorno de los objetos a imprimir, lo que se puede definir como espesor de pared.

- Las capas de cierre son el número de capas sólidas que cerraran la pieza.
- La densidad de relleno define que tan maciza o hueca es una pieza. Hoy en día existen una gran cantidad de patrones de relleno que se ajustan a las necesidades del usuario. El mismo no afecta la parte exterior de la pieza, sin embargo, si el objeto estará sometido a esfuerzos y la densidad no es la correcta podría llegar a deformarse o fallar por completo.
- Este parámetro define simplemente la velocidad a la que se imprimirá la pieza. Por lo regular a velocidades más altas se obtienen resultados con menor definición.
- Los soportes son necesarios de implementar cuando la pieza a imprimir tiene secciones en donde las capas no se encuentran apoyadas sobre capas predecesoras.

(PRODYSOL, 2017)

5.2 Consideraciones de diseño

5.2.1 Tipos de impresora

Los sistemas de impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling) requieren de al menos tres diferentes ejes ortogonales que sean capaces de crear objetos tridimensionales. La calidad de la impresión capa a capa y la velocidad de esta tiene una relación directa con el desplazamiento en los ejes. Existen varios mecanismos y configuraciones dentro de la industria de impresión 3D, a continuación, se detallan los más reconocidos.

El modelo de impresoras 3D cartesianas dependen de uno o más motores eléctricos en cada eje tienen un área de impresión definido en un espacio rectangular y la cama de impresión por lo regular mantiene la misma forma. Este tipo es el más conocido para impresoras de escritorio, como las que encontraríamos en casa o en un centro educativo. (Carolo, 2020)

Las impresoras 3D CoreXY tienen un mecanismo de movimiento único. Su movimiento lateral XY es impulsado por dos motores y largas fajas de tiempo en un sistema bastante complicado y dinámico. El movimiento vertical (eje Z) lo realiza en su totalidad la cama de impresión y siempre opera en dirección descendente. Dentro de las ventajas de esta configuración podemos mencionar que pueden imprimir a velocidades mucho más altas y que tienen menor cantidad de partes y a la vez mas livianas. El hecho que los motores estén fijos en los marcos permite que se reduzcan las vibraciones en la estructura y eso nos garantiza una impresión de mayor precisión, sin embargo, se ha encontrado que las fajas de tiempo son la mayor causa de problemas, cuando estas se aflojan comienzan a movimientos inexactos y si están muy tensionadas corremos el riesgo de experimentar desgaste o rupturas. (Carolo, 2020)

Luego se encuentran las impresoras 3D de configuración Delta. El extrusor en estas máquinas es adaptado a tres brazos en movimientos, cada uno conectado a un eje vertical, lo que nos lleva a concluir que cualquier desplazamiento para llegar a un punto en el

espacio en específico será realizado por los tres brazos de manera simultánea. Los cálculos trigonométricos procesados por el computador nos permiten llegar a tener movimientos acertados y precisos. En este caso la cama de impresión es estacionaria y fijada a la base de la máquina. Si lo que se busca es altura esta es tu opción ideal, sin embargo, si estás buscando crear un objeto amplio en sus dimensiones XY esta podría ser una razón por la cual descartar este tipo de configuración ya que el área es un poco limitada y además suelen ser más difíciles de calibrar. (Carolo, 2020)

Un punto en el espacio se puede describir tanto como un vector cartesiano, como en un vector polar, con esta analogía podemos describir las impresoras 3D Polares. Las mismas requieren únicamente de una dimensión lineal y dos ángulos para posicionar correctamente el extrusor que ira aportando capa a capa el material para crear un objeto. Este tipo de configuración es bastante atractiva pues no requiere de grandes marcos y estructuras para funcionar, por lo que optimiza y ocupa el espacio de mejor manera.

La configuración Scara, por sus siglas en inglés, hace referencia a un brazo robótico articulado de cumplimiento selectivo. El mismo realiza los movimientos XY mientras el desplazamiento vertical es totalmente realizado por la cama de impresión. Este tipo de impresoras se mueve a sorprendentemente altas velocidades, sin embargo, requieren que las articulaciones del brazo funcionen a la perfección. (Carolo, 2020)

5.2.2 Componentes electromecánicos

La mayoría impresoras de escritorio utilizan motores paso a paso para empujar la materia prima hacia la boquilla del extrusor y controlar sus movimientos traslacionales. Entre ellos se incluyen los controladores de motor paso a paso, convertidores analógicos a digital (ADC) para control de temperatura, reguladores de voltaje y relés para cambiar la calefacción. Cabe recalcar que, dependiendo del material a extruir, como es el caso de algunas pastas, se pueden omitir los componentes para calentar la mezcla.

Es común que las impresoras de pasta usen acero quirúrgico o de grado alimenticio porque pueden usar chocolate u otras pastas comestibles. Las pastas de cemento o arcilla no necesitan este metal, pero si en el futuro desea diversificar sus materiales de impresión, será una buena consideración de diseño a tomar en cuenta.

5.2.3 Módulo de control de la impresora

Firmware

La principal diferencia entre el firmware y el software es que el firmware es un tipo especial de software que ayuda a controlar el hardware (el conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen un sistema informático) de un dispositivo, mientras que un software es una colección de instrucciones que le dice a la computadora que realice una tarea específica. (Pediaa.Com, 2018) La impresora utilizará el firmware libre Marlin,

creado para la familia RepRap de replicadores de prototipos rápidos, conocidos popularmente como "impresoras 3D". Como testimonio de su calidad, Marlin es utilizado por varias impresoras 3D comerciales respetadas. Ultimaker, Printerbot, AlephObjects (Lulzbot) y Prusa Research son solo algunos de los proveedores que envían una variante de Marlin. Este también es capaz de manejar grabadoras láser y CNC. Es personalizable, extensible y económico tanto para aficionados como para vendedores. Las configuraciones específicas se pueden modificar en la plataforma de Arduino IDE. Las funciones se habilitan según sea necesario para adaptar Marlin a componentes agregados. (Marlin Firmware, 2020) Sus principales características son:

- Código G con todas las funciones con más de 150 comandos
- Conjunto completo de movimiento de código G, que incluye líneas, arcos y curvas de Bézier
- Sistema de movimiento inteligente con anticipación, movimiento basado en interrupciones, aceleración lineal
- Soporte para cinemática cartesiana, delta, SCARA y Core / H-Bot
- Control del calentador PID de circuito cerrado con ajuste automático, protección térmica, corte de seguridad
- Admite hasta 5 extrusoras más una plataforma de impresión con calefacción
- Interfaz de usuario del controlador LCD con más de 30 traducciones de idiomas
- Impresión de tarjetas SD y basada en host con inicio automático
- Compensación de nivelación de la cama: con o sin sonda de cama
- Avance lineal para extrusión a presión
- Soporte para extrusión volumétrica
- Soporte para mezcladores y múltiples extrusoras (Cyclops, Chimera, Diamond)
- Soporte para sensores de ancho / salida de filamentos
- Temporizador de trabajos de impresión y contador de impresión

Software

Los fabricantes de las empresas de impresoras 3D a gran escala desarrollan su propio software, que no permite configurar los parámetros necesarios para un tipo de extrusora diferente al específico de la máquina. Por lo tanto, debemos crear uno nuevo o buscar un firmware y software de código abierto en la web. Según Andrés Hermes, la impresora MBAU 3D se basó en el Proyecto Prusa. Prusa es una empresa checa fundada por Josef Prusa en 2012. El considera que la impresión 3D debe ser una nueva tecnología que la gente debería tener acceso para realizar cambios y mejoras, por lo que se unió al proyecto RepRap de código abierto. El galardonado (Nombrado como el "Mejor Kit de Impresora 3D" varias veces por ALL3DP y ha recibido diferentes títulos relacionados con la tecnología por Make Magazine). Las impresoras 3D originales Prusa i3 todavía están disponibles para todo el público.

Ilustración 2: Pasos para configurar una impresión desde el Software Repetier Host



Repetier Host, el software donde se adaptan los parámetros de impresión para cada ensayo sigue el proceso de posicionar tu modelo digital, dividir en secciones o rebanadas que representan cada capa de material, visualización previa de como seria la impresión y por último imprimir (trasladar los comandos desde el computador hasta la impresora de manera que el material sea extruido y el objeto se vuelva tangible) (Ver Ilustración 2). Algunas de las configuraciones en el software deberán adaptarse para la impresión de pastas porque la plataforma solo tiene material plástico para programar. (Repetier Host, 2020)

5.2.4 Extrusores y cabezal de la impresora

El diseño del extrusor se ajusta a las características de la arcilla descritas en el capítulo 6. Las dimensiones de este dependen del tipo de pasta que utilizara, ya que las partículas de la mezcla variarán de tamaño. El hormigón, por ejemplo, incluye grava, que será un problema si el diámetro de la boquilla es demasiado pequeño, por lo que es importante elegir uno que no cause bloqueo en la extrusión del fluido. Las extrusoras de pasta a base de jeringas suelen utilizar boquillas de gran diámetro y por ende grandes alturas de capa para fabricar objetos. Esto puede tener un impacto negativo en el nivel de detalle con el que se puede fabricar, así como en el acabado de la superficie.

5.3 Materiales pastosos

5.3.1 Tipos de pastas para impresión 3D

Las sustancias pastosas son aquellas que pueden ser moldeadas con facilidad, estos pueden ser de origen natural o sintético. Cada pasta tiene características propias pues pueden dividirse en elastómeras, termoplásticas y termoestables.

El uso de pastas en cada impresora depende de la aplicación que se le desee dar al producto final. La industria alimenticia ha sido capaz de revolucionarse en los últimos años gracias a los avances de la química de alimentos, ya que se le pueden aportar características reológicas específicas a las pastas creadas a base de elementos comestibles. Un ejemplo claro es la pasta de tomate, la cual ha sido estudiada y ensayada hasta encontrar una con propiedades que permitan una impresión de alta calidad. Otras pastas comestibles más comunes para pruebas de impresión son la mantequilla de maní, crema de avellanas (Nutella) y pastas de chocolate pues tienen una viscosidad bastante adecuada y estándar.

Impresoras de carácter industrial han sido desarrolladas para la construcción de viviendas y otras edificaciones. Las sustancias comunes que se encuentran en esta rama de la impresión 3D son mezclas de cemento (polvo a base de piedras, arcilla y arena) como lo son el concreto (fusión de cemento, agua grava) y el mortero (combinación de cemento, arena y agua). Actualmente se ha podido mejorar la calidad de las construcciones debido a que al concreto se le incorporan otros aditivos, ya sean naturales o químicamente desarrollados, para que la mezcla mejore en cuanto a sus propiedades cuando esta fresco o endurecido, su trabajabilidad, durabilidad y/o resistencia inicial y final. Sika, el grupo líder de empresas, proporciona desde softwares, maquinaria y material de extrusión para impresión 3D en el campo de la ingeniería civil y arquitectura. La compañía ha desarrollado su mezcla única llamada ViscoCrete, la cual es una formulación única de morteros, distintiva por el comportamiento que resulta por la adición de los aceleradores de fraguado. (Sika, 2020)

La arcilla no se queda atrás, la impresión 3D de con este material ha sido de especial interés para artistas y escultores pues han obtenido una técnica de modelado completamente nueva. Pueden plasmar sus ideas primero en un modelo digital y luego simplemente imprimirlo. Las impresoras diseñadas para este propósito pueden imprimir casi cualquier tipo de arcilla siempre y cuando la misma sea suave y libre de fibras. La marca de impresoras Cerambot ofrece a sus usuarios polvo de barro de arcilla estándar, el cual se muele a partir de barro blanco alto. La relación de calidad de arcilla y agua es de 100: 25 (± 3) respectivamente. (CERAMBOT, 2020)

5.3.2 Medición de plasticidad con el Método de Pfefferkorn para arcillas

La plasticidad es una propiedad esencial que determina cómo una masa cerámica se convierte en la forma deseada a través de la aplicación de presión. Existen diversos métodos para determinar la cantidad de agua en una masa de arcilla para que la misma pueda tener la capacidad de deformarse y moldearse. Paulo J.S. Cruz, Ulrich Knaack, Bruno Figueireido y Dennis de Witte exponen en su artículo científico llamado *Ceramic 3D printing – The future of brick architecture* (Impresión cerámica 3D- El futuro de la arquitectura de ladrillos) que ellos utilizan el método, ampliamente aceptado, de Pfefferkorn en su investigación para evaluar y controlar la plasticidad de la arcilla que usan para crear sus ladrillos tan peculiares. Este determina el agua necesaria para lograr una reducción del 30% en altura en relación con la altura inicial del cuerpo de prueba bajo la acción de una masa con peso estándar. (Ver Ilustración 3)

“La medición de la plasticidad según Pfefferkorn se basa en el principio de deformación por impacto. Una muestra definida con un diámetro de 33 mm y una altura inicial de 40 mm, producida manualmente o por extrusión, se deforma mediante una placa en caída libre con una masa de 1.192 kg. La altura inicial está relacionada con la altura de deformación por impacto, cuyo resultado es la relación de deformación. Como regla, esta medida se toma con cuerpos con contenido de humedad variable.” (Cruz, Knaack, Figueireido y Witte; 2017)

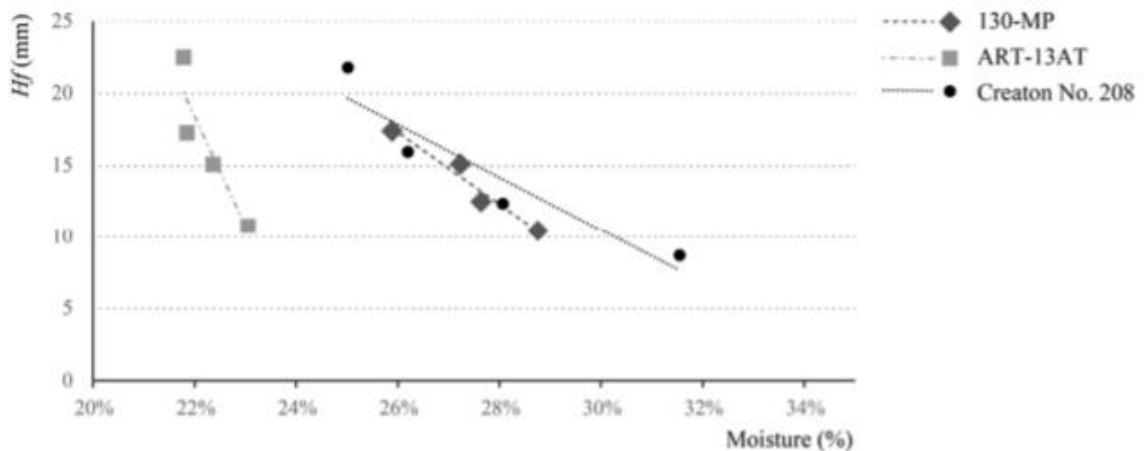
Ilustración 3: Medición de plasticidad con el método de Pfefferkorn



Los resultados expresados en sus graficas expresan la relación entre la reducción de la altura contra el contenido de humedad de la muestra. (Ver Ilustración 4) Entre más inclinada la curva, más bajo es el cuerpo, es decir, cuanto más reacciona la plasticidad a las variaciones del contenido de humedad. En las pruebas se compararon tres materiales cerámicos.

- Gres-130-MP, una pasta cerámica normalmente aplicada en procesos manuales y mecánicos, cuya plasticidad puede variar de un pedido a otro.
- Gres-Art13-AT, un gres en polvo para su transformación en cerámica, pasta normalmente utilizada para pegar piezas de cerámica.
- Creaton No. 208, un gres en polvo para transformación en pasta cerámica normalmente utilizada para trabajos manuales y mecánicos.

Ilustración 4: Relación entre la reducción de la altura contra el contenido de humedad de la muestra



Para realizar las pruebas primero se añadió agua a la arcilla en polvo para obtener una mezcla con un contenido de 20% de agua, este contenido fue incrementado a lo largo de la prueba y se crearon tres cilindros después de ello. La altura final fue medida después de emplear el método de Pfefferkorn. El peso también fue registrado antes y después de que las muestras se disecaran en un horno eléctrico para poder analizar el contenido de humedad. Las mismas realizaron hasta que la altura media de las muestras disminuyó al 70% de su altura inicial (12 mm (30%) disminución de los 40 mm iniciales).

