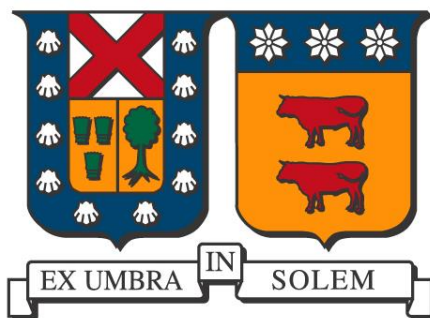


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



“Diseño y desarrollo de dispositivo de extrusión de fluidos viscosos para impresión 3D”

JOSÉ TOMÁS DOMÍNGUEZ FUENZALIDA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUIA:

ING. MARIO VILLA D.

PROFESOR CO-REFERENTE:

PHD. MAXIMILIANO RIVERA U.

SANTIAGO, 26 DE MAYO 2020

1 Resumen

El incremento en el número e intensidad de catástrofes que son efectos de cambios en el ecosistema producto del calentamiento global, ha llevado a aquellos que están desarrollando tecnologías a tener el DEBER de ampliar los procesos de diseño, no solo pensando en cómo fabricar los productos, como los utilizará el usuario, y su estética, sino que además deben cerrar los ciclos de vida de este, incorporando la gestión final al proceso de diseño.

Por lo mismo, nuevos materiales, cuyo ciclo de vida sea armónico con el medioambiente están comenzando a ser desarrollados, si bien, estos tienen muchos obstáculos que sobrellevar, se presentan como una alternativa a todos aquellos materiales a base de petróleo, como son los plásticos.

El desarrollo de estos materiales no puede olvidar las tecnologías de manufactura que se han desarrollado hasta el momento, por lo mismo, se deberá adaptar los materiales a estas máquinas o las máquinas a estos materiales.

Con el objetivo de adaptar máquinas a estos nuevos materiales es que este trabajo busca desarrollar un sistema de extrusión para materiales viscosos, que permita a cualquier persona del mundo instalarlo en una impresora 3D comercial, y experimentar con los materiales en los que ha estado trabajando.

Palabras Clave: Impresión 3D, BioMaterial, BioCompuesto, Manufactura Aditiva.

2 Abstract

With the raise in the number and intensity of catastrophes due to changes in the ecosystems caused by global warming, the technology development industry has the DUTY to expand the design process, and not only think about how to manufacture the product, its usability, and esthetics, they must also design the products life cycle closure, incorporating its final management into the design process.

Therefore, new materials, whose life cycle is harmonious with the environment have begun be developed, although these developments have obstacles to overcome, they are presented as an alternative to all those petroleum-based materials, such as plastics.

The development of these materials cannot forget the manufacturing technologies that have been developed so far, therefore, you must adapt the materials to these machines or the machines to these materials.

With the aim of adapting machines to these new materials, this work seeks to develop an extrusion system for viscous materials, which allows anyone in the world to install it in a commercial 3D printer, and experiment with the materials that has been developed.

Key Words: 3D Printing, BioMaterial, BioComposite, Additive Manufacture.

3 Glosario

Manufactura Aditiva: El proceso de unir material para construir un objeto a partir de un modelo 3D (ASTM F2792), generalmente se desarrolla capa a capa.

Mecanizado Rápido: El mecanizado rápido o *rapid prototyping* por su nombre en inglés corresponde al proceso un conjunto de distintos procesos de manufactura que logran fabricar piezas de forma rápida y a bajo costo. Los procesos principales son manufactura aditiva y sustractiva, moldes de inyección, y fundición.

Open Hardware: *OpenHardware* o *OpenSource* corresponde a todos los desarrollos físicos que están licenciados de forma de que pueden ser estudiados, modificados, creados y distribuidos por cualquier persona.

Mock-Up: Es un prototipo que proporciona al menos una parte de la funcionalidad de un sistema y permite pruebas del diseño.

Diseño Generativo: Es un proceso de diseño iterativo, donde un *software* tipo CAD genera distintas geometrías en base a una serie de condiciones de borde, aprendiendo de cada una de estas, entregando como resultado el diseño más eficiente.