Posteriormente se utilizaron las mezclas de arcilla cerámica para pruebas de impresión de objetos cilíndricos con la impresora Lutum para evaluar su calidad. Cada tipo de arcilla presento características con áreas de oportunidad. Las muestras iniciales de Gres-130-MP presentaban grietas a lo largo del recorrido de la extrusión, por lo que agregaron más agua para poder obtener una mejor trabajabilidad. Se demostró y concluyo que la cantidad correcta del contenido de humedad es de un 35%. Es importante recalcar que las pruebas dieron como resultado deformaciones entre 5 y 7 mm (12.5% y 17% respectivamente).

5.3.3 Calidad de impresión con respecto a la similitud del modelo digital, dimensiones y forma

En su artículo científico, los autores de *Ceramic 3D printing – The future of brick architecture*, exponen que, dado a las características físicas de los materiales cerámicos, como la fluidez y viscosidad y el encogimiento de la mezcla después del proceso de horneado, varias pruebas se han llevado a cabo para determinar las configuraciones óptimas para lograr superficies libres de grietas (con una mezcla homogénea y sin burbujas de aire) y que se asemejen lo más posible a los modelos digitales.

Análisis dimensional

Para realizar un análisis dimensional los investigadores recopilaron 12 muestras de elementos impresos con la impresora Lutum, todos hechos a la imagen del mismo modelo (un cilindro de 20mm de alto x 40 mm de diámetro). (Ver Ilustración 5) Luego estos eran caracterizados por las configuraciones únicas que controlaron su impresión (velocidad de desplazamiento de la boquilla del extrusor [mm/s], presión aplicada sobre el cartucho de arcilla y la altura de capa impresa). Los autores exponen que para futuras pruebas se podrían implementar otras variables como el diámetro de la boquilla del extrusor, la geometría de la barrena dentro de la extrusora y el flujo.

Una vez categorizando todas las muestras se procedió a comparar resultados. Se evaluaron las discrepancias entre lo digital e impreso, la influencia de estos parámetros en la altura, el ancho y el espesor de la pared y correlacionarlos con los valores asignados para la velocidad de impresión, la presión y la altura de la capa.

Ilustración 5: Set de 12 cilindros impresos con pasta Gres-130-MP



“En la Tabla 1 se muestran las medidas tomadas de las probetas que se imprimieron con la pasta Gres-130-MP, con un contenido de humedad del 34,1%. Se probaron velocidades de 20, 40 y 80 mm/s. La reducción en altura no es una falla durante el proceso de impresión sino la contracción típica que se produce durante la evaporación de la humedad de la cerámica. Durante las pruebas, un aumento en la velocidad resultó en una disminución de altura de los ejemplares.” (Cruz, Knaack, Figuereido y Witte; 2017) Algunas muestras demostraron tener un mayor porcentaje de encogimiento que otras en una dirección. En todas las pruebas coincidió que aumentar la velocidad esta correlacionado a una disminución en el ancho del objeto y el grosor de pared. La presión fue variada entre 3.5 y 4.0 Bar, conforme esta incrementaba las muestras tendían a tener alturas mayores, anchos mayores y paredes más gruesas; lo que indica que la barrena no tiene suficiente resistencia interna.

Tabla 1: Mediciones de los modelos impresos con la pasta Gres-130-MP, después del proceso de secado y horneado

Model ref.	Vel. (mm/s)	Press. (bar)	Layer (mm)	Height dried (mm)	Width dried (mm)	Thickness dried (mm)	Height fired (mm)	Width fired (mm)	Thickness fired (mm)
m1	20	3.5	1	18.76	38.57	4.68	16.47	36.04	4.13
m2	40	3.5	1	18.63	37.58	3.86	16.38	35.21	3.53
m3	80	3.5	1	18.44	36.94	3.72	16.35	34.80	3.30
m7	20	4.0	1	18.67	39.33	4.93	16.52	36.78	4.51
m8	40	4.0	1	18.54	39.29	4.86	16.45	36.72	4.47
m9	80	4.0	1	18.62	39.46	5.23	16.42	36.62	4.63
m4	20	3.5	2	18.71	36.61	3.59	16.52	34.18	3.12
m5	40	3.5	2	18.63	36.47	3.50	16.55	34.13	3.08
m6	80	3.5	2	18.62	36.31	3.47	16.52	33.92	3.31
m10	20	4.0	2	18.77	39.33	4.96	16.68	36.37	4.35
m11	40	4.0	2	18.80	38.87	4.81	16.77	36.08	4.32
m12	80	4.0	2	18.78	38.72	4.72	16.70	35.82	4.06

Se pudo observar que las impresiones con capas de 1 mm, en comparación a las de 2mm, resultaban en objetos ligeramente más pequeños. Por ende, los objetos impresos con menos capas se encogían menos, por lo que tenían una resolución menor dado al aumento del grosor de la capa, pero se asemejaban más al modelo real. Por el contrario, los objetos que contenían mayor cantidad de capas tenían la tendencia a que el ancho total del elemento y el espesor de pares disminuía, a pesar de ser mayor que el del modelo digital.

La tendencia de la cerámica es encogerse después del horneado (*faringe*), para verificar como esto afecta en la similitud al modelo digital lo más adecuado será una

medición volumétrica. El último parámetro a analizar fue difícil de concluir en un argumento que aplique para todos los escenarios ya que la altura de capa es directamente influenciada por la cantidad de material extruido. Durante las experimentaciones se notó que la arcilla estaba fluyendo a través del espacio entre el tornillo sinfín y las paredes del extrusor cuando se aumentaba la presión, por lo que es difícil. Esto complicaba sacar conclusiones sobre la influencia de la velocidad por sí sola.

Análisis formal

La segunda tanda de pruebas se realizó con el objetivo de evaluar la habilidad y restricciones de cada modelo impreso y que tan precisas eran las réplicas en cuanto a las dimensiones y formas del modelo. Se imprimieron modelos con perfiles rectos, semi-cuervos y cuervos. En cada una de las series siete modelos fueron hechos con inclinaciones que variaban con ángulos entre 20 y 55 grados. Los elementos se imprimieron con la arcilla 130-MP, con un contenido de humedad de 35% de agua, a una velocidad de 20 mm/s y una altura de capa de 1mm. En todas las iteraciones la altura real es menor a la del modelo digital debido a la característica de la arcilla de encogerse cuando se va secando.

Cabe recalcar que la diferencia de alturas entre el modelo digital y el tangible era más notoria en los diseños con perfiles más amplios, donde había áreas de impresión más grandes sin una continuidad vertical y por ende menos masa de soporte. El asentamiento de material también generó deformaciones en las capas de la base y superiores. En las primeras capas, el peso de las superiores generó que las capas de la base se aplastaran más, lo que resulta en perfiles más convexas que el del modelo digital. Para las pruebas con un perfil recto y los mixtos (cuervos con rectos), el efecto empieza a ser perceptible para ángulos con apertura de 40 grados y es muy notorio a partir de los 45 grados.

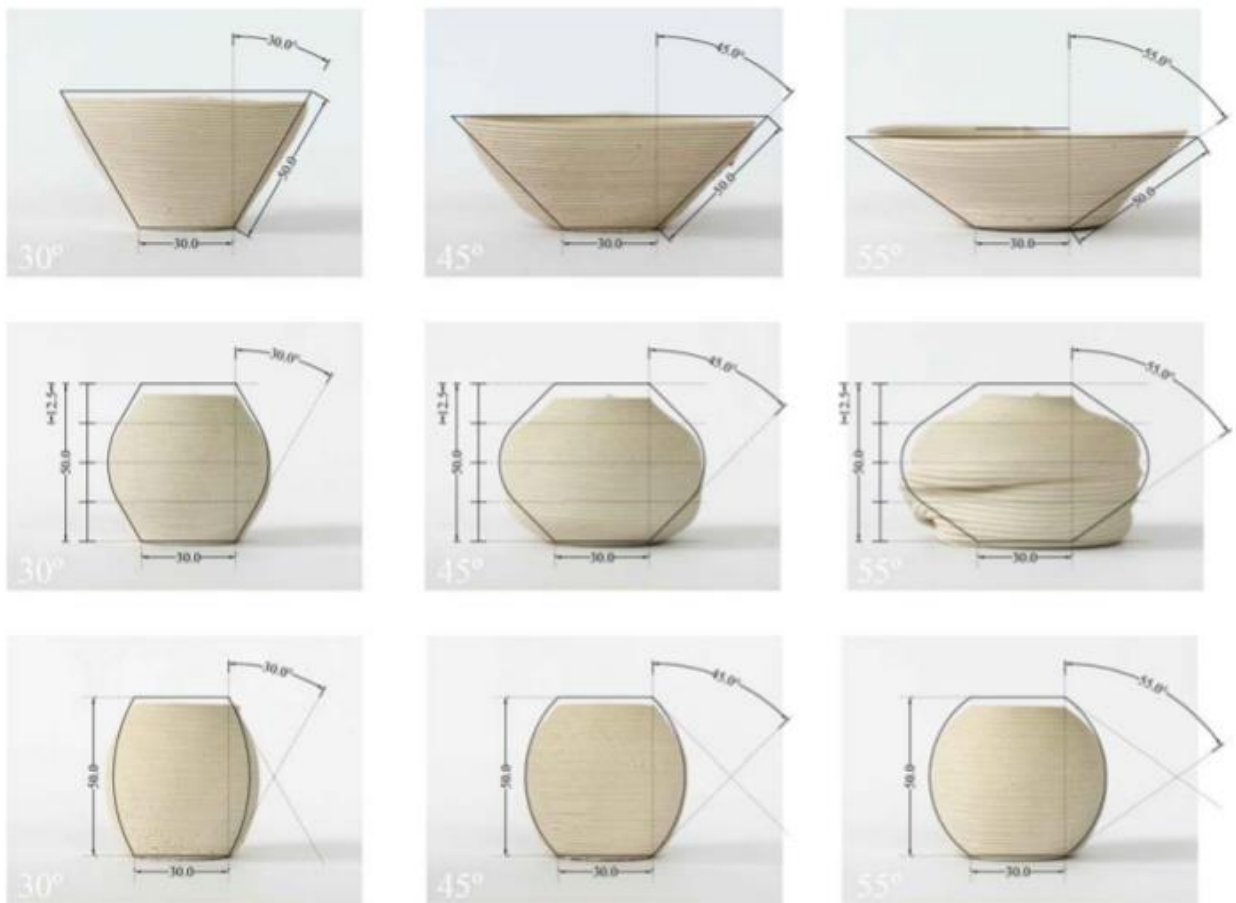
Ilustración 6: Set de elementos con diferentes perfiles a diferentes ángulos



Tabla 2: Mediciones de los modelos impresos con la pasta Gres-130-MP, después del proceso de secado y horneado, con perfiles distintos

Angle	Arched section		Semi curve section		Straight section	
	Height (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Width (mm)
20.0°	47.60	42.00	46.23	41.18	44.69	58.81
30.0°	47.77	45.60	46.92	47.93	39.92	71.64
40.0°	47.74	45.77	46.71	55.46	37.78	81.54
45.0°	47.47	48.61	46.02	58.72	33.61	85.46
50.0°	47.75	49.98	47.27	64.76	33.68	90.72
52.5°	47.59	51.62	47.40	67.39	32.15	93.16
55.0°	47.44	52.75	46.78	69.32	31.59	95.56

Ilustración 7: Sobreposición de los perfiles de los modelos digitales sobre el modelo impreso



5.3.4 Condiciones óptimas para trabajar con arcilla/cerámica en Guatemala

Marissa Mendizábal es una renombrada ceramista guatemalteca, fundadora y diseñadora de la marca Contorno Cerámica. En una entrevista realizada hacia su persona el 27 de julio de 2020, ella comenta algunos de los rasgos más relevantes al trabajar con arcilla en el contexto guatemalteco.

El fabricar objetos a base de mezclas de arcilla y otros minerales, que luego son horneados es conocido como cerámica. Según la ceramista hay arcillas de baja, media y

alta temperatura. Las últimas dos son aptas para uso alimenticio ya que son las que se pueden hornear a mayores temperaturas con el objetivo de alcanzar la vitrificación en las piezas. Mendizábal comentó que a pesar de que hay gente en la región que ya vende las mezclas de pasta de arcilla hecha, ella prefiere crear una fórmula única ya que en general la pasta guatemalteca es muy porosa, la cual no la hace apta para el horneado a altas temperaturas y por ende para los diseños de vajillas que ella trabaja. Sin embargo, cabe recalcar una excepción ya que los artesanos de Santa Catarina Palopó, un municipio en el departamento de Sololá en Guatemala, son de los únicos en el país que trabajan con arcilla de alta temperatura.

Mendizábal formula su pasta desde cero, combina diferentes tipos de arcilla y esencialmente consiste en una arcilla importada estadounidense llamada Volclay y de varios minerales guatemaltecos.

La viscosidad de la arcilla depende de la manera en que vas a trabajar con ella, ya que ella es una ceramista que utiliza el torno, su mezcla desde el inicio es tipo pasta. La arcilla que es más líquida es usualmente utilizada para moldes. La ventaja de la cerámica es que se puede reciclar siempre y cuando no haya sido horneada. Si está seca, para refrescarla y poderla volver a usar solo se sumerge en agua hasta que se vuelve pasta de nuevo. Si el caso es contrario, el objetivo es dejar que se seque se puede extender la pasta sobre una tela y dejarla al sol unas cuantas horas.

Ella comenta que el ambiente en donde está moldeando la mezcla debe tener buena ventilación y en el caso de que sea usada en una impresora, los envases o componentes donde la mezcla tenga contacto no deben estar a altas temperaturas para evitar que la mezcla se seque. Su recomendación especial es que la cama de impresión para una impresora sea de madera, con un grosor de 2 pulgadas aproximadamente y que este tratada para que cuando la misma este en contacto con la humedad no se empiece a abombar. La impresión 3D con cerámica le llama especialmente la atención pues considera que podría crear piezas aprovechando las finas capas extruidas que se pueden realizar con esta maquinaria, cosa que sería muy difícil de elaborar a mano.

5.3.5 Aplicaciones de la cerámica

La cerámica es una industria de las más viejas en el mundo, este arte surgió a partir de la necesidad de tener recipientes para guardar alimentos y agua. Cabe recalcar que en el año 24,000 A.C. ya se encontraban estatuillas de arcilla. Las mismas llevaban un proceso de cocción en hornos excavados en el suelo. (El Mercado Artesano, 2016)

Los materiales cerámicos son capaces de resistir al calor y ataque químico, sin embargo, son frágiles. Estos se rompen fácilmente por tensión o por impacto. Sus características físicas se deben a que los átomos que la forman están unidos por dos tipos de enlace, iónicos y covalentes, y además están dispuestos en grupos llamados celdillas unitarias que se repiten de manera periódica, constituyendo al final un material con una estructura cristalina.

Las nuevas cerámicas son productos desarrollados en las últimas décadas que no solo utilizan arcilla, sino que además son aleadas con otros materiales no metálicos. Esto ha permitido lograr que la cerámica moderna adquiera propiedades únicas y específicas para cada uso y que los costos de producción sean más económicos. Estos avances en la ciencia han permitido que las aplicaciones se diversifiquen en la industria. Cabe recalcar que a pesar de que estas aún son ampliamente usadas con técnicas tradicionales en los campos de la elaboración de artesanías u objetos de uso diario (piezas de una vajilla) y en la industria de la construcción, las mismas también han innovado con producciones en masa y desarrollo de piezas más personalizadas como lo hicieron los investigadores y autores del artículo *Ceramic 3D printing – The future of brick architecture*.

Las cerámicas modernas se pueden dividir en estructurales y funcionales. Las primeras, también llamadas termo cerámicas, se asemejan más a las cerámicas tradicionales por sus propiedades mecánicas y térmicas. Tienen alta resistencia a la corrosión bajo severas condiciones climáticas. Podemos encontrarlas en motores de vehículos, aviones o industriales. Son un material altamente atractivo para estas aplicaciones por aceptación a las altas temperaturas y su peso ligero. Las cerámicas de carburos, nitruros y óxido de magnesio se pueden encontrar en hornos industriales. En aplicaciones de aislantes térmicos se pueden encontrar las cerámicas basadas en óxido de potasio, titanio, aluminio y circonio; por ejemplo, las camisas de los reactores nucleares. (Bernal, 1992)

Las cerámicas funcionales son caracterizadas por tener propiedades magnéticas, ópticas, eléctricas, biológicas o químicas. En esta familia se han desarrollado materiales que cumplen funciones aislantes, dieléctricos, ferroeléctricos, piezoeléctricos, conductores y no conductores. (Bernal, 1992)

Las bio-cerámicas están teniendo un auge en la actualidad, un ejemplo claro de ellas es la porcelana dental. La misma se compone de mezclas de caolín, feldespato y cuarzo con fundentes tales como carbonatos alcalinos o ácido bórico. También se han desarrollado materiales con base en alúmina y apatitas para construcción de prótesis y huesos artificiales. (Bernal, 1992)

5.4 Softwares CAD/CAM y de análisis de elementos finitos

Cada día es más común que la industria de manufactura utilice dispositivos de hardware asistidos por computadora, como las máquinas y herramientas CNC (Controladas numéricamente por computadora) e impresoras 3D. Este tipo de tecnología involucra paquetes de software para modelado de sólidos CAD (Diseño asistido por computadora, por sus siglas en inglés) y softwares CAM (Manufactura asistida por computadora, por sus siglas en inglés). Este tipo de programas ha tenido tal alcance que está presente en casi todas las etapas de un proyecto, entre las cuales se puede mencionar: conceptualización, diseño, manufactura, ensamble, distribución, uso y mantenimiento.

5.4.1 Softwares CAD

Según Autodesk, empresa líder y pionera en el desarrollo de softwares de ingeniería, CAD o el diseño asistido por computadora es una tecnología para el diseño y la

documentación técnica, que reemplaza los esbozos y planimetría manuales con procesos automatizados. Se tienen versiones de esta herramienta para crear modelos en 2 dimensiones y 3 dimensiones. Los mismos son útiles para explorar ideas teniendo una visualización más concreta del producto final. Hoy en día ya se pueden crear modelos con acabados fotorrealistas y realizar simulaciones de funcionamiento. (Autodesk, 2020)

5.4.2 Softwares CAM

Los softwares CAM son el puente de enlace entre la tecnología CAD y el lenguaje de programación que utilizan maquinaria CNC. Este tipo de programas utiliza modelos y ensamblajes de los objetos digitales en 2 o 3 dimensiones para generar los recorridos que las herramientas deben seguir cuando están en funcionamiento, y así convertir los planos virtuales en partes físicas. (ferrosplanes, 2017) Utilizar esta tecnología tiene grandes ventajas como:

- Intervención mínima del operario
- Mayor precisión en la pieza acabada
- Menor desperdicio de material
- Mayor automatización

5.4.3 Softwares de análisis de elementos finitos

Según Autodesk, el análisis de elementos finitos “es un método computarizado para predecir cómo reaccionará un producto ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. La simulación de elementos finitos permite comprobar si un producto se romperá, desgastará o funcionará como se espera. Se denomina análisis, pero en el proceso de desarrollo de productos, se utiliza para predecir qué ocurrirá cuando se utilice un producto.”

“El análisis de elementos finitos descompone un objeto real en un gran número (entre miles y cientos de miles) de elementos finitos, como pequeños cubos. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. Luego, una computadora suma todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto.”

Relacionado al campo de la impresión 3D este tipo de softwares puede ser útil tanto en el desarrollo de una impresora para evaluar los esfuerzos mecánicos a los que estará sometida, las vibraciones que podría tener en operación para poder reducirlas lo más posible y que este fenómeno no afecte el acabado de nuestras piezas, analizar la transferencia de calor entre los componentes de la impresora y evaluar el comportamiento de los fluidos al ser extruidos. De manera similar se puede realizar una evaluación a los modelos que se deseen imprimir si se sabe la aplicación de estos, pues se necesitan saber bajo que variables estarían afectados y así analizar su comportamiento en aplicaciones en la vida real.

6. Resultados

6.1 Entrevistas

Se tuvo la oportunidad de entrevistar a expertos en la materia en sus respectivos campos, de ellas se obtuvo información relevante que fue vital para el diseño de la extrusora. Se entrevistó al equipo de CI+D de Cementos Progreso en repetidas ocasiones en las instalaciones de su laboratorio de investigación, la cual está ubicada dentro de la planta de producción de La Pedrera en la zona 6 de la Ciudad de Guatemala. Actualmente ellos usan una impresora Ultimaker 3 y un accesorio para imprimir pastas llamado Discov3ry. El CI+D inicio operaciones en el año 1992, este departamento se dedica a la investigación de soluciones acorde a las necesidades del campo de la construcción y a la innovación tecnológica en productos y servicios de la más alta calidad que esta industria necesita. ellos opinan que la prioridad para lograr que sea factible imprimir pastas en una impresora 3D es tener una máquina capaz de ello y diseñada con ese objetivo principalmente, pues las impresoras 3D para imprimir plásticos modificadas no siempre resultaban muy bien. Pues las boquillas y la manguera quedan obstruidas cuando la pasta se seca por ser de un diámetro muy reducido. A la fecha han logrado fabricar piezas de cemento como portavasos, candelabros, floreros y otras indumentarias pues su enfoque es abarcar un nuevo tipo de consumidores. Están tratando de entrar en el mundo del diseño e ir más allá del paradigma que se tiene acerca de que el concreto sirve para la construcción únicamente.

Andrés Hermes es socio fundador de MBAU3D. Esta es una empresa Open Source dedicada a traer el mundo de las impresoras 3D a Guatemala y Latinoamérica, pionera en la región, desde el año 2012. Brindan servicios de ingeniería como mantenimiento y reparación, soluciones de diseño y fabricación de piezas impresas 3D en plástico y venden impresoras y material de extrusión (ABS y PLA) también. Andrés fue entrevistado en su taller de trabajo, llamado TecLab, el primer makerspace en Guatemala y Centroamérica. “El concepto de TecLab busca crear espacios con áreas específicas de fabricación que permitan a personas y empresas poder inventar y fabricar cualquier cosa que tengan en mente, desde dispositivos electrónicos, maquetas, hasta prototipos de ingeniería y/o prototipos comerciales” (Campus Tecnológico Guatemala, 2020). Él explicó la funcionalidad y los mecanismos involucrados en sus impresoras. El método para registrar la información recabada fue la toma de notas durante la conversación. Él brindó un listado de piezas, también conocido como Bill of Materials, de una de sus impresoras. (Ver Apéndice, Anexo B) Al ser un experto y distribuidor local, hace que las piezas y materiales para impresión 3D sean relativamente fáciles de conseguir.

Marissa Mendizábal, renombrada ceramista guatemalteca con estudios regionales y en el extranjero como México, fue entrevistada vía Zoom debido a las disposiciones gubernamentales por el Covid-19. Su marca, llamada Contorno Cerámica, tiene una línea de diseño moderna y orgánica de piezas realizadas a mano y en torno. Ella dio una perspectiva de cómo es trabajar con cerámica en Guatemala, incluidas las técnicas de manufactura actuales y limitaciones en el país.

Ilustración 8: Piezas de Contorno Cerámica por Marissa Mendizábal



Entre lo más importante que nos compartió se destaca que la arcilla guatemalteca es muy porosa y por ende no es adecuada para hornearse a altas temperaturas, lo cual es ideal cuando se van a realizar piezas que están destinadas para contacto con alimentos. Es por ello por lo que ella mezcla arcilla guatemalteca y estadounidense, junto con otros minerales, para brindar un producto seguro y de buena calidad. Es importante recalcar que ella menciona que hay una excepción en el país, pues la cerámica de Santiago Palopó en el departamento de Atitlán sí es apta para los estándares de alta temperatura.

Ilustración 9: Cerámica de Santiago Palopó



Dado que el formato de la entrevista fue de carácter estructurada, las respuestas a las preguntas planteadas pueden ser encontradas en el Apéndice de este trabajo.

6.2 Diseño de la impresora

6.2.1 Matriz de decisión

Utilizando una matriz de decisión se seleccionó la de tipo Cartesiana como la mejor para este prototipo de impresora 3D cerámica. La primera columna de izquierda a derecha lista los 10 conceptos que se usaron para evaluar las opciones (Costo, precisión de la máquina, dificultad de calibración, disponibilidad de componentes en el mercado, velocidad de impresión, peso de la impresora, cantidad de partes, problemas de vibraciones, altura de impresión máxima y área de impresión máxima). La segunda columna define los criterios, donde veremos los parámetros que se usaron para puntuar cada concepto. El peso de cada concepto es sumamente importante pues es lo que nos permite visibilizar de manera cuantitativa la relevancia de cada factor a tomar en cuenta. Encabezan la lista el costo y la dificultad de la calibración. Por último, vemos las opciones de impresora que tenemos, en este escenario contábamos con 5 tipos diferentes. Las mismas fueron enumeradas para cada concepto del 1 al 5, siendo 5 siempre la mejor opción. (Ver Tabla 3)

Tabla 3: Matriz de decisión para el diseño de la impresora

MATRIZ DE DECISIÓN							
Tarea	Elección del tipo de impresora		Valoración de opciones				
Concepto	Criterio (Ponderación de 1 a 5, siendo 5 la mejor opción)	Peso	Cartesiana	CoreXY	Delta	Polar	Scara
Costo	5 la más económica y 1 la más cara	0.3	5	4	2	3	1
Precisión de la máquina	5 muy precisa y 1 muy poco precisa	0.06	3	4	5	1	2
Dificultad de calibración	5 muy fácil de calibrar y 1 muy difícil de calibrar	0.24	5	4	2	3	1
Disponibilidad de componentes en el mercado	5 gran disponibilidad y 1 poca disponibilidad	0.08	5	4	3	2	1
Velocidades de impresión	5 alta velocidad y 1 baja velocidad	0.05	1	2	4	3	5
Peso de la impresora	5 muy liviana y 1 muy pesada	0.02	1	2	4	5	3
Cantidad de partes	5 pocas partes y 1 muchas partes	0.05	2	4	3	5	1
Problemas de vibraciones	5 muy pocas vibraciones y 1 muchas vibraciones	0.1	5	4	2	3	1
Altura de impresión máxima	5 Muy alta y 1 muy baja	0.05	3	4	5	2	1
Área de impresión máxima	5 muy espaciosa y 1 muy poco espaciosa	0.05	5	4	1	3	2
Totales		1	4.352	3.864	2.56	2.9	1.36

La valoración total de cada opción no es más que la suma de los productos de cada valoración por su peso. Como podemos observar en la matriz de decisión el tipo de impresora que lidera por sus resultados es la Cartesiana, seguida por la CoreXY, Polar, Delta y Scara en último lugar.

6.3 Diseño del extrusor

El extrusor se fabricó modificando un cilindro neumático, de manera que a este se le pueda introducir una mezcla de arcilla. Se colocó un tornillo sin fin acoplado a un motor stepper y al pistón para desplazar la mezcla de forma controlada.

El extrusor está ubicado a un costado de la base de la impresora (Ver Ilustración 11) para permitir un movimiento más libre y ligero del cabezal. Conforme el motor stepper va avanzando el recorrido del pistón, la pasta es a su vez empujada por una manguera que tiene su salida en una boquilla que va posicionada en el cabezal de la impresora. El mismo corre transversalmente en el eje X. Para realizar pruebas se utilizó una boquilla inicialmente diseñada para aplicaciones neumáticas, no hubo complicaciones ya que la consistencia de la arcilla que se utilizó para las pruebas tenía la consistencia adecuada y sus granos suficientemente pequeños para poder ser extruidos por esa salida.

Ilustración 10: Vista frontal del extrusor

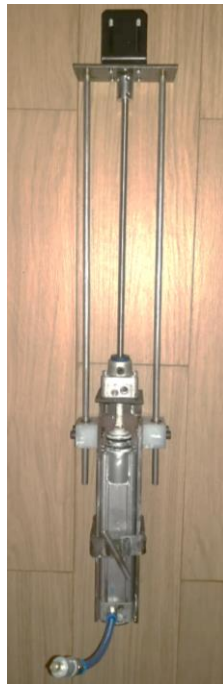
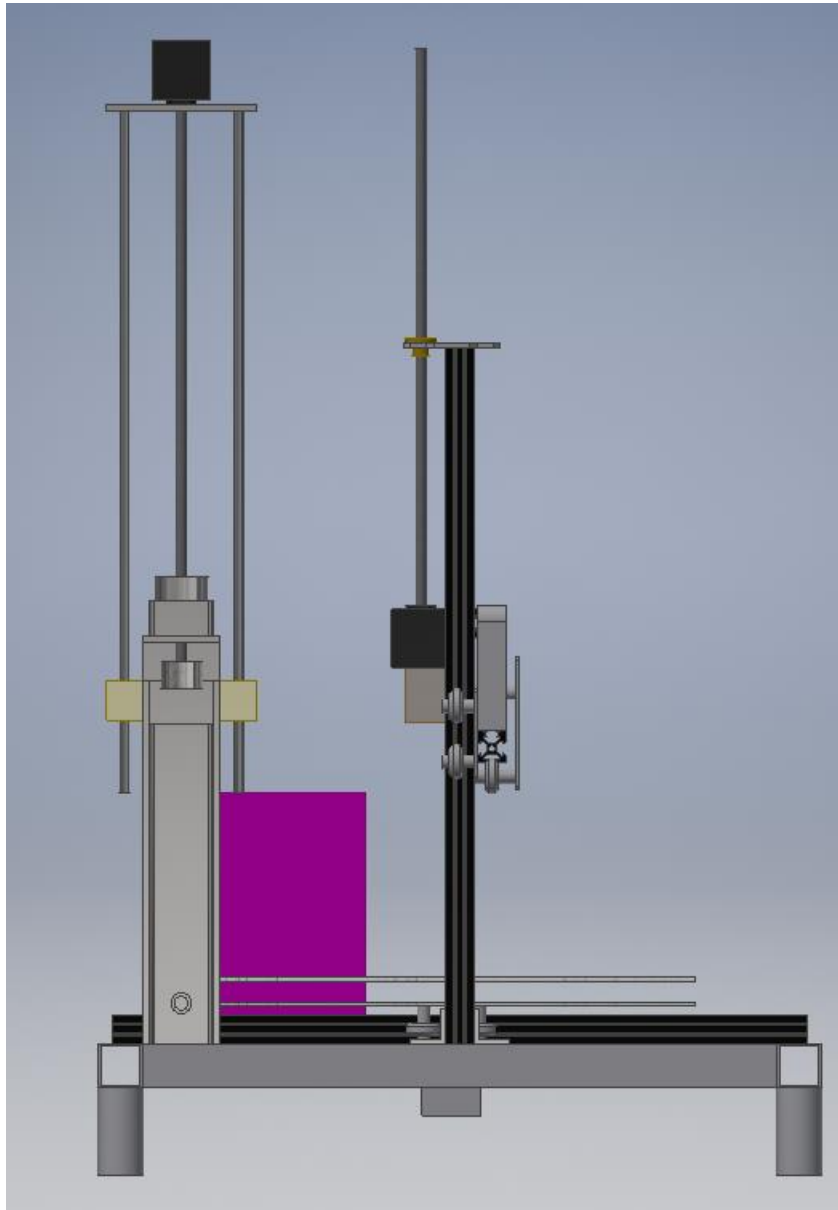


Ilustración 11: Posición del extrusor en la impresora, vista lateral



Se fabricaron diferentes boquillas intercambiables que pueden ser acopladas en la salida de la manguera (Ver Ilustración 12 y 13), que lleva la pasta desde el extrusor hacia el cabezal. Estas se diferencian por el diámetro del agujero de salida, el cual afecta el grosor de línea de la impresión y la altura de capa. Los diámetros utilizados para la salida son de 1/16", 1/8" y 5/32".