Firmware: Un tipo específico de software que entrega un control a bajo nivel para el hardware de un dispositivo.

GCode: Es un lenguaje de programación a través del cual las personas le dicen a las máquinas como hacer las cosas.

Backlash: El *backlash* es un tipo de movimiento inesperado en un eje que se da por las holguras que existen entre las piezas mecánicas normalmente entre una tuerca y un eje roscado.

Cavitación: Es un efecto hidrodinámico que se produce cuando se crean cavidades de aire u otro gas dentro de un fluido producto de las diferencias de presión aplicadas sobre este.

Arduino IDE (Integrated Development Enviornment): *Software* que permite programar circuitos integrados y microcontroladores, principalmente de la familia Arduino.

BioCompuestos: Los BioCompuestos son materiales compuestos formados por un material aglutinante reforzado por fibras naturales provenientes de algún polímero. Estos materiales deben mantener la condición de ser biocompatibles (es decir, compostables).

Coordenadas Absolutas o Relativas: En la programación de *GCode* las máquinas tienen la posibilidad de trabajar en 2 sistemas coordenados; las coordenadas absolutas siempre trabajarán en función de un mismo punto, aquel que se haya definido como “0 máquina”; las coordenadas relativas trabajarán en función del último punto en que estuvo la máquina.

Buffer: Un *Buffer* es una figura ampliamente utilizada en la programación, representa alguna variable cuyo rol es almacenar información de forma temporal, y que por lo general es borrada después de ser utilizada.

4 Índice

1	Resumen.....	2
2	Abstract.....	3
3	Glosario.....	4
4	Índice.....	6
5	Índice de Imágenes	12
6	Índice de tablas	18
7	Marco Teórico.....	20
7.1	Introducción	20
7.2	Objetivos.....	21
7.2.1	Objetivo General.....	21
7.2.2	Objetivos Específicos.....	21
7.3	Impresión 3D	22

7.3.1	Repaso Histórico	22
7.3.2	Ventajas y desventajas comparativas de la impresión 3D.....	24
7.3.3	Evolución de la Impresión 3D	25
7.3.4	Principios generales de funcionamiento de la Impresión 3D	27
7.3.5	Métodos de Impresión 3D.....	27
7.3.6	El futuro de la impresión 3D.....	29
7.3.7	Materiales.....	35
8	Modelos actuales de extrusión para materiales viscosos	38
8.1	Sistemas de Extrusión Directos.....	38
8.1.1	Sistema Neumático Directo	38
8.1.2	Sistema mecánico directo.....	40
8.1.3	Sistema Hidráulico Directo	41
8.2	Sistema de Extrusión Indirecto – Bomba de Arquímedes	43
8.2.1	Características claves de diseño en un <i>auger screw</i> , y como estas afectan el flujo de material.....	44

8.3	Tanque:	46
8.3.1	Jeringa Neumática.....	46
8.3.2	Tanque de Almacenamiento.....	48
8.4	Sistemas Mecánicos	50
8.4.1	SCARA	51
8.4.2	Brazo Robótico	53
8.4.3	Delta.....	55
8.4.4	Sistema Cartesiano.....	57
8.4.5	Sistemas de Base Móvil	58
9	La Máquina	60
9.1	HyperCube	60
9.1.1	Características de la máquina:.....	61
9.1.2	Marlin <i>Firmware</i>	63
10	Implementación.....	65
10.1	Arquitectura del Sistema.....	66

10.2	Sistemas de Extrusión	68
10.2.1	Sistema de Alimentación Neumático	68
10.2.2	Sistema de Alimentación Mecánico.....	71
10.2.3	Extrusor.....	80
10.3	Sistema de Control.....	84
10.3.1	Marlin4Clay	85
10.3.2	BioFeeder.....	86
10.4	Perfil <i>Slicer</i> – Cura.....	97
10.4.1	Parámetros claves de Cura	98
10.5	Materiales.....	103
10.5.1	Características de los materiales	104
10.5.2	Pruebas de material	105
11	Manual de Usuario.....	107
12	Resultados	111
12.1	Fabricación de Sistemas de Extrusión y Alimentación.....	111