Ilustración 12: Vista frontal boquillas



Ilustración 13: Vista lateral boquillas



Dado que el código del firmware y el software fue diseñado originalmente para una impresora con un extrusor de filamento de plástico, las boquillas son de diámetros distintos y la cantidad de material que aportan respecto a las revoluciones del motor de su extrusor también cambian. En la configuración del extrusor de plástico el volumen extruido por revolución está definido por las revoluciones del engrane que jala el filamento y el diámetro del filamento. En el caso del extrusor de pastas, este está definido por la sección del volumen del cilindro que es empujada cuando el tornillo sin fin completa una revolución. Cabe recalcar que el paso del tornillo es de 2mm, por lo que cuando esté completa una revolución el embolo descenderá esta misma medida. A continuación, se muestra una tabla con los cálculos correspondientes (Ver Tabla 4).

Tabla 4: Cuadro de cálculos

Variable	Fórmula	Valor	Dimensional
Extrusor de plástico			
Radio del engrane de un extrusor de plástico	$r_1 =$	5.000	mm
Diámetro del filamento de plástico	$d_1 =$	1.750	mm
Circunferencia del engrane	$2\pi r_1 =$	31.416	mm
Avance por revolución del engrane	$\frac{2\pi r_1}{rev} = z$	31.416	mm/rev
Volumen extruido por un extrusor común	$\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 z\pi = b_1$	75.564	mm ³ /rev
Extrusor de pastas			
Paso del tornillo	$d =$	2.000	mm/rev
Altura del cilindro	$L =$	120.000	mm ²
Diámetro del cilindro	$d_2 =$	32.000	mm
Volumen del cilindro	$\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 L\pi = V$	96509.726	mm ³
Volumen desplazado por revolución	$\frac{dV}{L} = b_2$	1608.495	mm ³ /rev
Multiplicador de extrusión	$\frac{b_1}{b_2} = f_e$	4.698	%

El multiplicador de extrusión fue útil para realizar las configuraciones del software, en la sección 9.2 de este documento se brinda más información.

6.4 Ensamble de la impresora

6.4.1 Listado de piezas y costos

La siguiente tabla (Ver Tabla 5) define todos los componentes necesarios para construir la impresora y detalla sus costos. Cabe recalcar que en ella no se consideran otros costos asociados con el desarrollo del prototipo; como los costos de envío, mano de obra, entre electricidad, mezcla para pruebas, internet para descarga de softwares, etc. Todos los ítems se pueden conseguir localmente, únicamente los kits descritos en el número de ítem 4 y 17 se importaron desde Estados Unidos, debido que comprarlo en tiendas de la región era más caro. El costo de importación, también conocido como *shipping*, ya está incluido dentro del precio descrito en la tabla. Los ítems 12, 13 y 16 fueron reutilizados de un taller de metalmecánica, por lo que su precio es únicamente de referencia

Tabla 5: Listado de piezas y costos

Listado de piezas y costos				
No. Item	Item	Cantidad	Precio	Total
Componentes electrónicos				
1	Fuente de Alimentación ATX	1	Q98.00	Q98.00
2	Cable para fuente de alimentación ATX	1	Q25.00	Q25.00
3	[MT-17HS8401B] MT-17HS8401B motor stepper bipolar 4 líneas eje 48mm nema 17 17HS8401B	4	Q122.00	Q488.00
4	Eiechip CNC 3D Printer Kit for Arduino Mega 2560 R3 + RAMPS 1.4 Controller + LCD 2004 + 6X Limit Switch Endstop + 5 A4988 Stepper Driver 3D Printer Interface & Driver Modules	1	Q449.00	Q449.00
Estructura y elementos mecánicos				
5	Perfil 2040 V-slot 1m de largo	1	Q140.00	Q140.00
6	Tornillo sin fin d=8mm paso=2mm L=40cm con tuerca	2	Q72.00	Q144.00
7	Placa deslizante 4 rodamientos perfiles V-slot	2	Q85.00	Q170.00
8	Perfil 2020 V-slot 1m de largo	4	Q75.00	Q300.00
9	Tornillos, tuercas y arandelas varias	1	Q100.00	Q100.00
10	Barra de aliminio redonda 5/16" 2m de largo	1	Q63.00	Q63.00
11	[HM-466] HM-466 soporte para motor NEMA 17 montaje en L	3	Q14.00	Q42.00
12	Plancha de aluminio 1m2 reciclada	1	Q515.00	Q515.00
13	Tubo cuadrado de aluminio de 1 1/4" 1 m de largo	2	Q200.00	Q400.00
14	Angulares para tornillos	4	Q3.00	Q12.00
15	Cilindro Neumatico reciclado	1	Q100.00	Q100.00
16	[PL-714D] PL-714D polea dentada 20d diametro ext=18mm diametro int=5mm espacio banda 6mm	2	Q25.00	Q50.00
17	1 KINGPRINT 3D Printer Kit for Reprap Prusa I3 20T Timing Pulley + 2 Meter GT2 Timing Belt + LM8UU Linear Bearing + 608ZZ Bearing + 624ZZ Bearing + Motor Shaft Coupler (Cat: 1825 Industrial - equipo transporte materiales Cod: 4771311)	1	Q209.00	Q209.00
Total				Q3,305.00

6.4.2 Ensamblaje

Se realizó primero un ensamblaje en Autodesk Inventor que serviría de partida para visualizar el modelo y la planimetría de los componentes que requerían de fabricación. (Ver Ilustración 14) Luego se ensambló la estructura y se cablearon los componentes electromecánicos hacia los motores stepper y el extrusor. Se cargó el Código en el Arduino y se utilizó un cable USB que traslada la información del software, Repetier Host, para hacer pruebas con la impresora. Se fabricó una caja para resguardar los componentes electrónicos de forma.

Ilustración 14: Vista isométrica de la impresora

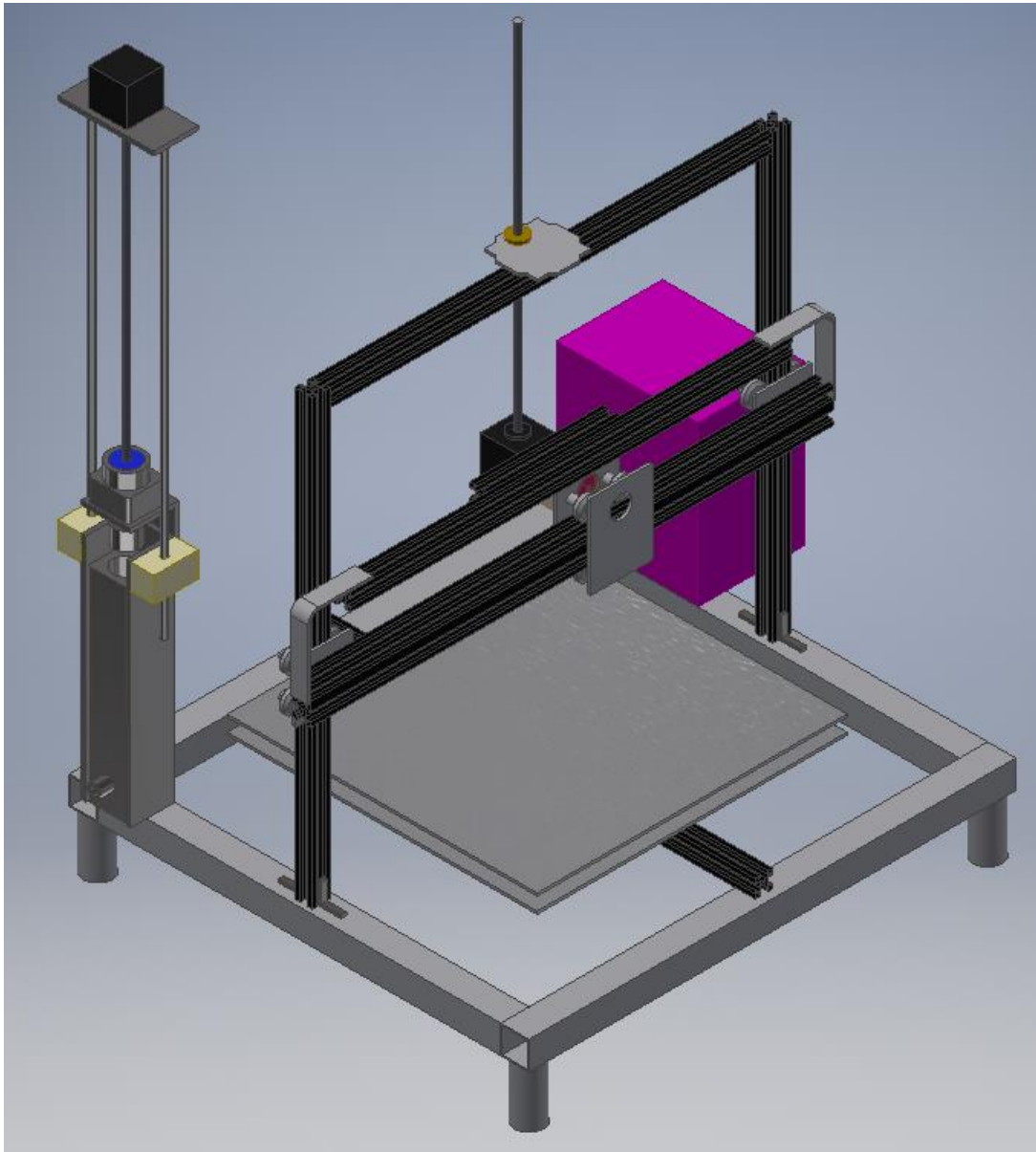
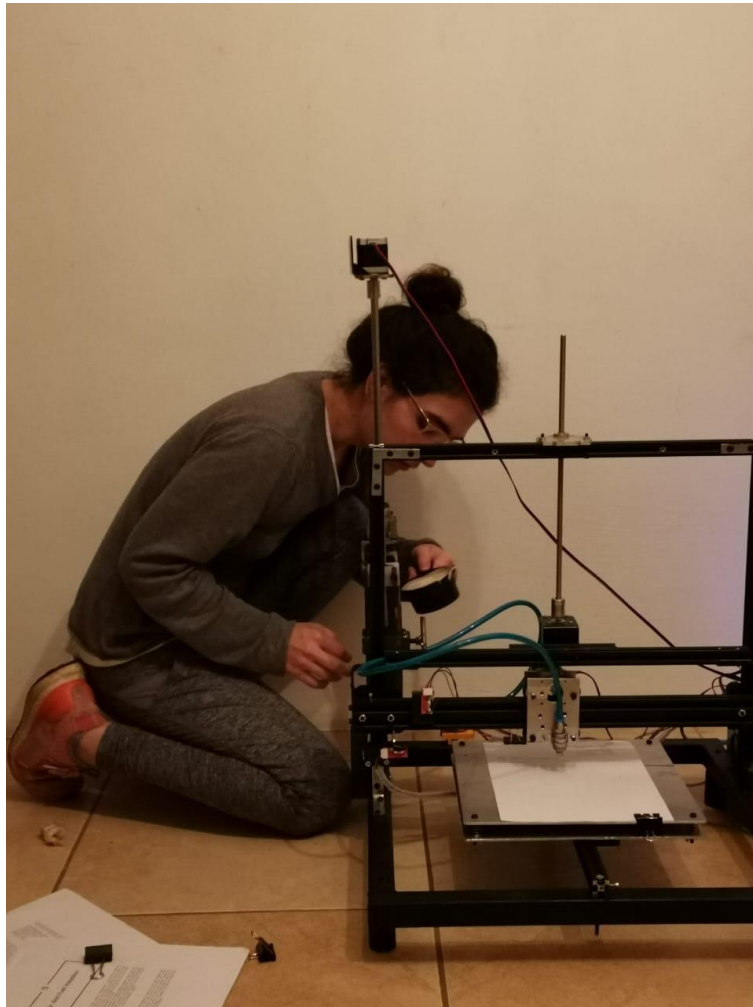


Ilustración 15: Proceso de ensamblaje



6.5 Software, Hardware y Firmware

6.5.1 Configuración del firmware

Se utilizó código Marlin, debido a su facilidad de manejo y configuración. Se modificaron el tamaño en X y Y de la cama de la impresora y la altura máxima en Z. Estas tres variables tenían un valor de 300 mm x 300 mm. (Ver Ilustración 16) La porción del código referente al control de dispositivos térmicos se omitió y deshabilitó, comúnmente controlan termistores para el calentamiento del extrusor y la mesa de impresión. Sin embargo, para la impresión de pastas cerámicas no se requiere elevación de temperatura.

Ilustración 16: Segmento del código modificado

```
// Direction of endstops when homing; 1=MAX, -1=MIN
// :[-1,1]
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR -1

// @section machine

// The size of the print bed
#define X_BED_SIZE 300
#define Y_BED_SIZE 300

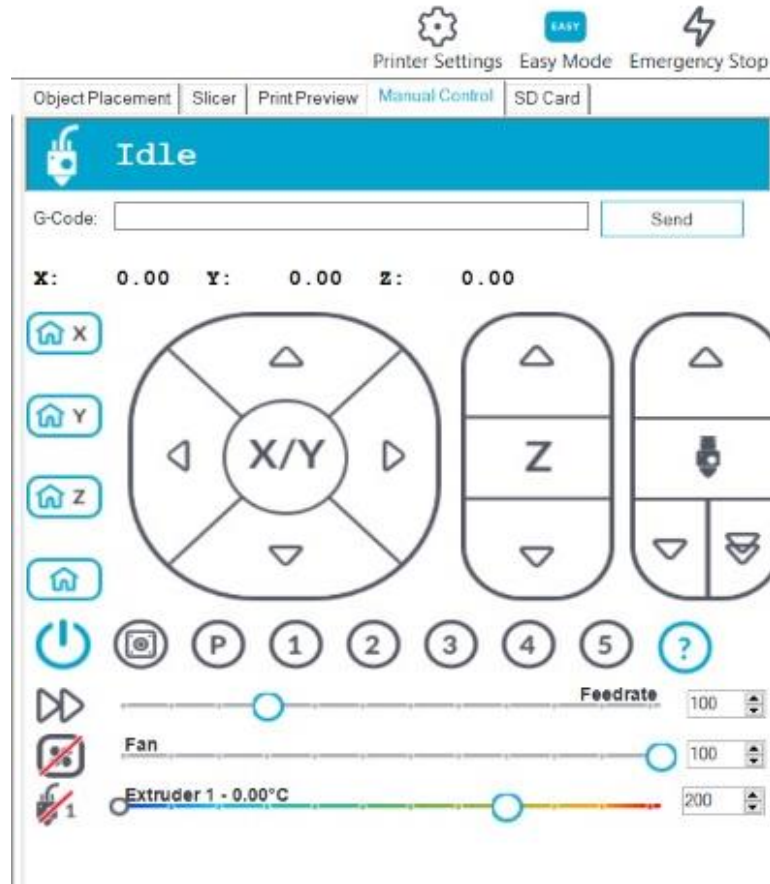
// Travel limits (mm) after homing, corresponding to endstop positions.
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MIN_POS 0
#define X_MAX_POS X_BED_SIZE
#define Y_MAX_POS Y_BED_SIZE
#define Z_MAX_POS 300
```

Se comentaron todas las secciones del código que hablaban sobre controles de temperatura para evitar que las funciones fueran llevadas a cabo.

6.5.2 Configuración del software

El software funciona relativamente bien con las configuraciones predeterminadas, para comprobar si los motores responden a las indicaciones de este se puede utilizar el control manual de Repetier-Host. Dado que no hay ventilador, cama caliente o termistor conectados, los mismos aparecen con un icono tachado. Se puede observar que el “Easy Mode” está activado inicialmente (Ver Ilustración 17).