12.1.1	Imágenes de los sistemas físicos	111
12.2	Materiales.....	113
12.3	Máquinas.....	115
13	Conclusiones	118
14	Bibliografía	120
15	Anexos	125

5 Índice de Imágenes

Imagen 1 – Esquema de trabajo de la impresión 3D.....	27
Imagen 2 y 3 - A la derecha una escultura impresa en 3D from Sculpteo, a la izquierda una Catrina Mexicana de Joshua Harker.	30
Imagen 3 y 2 – A la derecha una escultura impresa en 3D from Sculpteo, a la izquierda una Catrina Mexicana de Joshua Harker.	30
Imagen 4 – Prótesis de mano y pierna desarrolladas por la empresa colombiana, Take a Hand, quienes trabajan en Chile.	31
Imagen 5 – Replica de un riñón desarrollado por científicos de la Universidad de Hebei.	31
Imagen 6 – Casa impresa en 3D por la empresa Be More 3D.	32
Imagen 7 – Edificio de la provincia de Jiangsu, China. Las paredes de estos edificios son impresas en 3D.....	33
Imagen 8 – Pieza desarrollada utilizando el software <i>Frustrum</i> , pionero en el diseño generativo. Podemos ver como la densidad de material utilizando va disminuyendo de izquierda a derecha.	34
Imagen 9 – Chasis de un auto diseñado a través de software de diseño generativo de Autodesk.	34
Imagen 10 – Sistema de extrusión de pasta de soldar de la máquina Nordson EFD (EFD, s.f.).	39

Imagen 11 – Extrusor mecánico directo, para materiales cerámicos y comida desarrollado en el +LAB, laboratorio del Politécnico de Milano centrado en el desarrollo de impresión 3D (Natale, 2016).	40
Imagen 12 – Impresora 3D de arcilla, greda y silicona desarrollada en el Fab Lab UChile (Joakin Ugalde, 2018).	42
Imagen 13 – Extrusor indirecto basado en una Bomba de Arquímedes desarrollado por la empresa Wasp (Moretti, 2016).	44
Imagen 14 – Diseño de un sistema que combina una jeringa neumática y un auger screw desarrollada por Kevin Lee para extruir pasta de soldar (Lee, 2015).	47
Imagen 15 – Sistema de extrusión de cerámicas desarrollado por la empresa Wasp, basado en un tanque neumático (Scan-Express, s.f.).	48
Imagen 16 – Tanque mecánico desarrollado por Olivier Van Herpt (Herpt, 2013).	49
Imagen 17 – Estructura de un robot Scara. (Incerti, 2000)	51
Imagen 18 y 22 – Ejemplos de robots SCARA utilizados en la impresión 3D de materiales viscosos (Plotter, s.f.).	52
Imagen 19 – Diagrama del sistema mecánico de un brazo robótico de 6 GDL.	53
Imagen 20 – Robot Kuka con un cabezal la impresión 3D de cementos, proceso que está siendo investigado con el fin de utilizar estos mecanismos en la construcción (Deyle, 2013).	54
Imagen 21 – Diagrama del sistema mecánico de un robot tipo Delta, detallando sus grados de libertad.	55

Imagen 22 – Impresora 3D Delta para cerámicas, modelo <i>OpenHardware</i> desarrollada por Jonathan Keep. (Keep, 2015).....	56
Imagen 23 - Diagrama del sistema mecánico de un robot cartesiano de 3 ejes, detallando sus grados de libertad (Macron, s.f.).....	57
Imagen 24 – Impresora 3D cartesiana de cerámica desarrollada por la empresa Stone Flower 3D (Stone Flower 3D, s.f.).....	58
Imagen 25 – Impresora 3D de cerámica con un sistema SCARA de base móvil desarrollada por la empresa Delta Bots (Delta Bots , s.f.).....	59
Imagen 26 – Impresora 3D HyperCube construida en Fab Lab UTFSM por el estudiante de Ingeniería en Diseño de productos, Javier de la Cerda.	61
Imagen 27 – Sistema motriz CoreXY desarrollado por Ilan E. Moyer.....	62
Imagen 28 – <i>Shield</i> de Arduino Mega RAMPS 1.4 mostrando los distintos componentes que pueden ser insertados en esta, lo que permite construir una impresora 3D completa.	64
Imagen 29 – Relación de los 3 componentes claves del sistema de extrusión.....	66
Imagen 30 – Arquitectura del sistema de movimiento y extrusión.....	67
Imagen 31 – Render del sistema de alimentación neumático.	68
Imagen 32 – Diferencias de impresión para el sistema indirecto (izquierda) y directo (derecha).	70
Imagen 33 - Render del sistema de alimentación mecánico.	72