Ilustración 17: Control manual con Easy Mode activado



Al deshabilitar el “Easy Mode” se tuvo acceso a otros parámetros para configurar. Según Repetier-Host el Flowrate y Feedrate se definen de la siguiente manera:

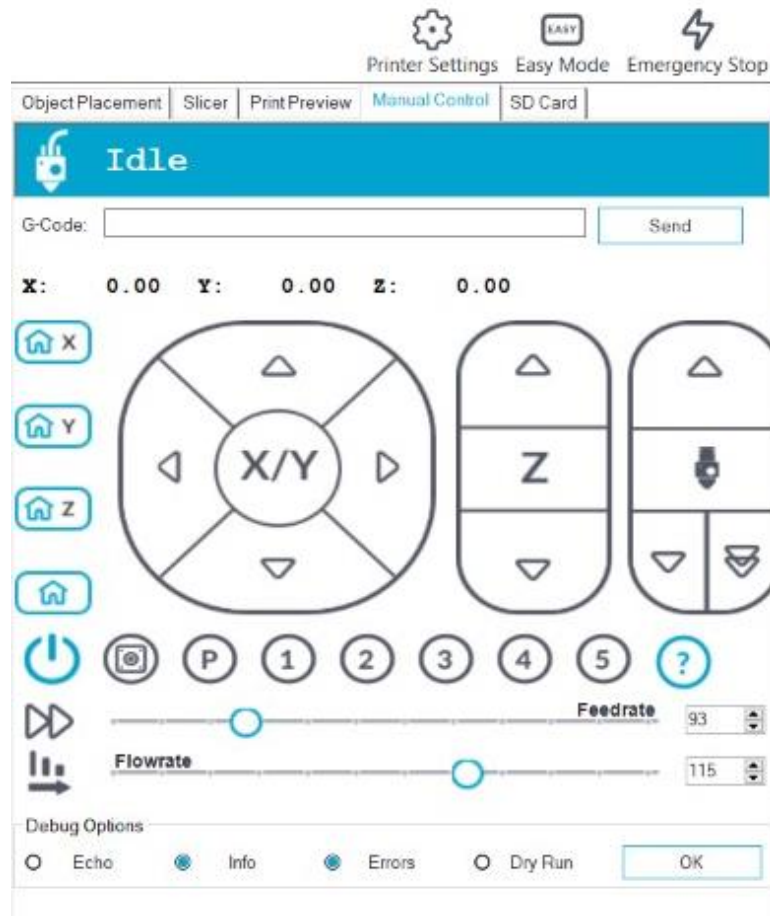
- Flowrate: Parámetro que permite cambiar la velocidad de impresión/movimiento en relación con la velocidad de alimentación de envío. Esta función se prueba con Repetier-Firmware y Marlin.
- Feedrate: Parámetro que permite controlar la cantidad de filamento extruido. Un valor más alto da una altura de capa más gruesa.

Es aquí cuando se emplea el multiplicador de extrusión (de 4.698%, según tabla 4), ya que el Flowrate inicial (F_i) se debe multiplicar por $(1+f_e)$ para encontrar el punto óptimo de Flowrate de operación (F) y que la configuración normal de un extrusor de plástico se adecue a las necesidades del extrusor de pastas. Por ende, F es igual a 104.69%. (Ver Ilustración 18).

Ecuación 1

$$F = F e_i * (1 + f_e)$$

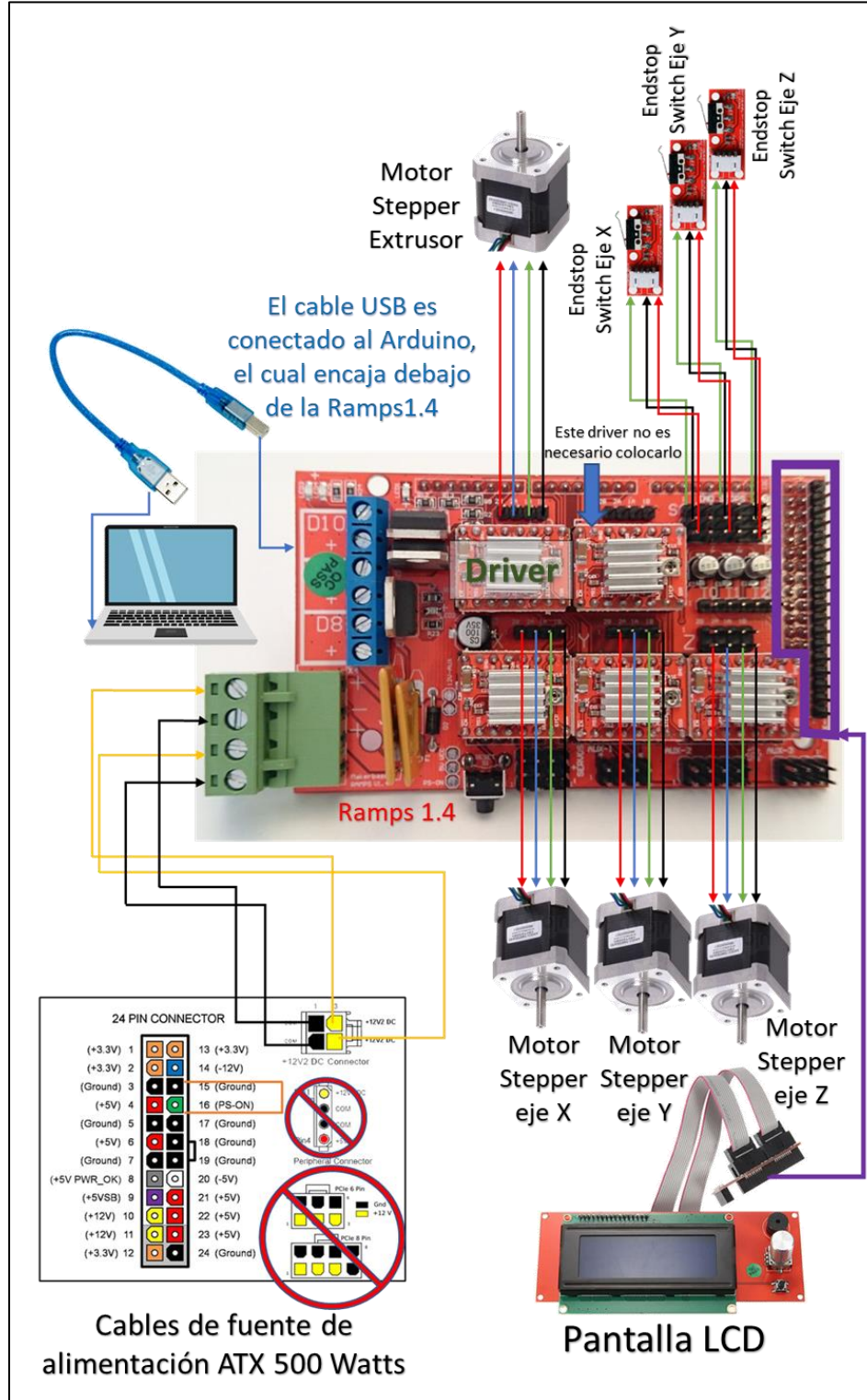
Ilustración 18: Control manual con Easy Mode desactivado



Se intentó también deshabilitar las restricciones de temperatura en Repetier Host en las configuraciones de impresión y empleando el comando M302 P1, seguido por M500. Sin embargo, a pesar de los intentos mencionados tanto en el firmware como el software, el controlador permaneció incapaz de controlar el extrusor de pastas.

6.5.3 Configuración del hardware

Ilustración 19: Diagrama eléctrico



El hardware se conectó de la manera en que se presenta en la Ilustración del Diagrama eléctrico (Ver Ilustración 19). Los cables que están tachados en el segmento de los cables de la fuente de alimentación fueron cortados y sellados con cinta de aislar. Del conector de 24 pines solo fueron de utilidad los cables del pin 15 y 16. Estos fueron conectados entre sí, el resto tuvo de cables de los demás pines tuvieron el mismo tratamiento que los cables tachados.

6.6 Pruebas de impresión

6.6.1 Pruebas de desplazamiento

Para comprobar que no hubiera dificultades u obstáculos en el movimiento de los ejes y que todos corrieran de manera continua se movió el cabezal en los ejes X, Y y Z, controlándolos de forma manual desde Repetier Host. Primero se realizaron pruebas con desplazamientos pequeños en intervalos pequeños de 1 mm y luego se fue incrementando los intervalos hasta llegar a 50 mm. (Ver Ilustración 20 y 21) También se verificó que los interruptores Endstop funcionaran de manera adecuada, accionándolos intencionalmente.

Una vez los interruptores Endstop entraban en contacto con el cabezal o la base de la cama de impresión el software se detenía y por ende deja de mandar señales a la impresora para que continúe con sus movimientos. Esto se utiliza como mecanismo de seguridad para parada de emergencia, la cual es sumamente importante pues si el mismo no hubiera funcionará se corre el riesgo de causar un fallo en la estructura de la impresora, ya sea dañando uno de los rieles, cama de impresión o quemando algún motor stepper porque el mismo se forzaría al seguir funcionando, pero no poder avanzar.

Ilustración 20: Desplazamiento posiciones mínimas

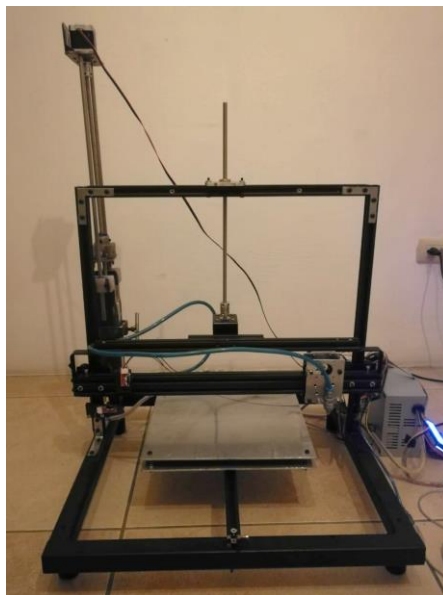
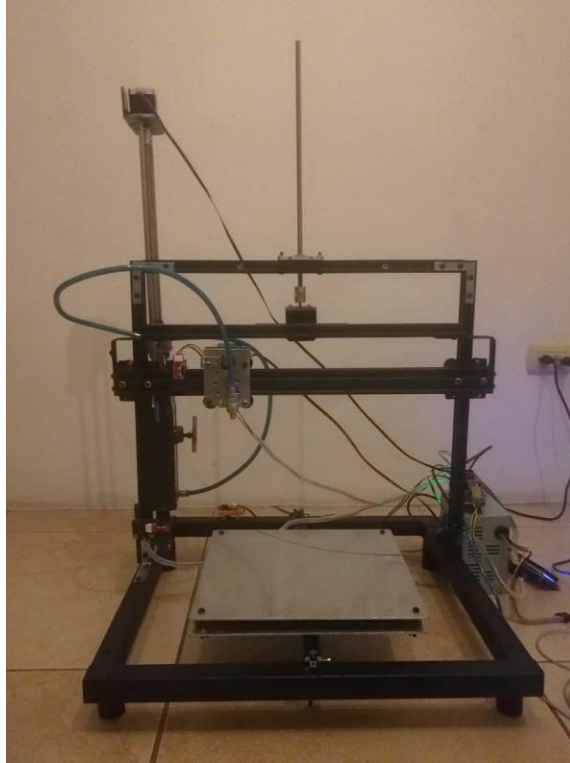


Ilustración 21: Desplazamiento posiciones máximas



6.6.2 Preparación de la mezcla de cerámica

La mezcla cerámica era inicialmente una masa capaz de ser moldeada, ideal para realizar esculturas. Se fabricó un agitador con una varilla capaz de ser acoplada a un barreno. (Ver Ilustración 22) La masa se mezcló con agua en un recipiente con el agitador hasta crear una mezcla homogénea y más líquida. Esta se colocó por último dentro del extrusor a través de unos embudos de papel (Ver Ilustración 23).

Ilustración 22: Masa en estado inicial y agitador

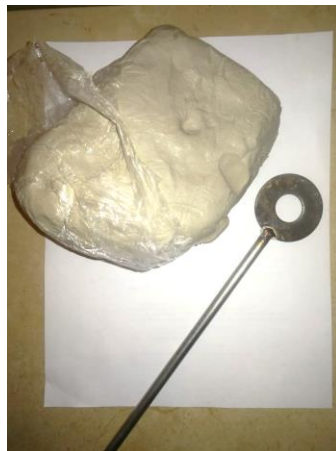
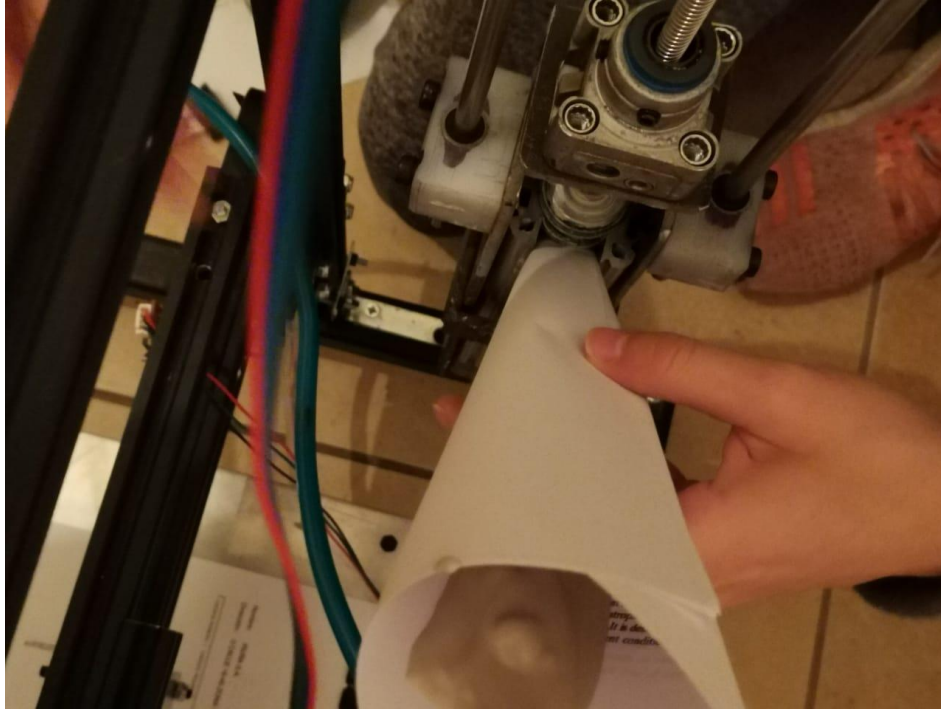


Ilustración 23: Carga del extrusor con la pasta



6.6.3 Pruebas con el extrusor

El extrusor no se logró controlar a través del controlador en la tarjeta que está destinada para el extrusor 1, por lo que se procedió a descartar varias opciones que podrían estar impidiendo su funcionamiento.

Lo primero que se descartó fue que el motor stepper tuviera alguna falla. Para comprobarlo se conectó el controlador del eje z (que también funciona con un tornillo sin fin) al motor y el mismo operó sin problema. Después se procedió a descartar la posibilidad de que los cables estuvieran dañados, que los mismos no fueran capaces de mantener la continuidad de la corriente. Para ello se realizó una inspección visual y se pudo ver que estos no presentaban ningún tipo de corte o doblez. Luego se intercambiaron los cables destinados para el extrusor, con otro conjunto de controlador y motor y los resultados fueron satisfactorios, los cables fueron capaces de trasladar las señales de control desde el driver a las acciones del motor.

Se intentó entonces, controlar el extrusor a través de la posición del extrusor 2 en la tarjeta RAMPS 1.4 para evaluar si el problema estaba en el controlador como tal; pero la misma no dio un resultado satisfactorio. Por ende, para verificar si el extrusor era funcional se tuvo que optar por conectar el controlador del eje Z (ya que este sistema también funciona con un tornillo sin fin) al motor stepper del extrusor.

El émbolo presentó problemas inicialmente al ingresar al cilindro neumático. Al momento de ingresar en él, los alrededores del agujero del cilindro (por donde se ingresa la pasta y se introduce el émbolo) topaba con la parte inferior del émbolo; por lo que necesitaba que se le ingresara manualmente para iniciar su descenso en el interior del cilindro. En este momento el tornillo sin fin comenzó a correr sin problema, hasta llegar a un punto en que no avanzó más. Cabe a mencionar que, entre el émbolo y las paredes del interior del cilindro, se pudo notar que no existía hermeticidad. Lo que provocó que se rebalsara el fluido una vez el émbolo hubiese ingresado. (Ver Ilustración 25) Debido a lo anteriormente expuesto, el motor se estaba forzando, el tornillo sin fin dejó de girar y la pasta se dejó de extruir.

Ilustración 24: Émbolo después de rellenarse



Ilustración 25: Extrusor con rebalse



Se dejó de usar el motor para que este no se forzara, y se procedió a girar el tornillo sin fin manualmente y la pasta fluyó a través de la manguera sin problema. El inconveniente que se encontró es que dado que el tornillo no giraba de forma constante la pasta no salía con continuidad. (Ver Ilustración 26)

Ilustración 26: Purga de material



7. Discusión de resultados

El código de Arduino, Marlin fue diseñado para controlar impresoras 3D que trabajan con filamentos de plástico. Se cree que esta es uno de los motivos que impidió que el controlador ubicado en la tarjeta RAMPS 1.4; en la posición del extrusor, no fuera capaz de controlar el extrusor de pastas. Esto se debe a que la programación contaba con restricciones de operación en caso de no alcanzarse la temperatura mínima para extruir filamento; esta temperatura no tenía manera de ser percibida en la impresora en cuestión, dado que, entre sus componentes, no cuenta con una cama caliente (misma que no tiene función en el tipo de material que extruye este tipo de máquina).

Se descartaron también, las posibilidades de que el motor se encontrara quemado o de la existencia de un daño en los cables por lo que una falla mecánica o eléctrica no es el motivo de que este no funcionara. Existe la posibilidad que el controlador no esté recibiendo suficiente corriente o de cierta manera, demasiada corriente y por ende se sobrecaliente.

El extrusor encontraba dificultades para seguir operando y el rebalse del materias, se sospecha que estas problemáticas se presentaron debido a: una falta de alineación sobre el eje central entre los componentes del extrusor, la fricción generada por las características físicas de la pasta (que, debido a su consistencia granulosa, y materiales del extrusor, aumentaban la fricción entre el émbolo y las paredes internas del cilindro) y la carencia del torque necesario en el motor, para movilizar este tipo de fluido.

En cuanto al material a extruir, podemos decir que la pasta de arcilla debería de tener una consistencia más espesa; pues al no compactarse, además de presentar los problemas de rebalse, esta no podrá mantener su forma una vez haya sido extruida.

Debido a la situación del estado de calamidad por la pandemia del Covid-19, se tuvo limitaciones de acceso a los talleres de la universidad, por lo que a veces no se contaba con el material adecuado para trabajar, como máquinas y herramientas. Esto ocasionó un retraso en la manufactura del aparato, tanto por la falta de equipo como la logística para llevar el proyecto de un lugar a otro para construirlo y probarlo.

La pandemia también ocasionó problemas para adquisición de los componentes. A pesar de que resultaba más económico importar ciertas piezas, los paros en operaciones de diferentes industrias y disposiciones gubernamentales retuvieron en aduanas los pedidos casi durante un mes. Si se analiza el costo-beneficio del tiempo de espera y precio se cree que hubiera sido mejor adquirir los componentes localmente para no demorar el ensamble y tener más tiempo para realizar ajustes, modificaciones y pruebas si es que se tiene un plazo de entrega limitado.

8. Conclusiones

- Se diseñó y fabricó un prototipo de impresora 3D para pasta cerámica con un presupuesto alrededor de Q3,000.00, cabe recalcar que algunas piezas fueron recicladas, las mismas se listan en la Tabla 5: Listado de piezas y costos (items 12, 13 y 16).
- El módulo de movimiento de la impresora fue realizado con un diseño cartesiano y usa 3 motores stepper para funcionar.
- Utilizar software y firmware libre, como Repetier y Marlin, permitió el adecuado control del prototipo para los desplazamientos en los ejes X, Y y Z. Sin embargo, los mismos no fueron aptos para operar el controlador que controla el extrusor de pastas.
- La prueba de impresión manual con Repetier Host fue satisfactoria para los desplazamientos de los ejes X, Y y Z; sin embargo, dio errores en la purga de material.
- El extrusor fue construido a base de un cilindro neumático modificado, que extruye el material a través de una manguera hasta el cabezal y de impresión. La pasta no fue extruida correctamente, únicamente se logró una purga manual debido a que las piezas de este no tenían una alineación óptima.
- El firmware no pudo controlar el motor stepper del extrusor de pastas debido a que este estaba diseñado para operar una impresora 3D que extruya filamento de plástico.

9. Recomendaciones

- Se recomienda alinear con más precisión los componentes del extrusor respecto a su eje central. El motor stepper Nema que se utilizó tiene una capacidad de torque de 12 a 20 Nm, podría ser satisfactorio para estas aplicaciones utilizar un motor stepper de mayor torque o utilizar varios motores. En cuanto a los materiales se recomienda fabricar un cilindro y embolo con plásticos de ingeniería como el Vekton por tener propiedades de auto lubricación, para que los mismos presenten menos fricción cuando estén en contacto con la pasta. Una vez hechos los cambios, realizar nuevas pruebas de purga de material. También existe la posibilidad que el tipo de pasta no sea la adecuada por su granulosis, sería ideal verificar el funcionamiento con otro tipo de material de extrusión como lo es la mantequilla de maní o plastilina.
- Se recomienda manufacturar una cama de madera tratada de 2 pulgadas, acoplable a la mesa de impresión, ya que es más amigable para trabajar con cerámica y así la base de la pieza tendrá un buen agarre.
- Se recomienda realizar pruebas con diferentes tipos de arcilla, categorizándolas por su viscosidad, porcentaje de humedad, aditivos, etc.
- Se recomienda llevar a cabo pruebas comparativas entre el modelo digital y el resultado en cerámica una vez la mezcla sea lo suficientemente adecuada para mantener su forma.

10. Bibliografía

1. *¿Qué es la cerámica? - Historia y evolución - El Mercado Artesano*. El Mercado Artesano. (2016). Extraído el 20 octubre 2020, de <https://elmercadoartesano.es/que-es-la-ceramica/>.
2. *3D Concrete Printing*. Sika.com. (2020). Extraído el 20 de octubre 2020, de <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/3d-concrete-printing.html>.
3. Bernal, I. (1992). *Industria Cerámica Moderna* (1st ed.). SENA-UNIVERSIDAD.
4. *CAD Software | 2D and 3D Computer-Aided Design | Autodesk*. Autodesk.com. (2020). Extraído el 20 de octubre 2020, de <https://www.autodesk.com/solutions/cad-software>.
5. Carolo, L. (2020). *3D Printer Axis: The Basics – Simply Explained | All3DP*. All3DP. Extraído el 20 de octubre 2020, de <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>.
6. Cruz, P., Knaack, U., Figueredo, B., & de Witte, D. (2017). *Ceramic 3D printing – The future of brick architecture* [eBook]. School of Architecture, University of Minho. Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://parametrichouse.com/ceramic-3d-printing/>.
7. *Difference Between Firmware and Software - Pediaa.Com*. Pediaa.Com. (2018). Extraído el 11 de abril 2020, de <https://pediaa.com/difference-between-firmware-and-software/>.
8. *El mecanizado CAM: qué es y qué ventajas aporta - ferrosplanes*. ferrosplanes. (2017). Extraído el 20 de octubre 2020, de <https://ferrosplanes.com/mecanizado-cam/>.
9. *FAQ*. CERAMBOT. (2020). Extraído el 20 de octubre 2020, de <https://www.cerambot.com/faq/>.
10. Jamshed, S. (2014). *Qualitative research method-interviewing and observation*. NCBI. Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4194943/>.
11. La Hora. (2013). *Potencial artístico guatemalteco, en manos del abandono*. Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://lahora.gt/hemeroteca-lh/potencial-artistico-guatemalteco-en-manos-del-abandono/>.
12. *LUTUM Web Store | Vormvrij*. Vormvrij. (2020). Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://vormvrij.nl/lutum/shop/#!/LUTUM%C2%AE-v4-3-Clay-Printer/p/133416233/category=47484151>.
13. *Matriz de decisión en proyectos | Aprende a sacarle partido*. Recursos en project management. (2020). Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://www.rekursosenprojectmanagement.com/matriz-de-decision/#:~:text=No%20existe%20una%20aplicaci%C3%B3n%20o,y%20selecci%C3%B3n%20de%20soluciones%20t%C3%A9cnicas>.
14. Oppenheimer, A. (2014). *¡Crear o morir!* (1ra ed.).

15. PRODY SOL, 3. (2017). *¿Cómo generar un buen gcode? Parte 2: Parámetros de impresión*. Blog de 3DCPI, impresión en 3D. Extraído el 20 de octubre de 2020, de <http://blog.3dcp.com/2017/05/24/parametros-de-impresion/>.
16. *Repetier-Host Documentation - Repetier Software*. Repetier Software. (2020). Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://www.repetier.com/documentation/repetier-host/rhmanual-control/>.
17. Soy502. (2013). *Artesanías guatemaltecas, un mercado que crece un 5% cada año*. Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://www.soy502.com/articulo/el-mercado-de-artesantias-crece-establemente-un-ritmo-de-5-anual>.
18. *TecLab - Campus Tec*. Tec.gt. (2020). Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://tec.gt/teclab/>.
19. V., C. (2020). *Top 12 ceramic 3D printers on the market - 3Dnatives*. 3Dnatives. Extraído el 20 de octubre de 2020, de <https://www.3dnatives.com/en/ceramic-3d-printers-130120204/#!>.
20. *WASP BigDelta WASP 12m review - house 3D printer (organic material)*. Aniwaa. (2020). Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/wasp-bigdeltawasp-12m/>.
21. *What is Marlin?* Marlin Firmware. (2020). Extraído el 20 de octubre de 2020, de <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>.
22. Zhu, S., Stieger, M., Jan van der Gut, A., & Schutyser, M. (2019). *Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behavior* [eBook]. Extraído el 2 de noviembre 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856419308811>.

11. Apéndice

Anexo 1: Entrevista a Marissa Mendizábal

Entrevistado: Marissa Mendizábal

Medio: Zoom

Fecha: 27/07/2020

Entrevista a ceramista

1. ¿Qué tipo de cerámica utilizas?

La arcilla es una combinación de minerales y siempre tiene un factor de arcilla, con una combinación de materiales.

2. ¿Has utilizado otro tipo de arcillas, cerámica, porcelana polimérica, pastas en general?

3. ¿Consigues el producto para realizar la mezcla localmente?

No lo compra hecha, hay gente que la vende ya hecha. La pasta guatemalteca es muy porosa para uso alimenticio. Hay un factor malo en Guatemala, se divide en tres baja, media y alta temperatura. Las libres de peligro para uso humano es media o alta. Hay gente en Guatemala que vende la de baja de temperatura.

La arcilla gringa es Volclay.

Las únicas personas que trabajan con esta temperatura es en Palopó.

Formula su pasta desde cero, combina diferentes tipos de arcilla, junta guatemalteca con gringa, ella mezcla minerales guatemaltecos. Hornea a 1280 grados centígrados. Ella busca vitrificación en la arcilla.

4. ¿Cómo controlas la viscosidad de la mezcla?

Ella trabaja con torno entonces su arcilla siempre desde el inicio es tipo pasta. La liquida es para moldes. Una señora vende arcilla líquida para baja temperatura. La gente que trabaja líquido sí mide la viscosidad, como si fuera una mezcla de panqueques y si la mezcla se queda pegada y gotea poco esa es la viscosidad perfecta. Se puede extender en una tela para que sea más espesa la liquida, el problema es arralarla.

5. ¿Tu preparas la mezcla o ya viene hecha? ¿Mides las proporciones de agua y arcilla que le colocas a la mezcla?

Ella prepara su propia receta.

6. ¿Necesitas de algún mecanismo, maquina o herramienta para crear una mezcla homogénea?

La persona ya te da el galón ya preparado.

- 7. ¿Las mezclas pueden reutilizarse?**
Destruyes la pieza, la echas en el agua y se vuelve pasta de nuevo, pero siempre y cuando ya este como piedra.
- 8. ¿Cómo debe ser el ambiente en donde estas moldeando la mezcla?**
No afecta mayor cosa. Que tenga buena ventilación. El envase o el tubo donde va a estar, evitar que haya calor.
- 9. ¿Cuánto tiempo te dura la mezcla fresca, es decir moldeable?**
Eso depende de la temperatura de la máquina.
- 10. ¿Cómo te aseguras de que lo que estas moldeando mantenga su forma?**
- 11. ¿Utilizas horno para terminar la pieza y que la misma adquiera su estado sólido?**
- 12. ¿Qué función tiene el horno, que efecto produce en la cerámica?**
El horno puede alquilarse. Q200, caben 200 tazas para primer horneado, segundo horneado para pintura cabe 50.
- 13. ¿Conoces pastas que no necesiten de horno? En dado la respuesta sea afirmativa, que tipo de pastas son estas y de qué manera se curan.**
Pasta que está hecha a base de papel, arcilla y agua venden en librería Platino. Cada cuadro cuesta Q37, en cambio el galón cuesta como Q70. Barro podría ser, es una arcilla solo con agua y lo hornean a hornos de lena a una temperatura de 600 grados. Ella trabaja con barro de Chinautla.
- 14. ¿Alguna vez has extruido alguna pasta para crear alguna pieza? Si la respuesta es afirmativa, ¿con que elemento lo has hecho?**
Técnica de chorro. Hay unas cajas que adentro va la pasta, entonces la caja se exprime y salen por boquillas para generar chorros. La caja en Amazon cuesta como \$300, en México hay un lugar que se llama Alta cerámica que hace hornos y exprimidores.
- 15. ¿De qué material harías la mesa/cama de impresión?**
Madera gruesa, 2 pulgadas y tratado, es un tratamiento para que cuando se tenga contacto con la humedad no se empiece a abombar.
- 16. ¿Imagina que tuvieras una impresora 3D para crear tus piezas, que funciones, elementos te gustaría que tuvieran o consideras que es necesario incorporar?**
- 17. ¿Crees que incorporar la manufactura aditiva a tus procesos de trabajo te beneficiaría en alguna manera? ¿Qué aplicaciones crees que podría tener esta impresora?**
Saber el calibre del extrusor. Ver artistas.
- 18. Otros aspectos que desearías recalcar.**

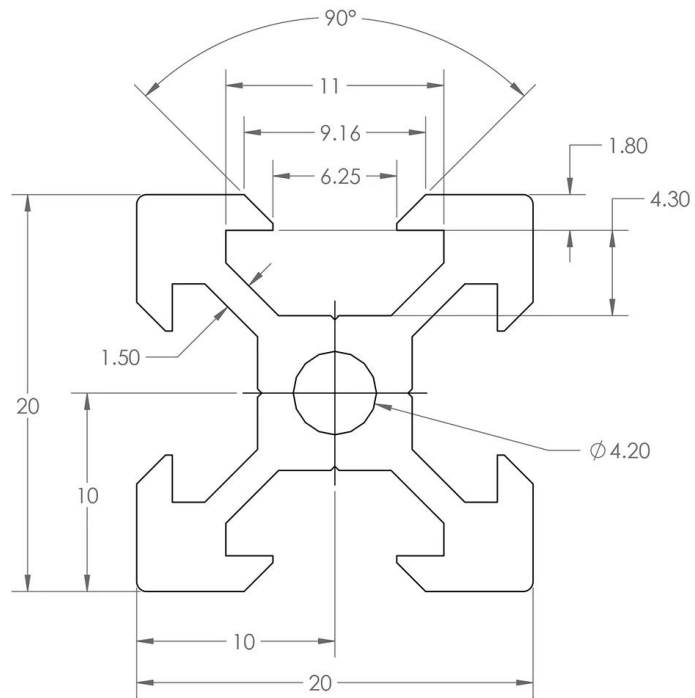
-Meterse a ver cerámica de Valió en filipinas

Anexo 2: Bill of Materials impresora Mbau3D

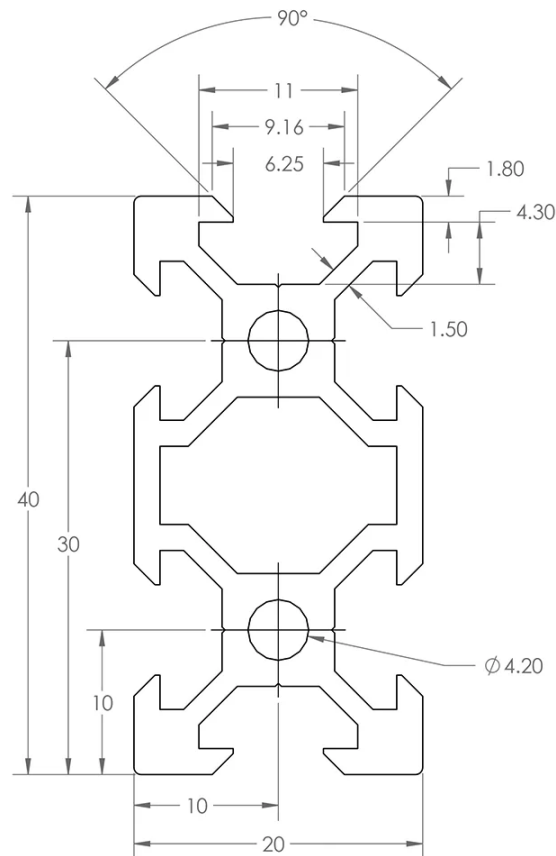
Q	DESCRIPTION	TYPE
2	z couplers	RP
3	Endstop-holder	RP
1	x-carriage	RP
1	x-end-idler	RP
1	x-end-motor	RP
1	y-motor-bracket	RP
2	z-motor-mount	RP
2	belt-clamp	RP
8	bar-clamp	RP
4	frame-vertex with foot	RP
2	frame vertex	RP
1	herringbone big	RP
1	herringbone small	RP
1	extruder base	RP
1	extruder guidler	RP
6	bearing guides	RP
100	M8 nut	Fastener
100	M8 washer	Fastener
2	M4x20 tornillo	Fastener
2	M4 tuerca	Fastener
3	M3x8 tornillo sin cabeza	Fastener
25	M3x10 tornillo	Fastener
40	M3x20 tornillo	Fastener
5	M3x30 tornillo	Fastener
2	M3x50 tornillo	
72	M3 tuerca	Fastener
72	M3 washer	Fastener
2	3x12mm resortes	
6	M8x370mm	Threaded rod
4	M8x300mm	Threaded rod
3	M8x445mm	Threaded rod
2	M8x210mm	Threaded rod
1	M8x50mm	Threaded rod
1	M8x20mm	Threaded rod
2	8mmx385mm	Smooth rod
2	8mmx420mm	Smooth rod
2	8mmx350mm	Smooth rod
1	225mmx225mm print top plate	Thick Sheet
24	small cable binder / zip tie	Misc
2	15mm tubo ID 4.32mm	Misc

6	608 bearing	Bearings
10	LM8UU	Bearings
1	840mm×2mm GT2 belts	Belt
1	900mm×2mm GT2 belts	Belt
2	poleas GT2 de 36 dientes	Belt
2	resortes	Misc
5	NEMA 17 bipolar stepper motor	Electronics
1	Electronics kit	Electronics
1	Fuente de Poder	Electronics
3	Resistencias 10ohm 10W	Electronics
1	Switch 12V	
3	3.7x100mm heat shrink	
3	6.5x100mm heat shrink	
1	Heatbed	Electronics
1	Hot End	Hot End
1	Alu Mounting Plate	Hot End
2	PTFE tube for resistor	Hot End
2	PTFE tube for thermistor	Hot End
2	Termistor 100k	Hot End
1	Resistencia 6.8Ohm 3W	Hot End
1	2m 22AWG cubierta de fibra de vidrio	
1	2m 18AWG cubierta de fibra de vidrio	
1	1m 18AWG orange	
1	1m 18AWG black	
1	2m 22AWG green	
1	2m 22AWG red	
1	2m 22AWG blue	
1	2m 22AWG black/yellow	
1	2m 18AWG fiber glass shield	
1	4m 22AWG fiber glass shield	
1	Kapton Tape	
1	40mm Fan	
1	M8x60mm, estriado	Hobbed Bolt
2	Muestras de PLA	

Anexo 3: Plano perfil 2020 (medidas en mm)

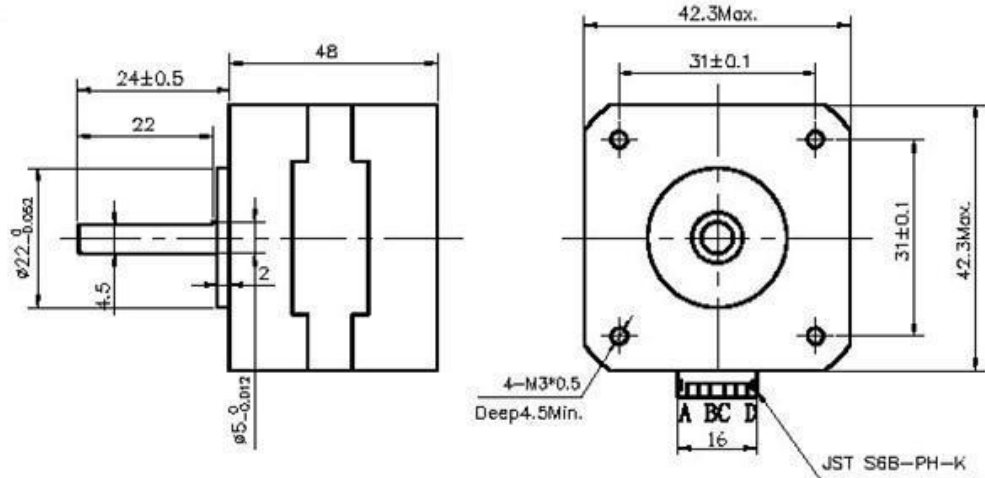


Anexo 4: Plano perfil 2024 (medidas en mm)

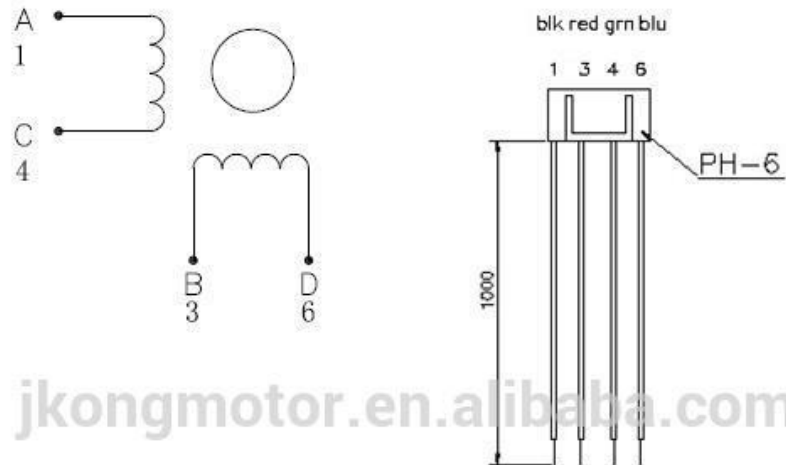


Anexo 5: Plano motor stepper Nema

Dimensions:
(Unit=mm)

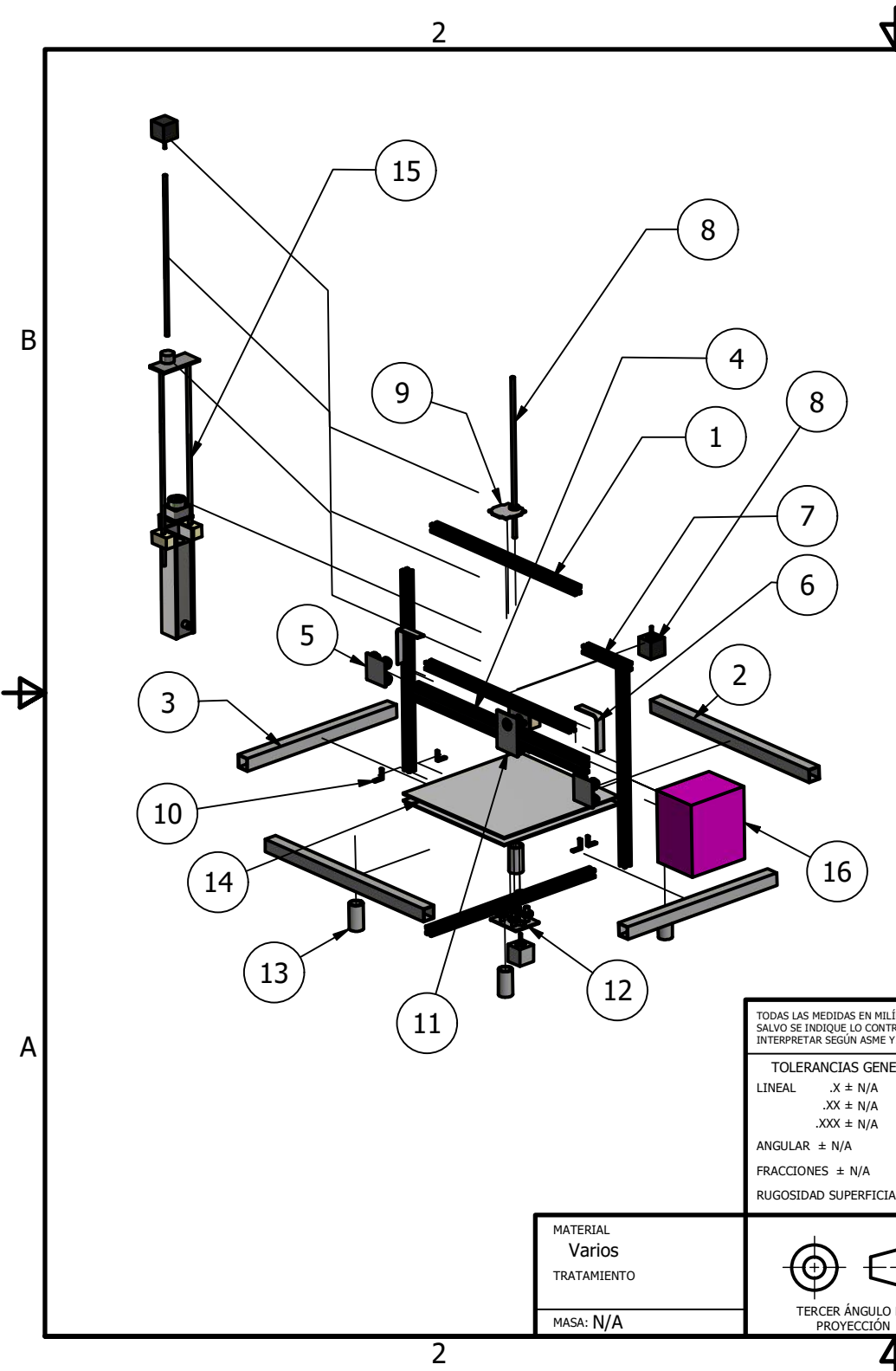


Wiring Diagram:



jkongmotor.en.alibaba.com

Anexo 6: Planos impresora



Listado de Partes		
Item	Cantidad	No. de Parte
1	5	Perfil de aluminio 2020 1
2	2	Tubo cuadrado de aluminio
3	2	Tubo cuadrado de aluminio 2
4	1	Perfil de aluminio 2020 2
5	2	Placa deslizante
6	2	Angular eje x
7	1	Perfil de aluminio 2020 3
8	1	Motor y tornillo sin fin
9	1	Soporte Tornillo sin fin
10	4	Angular
11	1	Ensamble placa eje x
12	1	Ensamble placa eje y
13	4	Patas
14	1	Cama impresora
15	1	Ensamble extrusor
16	1	Caja componentes electronicos

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ± N/A
.XX ± N/A
.XXX ± N/A

ANGULAR ± N/A

FRACCIONES ± N/A

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

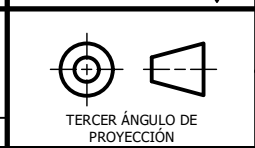
DIBUJADO POR Carmen González	FECHA 02/11/2020
DISEÑADO POR Carmen González	FECHA 02/11/2020
REVISADO POR Mayarí Pérez	FECHA 02/11/2020
APROBADO POR	FECHA

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
Guatemala, Guatemala 01015
PBX: (502) 2634-0336 / 40
info@uvg.edu.gt

TÍTULO: **Explosión Prototipo impresora de pastas**

MATERIAL Varios
TRATAMIENTO
MASA: N/A



NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO
Trabajo de graduación

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

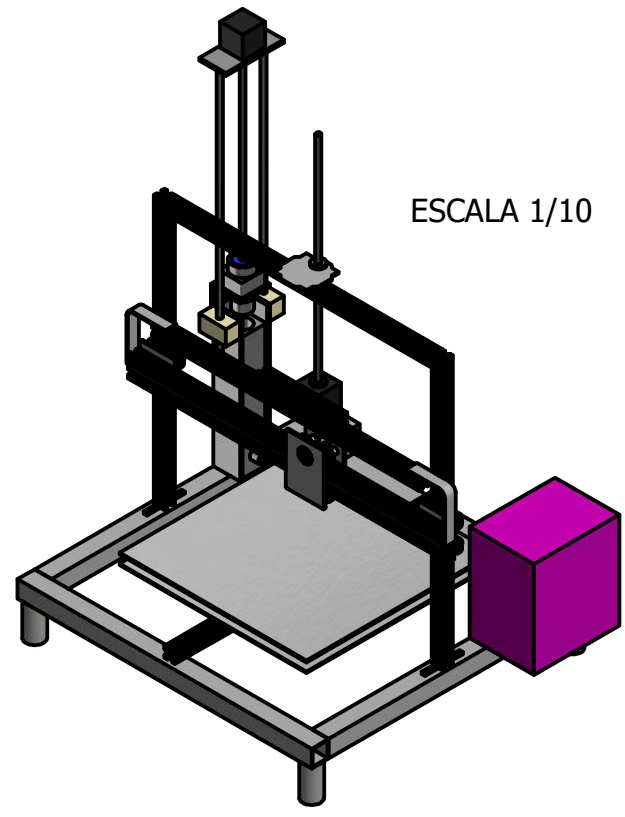
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO A	ESCALA: 1 / 15	UNIDADES: mm
PÁGINA 1 DE 5	REV A	

2

1

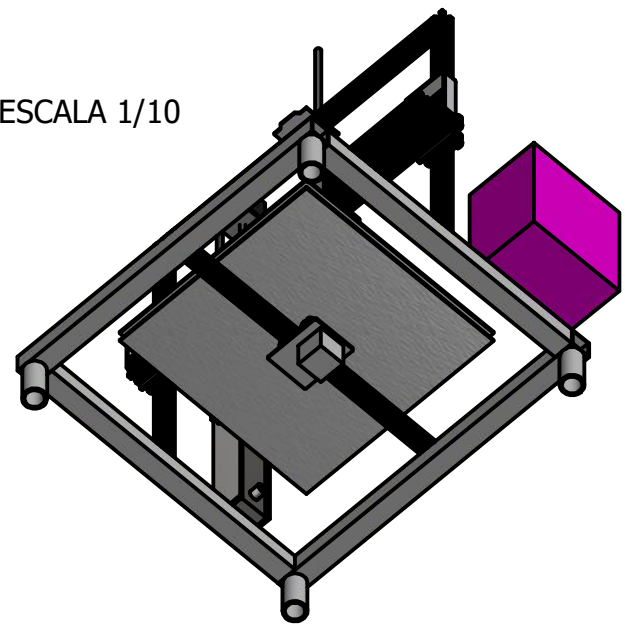
ESCALA 1/10

B



ESCALA 1/10

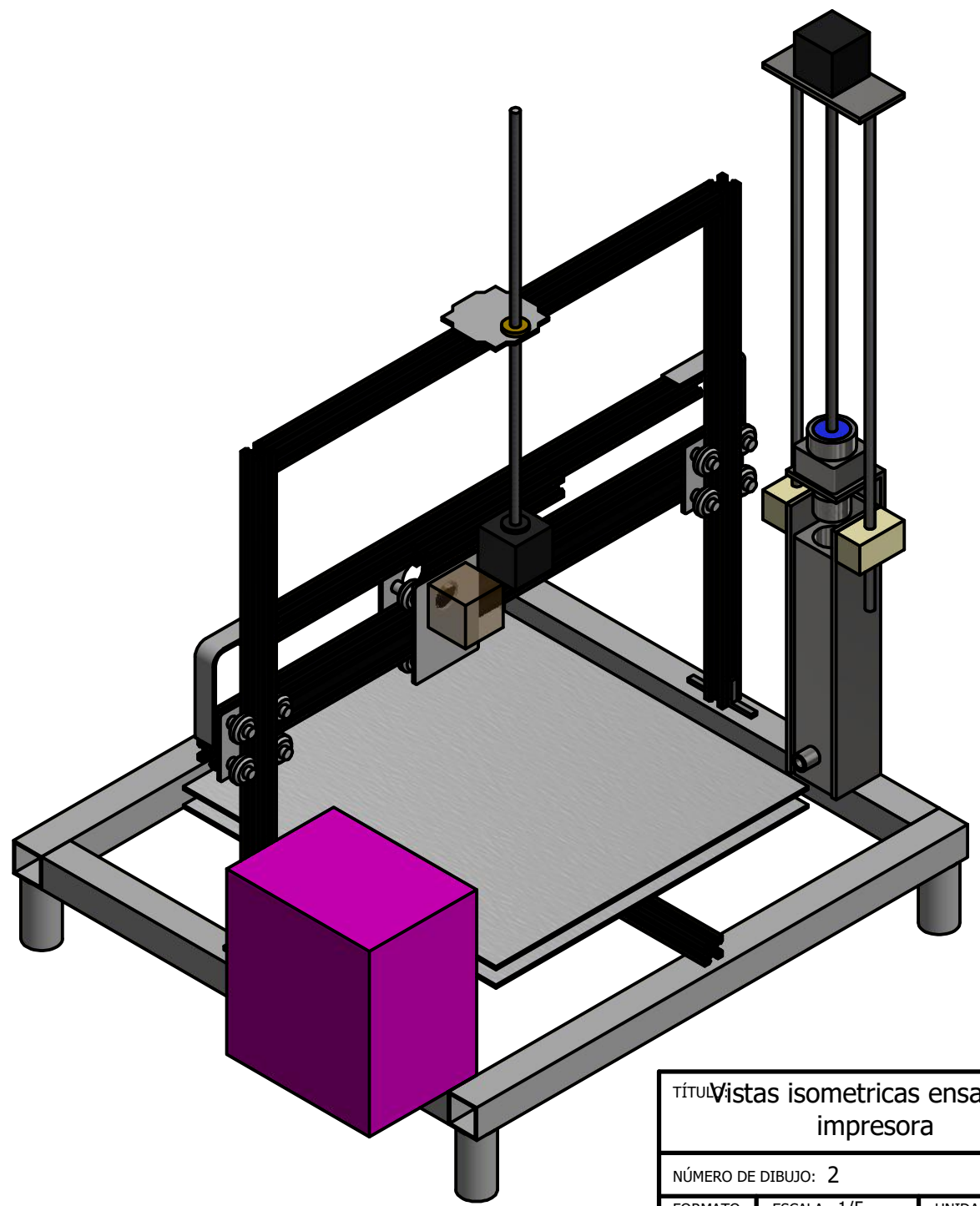
A



2



1

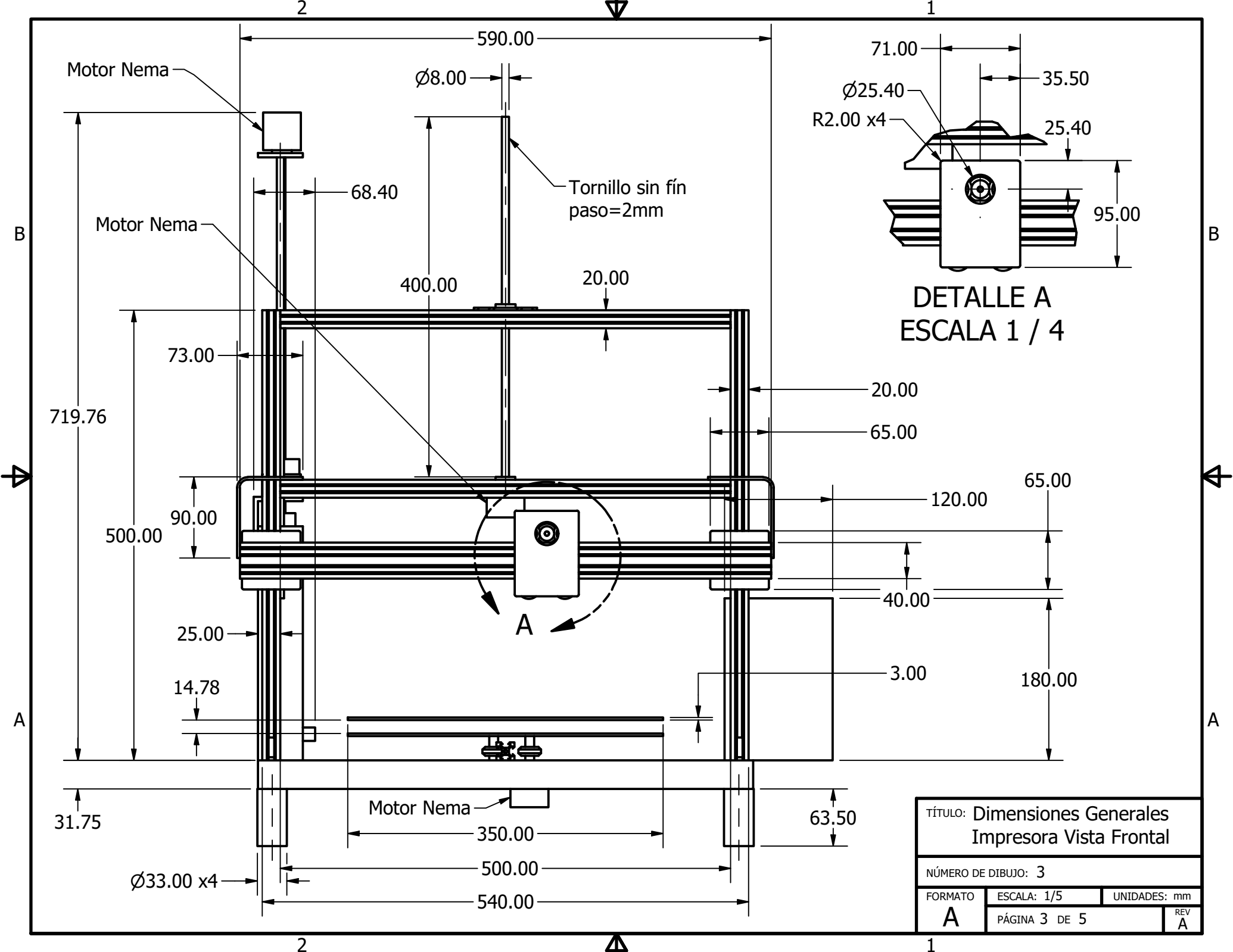


B



A

TÍTULO: Vistas isometricas ensamble impresora		
NÚMERO DE DIBUJO: 2		
FORMATO A	ESCALA: 1/5	UNIDADES: mm
	PÁGINA 2 DE 5	REV A



2 1

590.00

Ø8.00

68.40

400.00

20.00

71.00

35.50

Ø25.40

R2.00 x4

25.40

95.00

719.76

73.00

20.00

65.00

500.00

90.00

120.00

65.00

25.00

40.00

3.00

180.00

14.78

31.75

Motor Nema

350.00

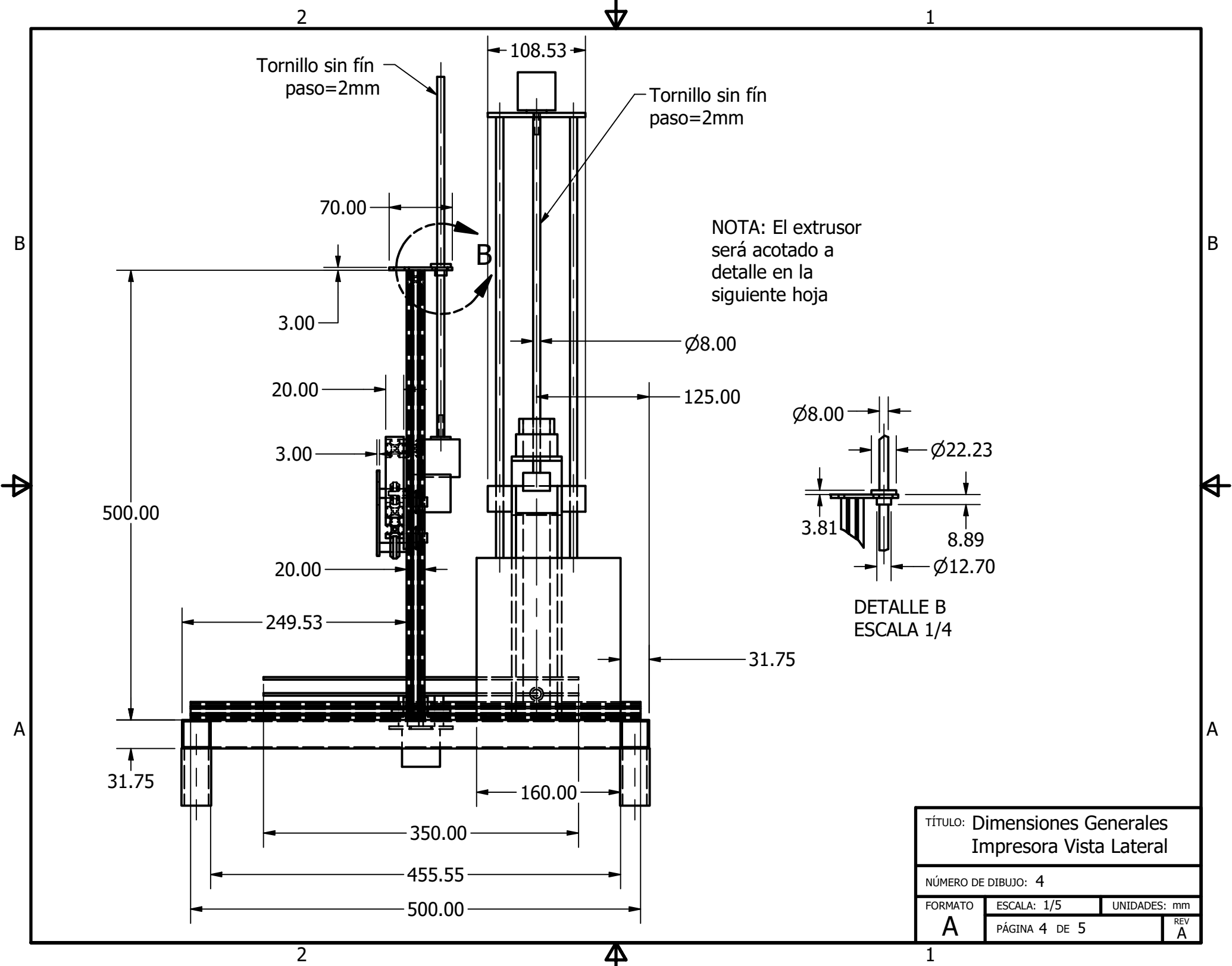
63.50

500.00

540.00

Ø33.00 x4

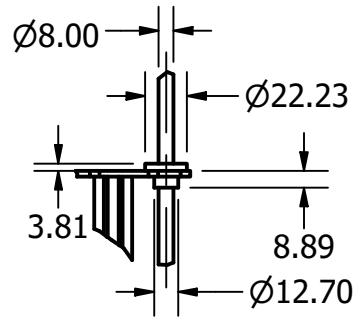
TÍTULO: Dimensiones Generales Impresora Vista Frontal		
NÚMERO DE DIBUJO: 3		
FORMATO A	ESCALA: 1/5	UNIDADES: mm
	PÁGINA 3 DE 5	REV A



Tornillo sin fin
paso=2mm

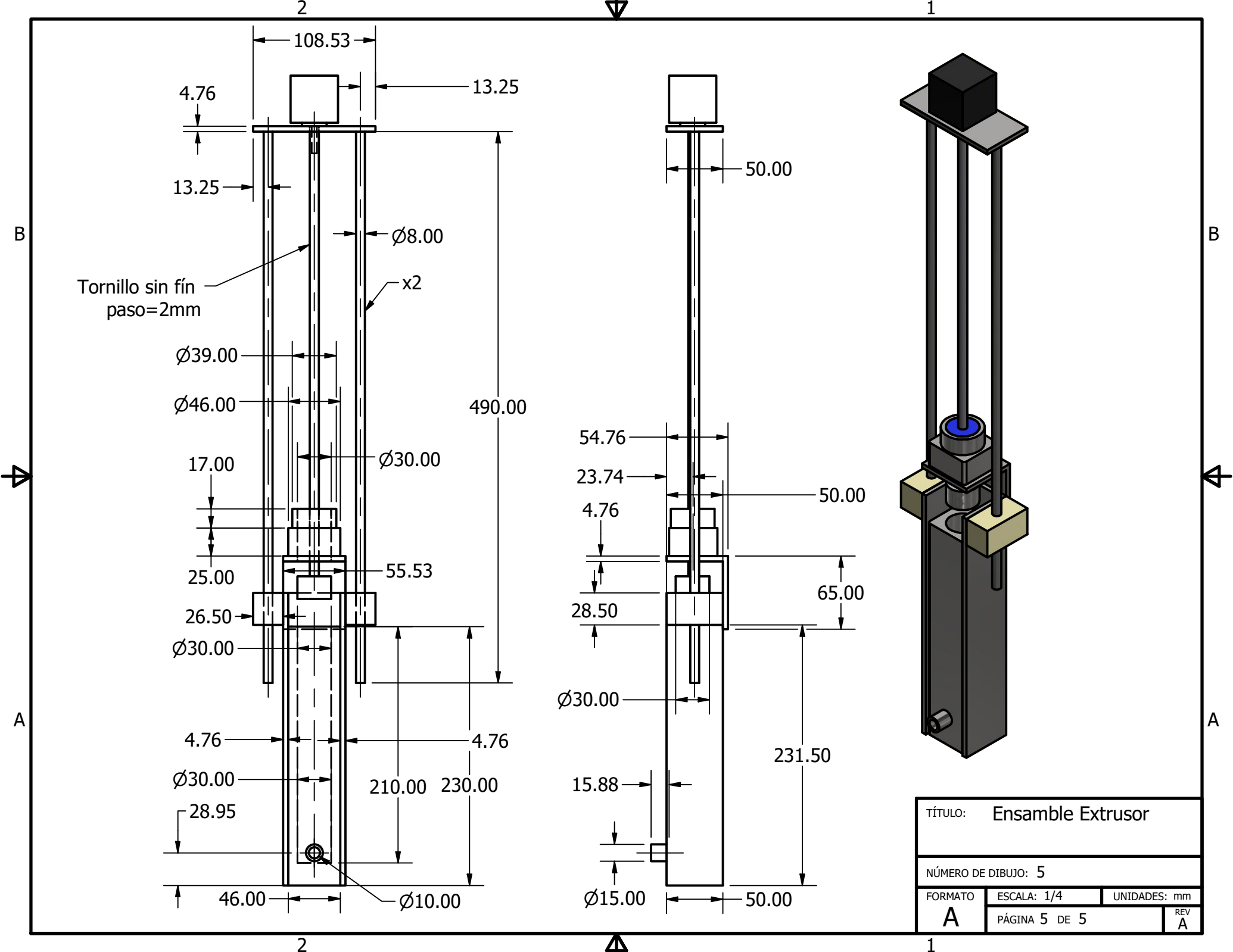
Tornillo sin fin
paso=2mm

NOTA: El extrusor
será acotado a
detalle en la
siguiente hoja



DETALLE B
ESCALA 1/4

TÍTULO: Dimensiones Generales Impresora Vista Lateral		
NÚMERO DE DIBUJO: 4		
FORMATO A	ESCALA: 1/5	UNIDADES: mm
	PÁGINA 4 DE 5	REV A



TÍTULO: Ensamble Extrusor		
NÚMERO DE DIBUJO: 5		
FORMATO	ESCALA: 1/4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 5	REV A