Imagen 34 – Pieza S-1, donde podemos ver su relación con el husillo de bolas.	75
Imagen 35 – Pieza S-2, donde podemos notar la perforación para que pase el husillo de bolas, y los tornillos que la unirán con la pieza S-3.	76
Imagen 36 – Pieza S-3 donde podemos notar la misma geometría para los tornillos que en la pieza S-2, y los O’Ring necesarios para empujar el material de forma óptima.	77
Imagen 37 – Piezas S-5 y S-6 con el tubo de PVC donde se almacenará el material.	78
Imagen 38 – Pieza S-7 y su relación con el Tubo de PVC y el conector fitting neumático....	79
Imagen 39 - Render del Sistema de Extrusión.....	81
Imagen 40 – Parámetros clave de diseño de un <i>Auger Screw</i>	83
Imagen 41 – 3 versiones distintas del <i>Auger Screw</i> para los que se varió algún parámetro. ..	84
Imagen 42 – Arduino <i>Shield BioFeeder</i> desarrollado en el software Autodesk Eagle.	87
Imagen 43 – Configuración estándar para la comunicación I2C desde un maestro a 3 esclavos, misma configuración que se busca utilizar en la palca BioFeeder Versión 1.3.	89
Imagen 44 – Sensor BMP-180, de presión de aire desarrollado por Sparkfun.	91
Imagen 45 – Ciclo estándar de un PWM en donde se detalla gráficamente que representa cada parámetro del ciclo.....	92

Imagen 46 – Diferencia entre las impresiones utilizando el sistema de alimentación neumático con PID (izquierda) y sin PID (derecha).....	93
Imagen 47 - Sistema de control PID de lazo cerrado.....	94
Imagen 48 – Resultados de la implementación del PID en el sistema de alimentación neumático.....	95
Imagen 49 – Conexión electrónica estándar para un Driver de motor stepper 8825.	96
Imagen 50 – Interfaz del programa <i>Slicer Cura</i> , destacando sus parámetros claves.....	98
Imagen 51 - <i>Preview</i> del <i>software Cura</i> , haciendo un énfasis en la primera capa.	99
Imagen 52 – Resultados para las pruebas de materiales utilizando como bases cenizas.	105
Imagen 53 – Flujo de trabajo para utilizar la impresora 3D de materiales viscosos.....	107
Imagen 54 – Repetier Host, mostrando las rutas que tomará la máquina al momento de imprimir.	110
Imagen 55 – Sistema de extrusión indirecto basado en <i>Auger Screw</i>	111
Imagen 56 – Sistema de alimentación neumático.....	112
Imagen 57 – Imagen del sistema de alimentación mecánico.	112
Imagen 58 – Impresión 3D de BioCompuestos en base a Lignina.	114

Imagen 59 - Impresión 3D de BioCompuestos en base a cenizas de madera.	114
Imagen 60 – Impresión 3D de BioCompuestos en base a celulosa de madera.	115
Imagen 61 – Sistema de impresión 3D implementado en una máquina HyperCube.	116
Imagen 62 - Sistema de impresión 3D implementado en una máquina ClayStack.	116
Imagen 63 - Sistema de impresión 3D implementado en una máquina <i>RepRap Prusa i3 MK3</i>	117

6 Índice de tablas

Tabla 1 – Resumen de los estados de los materiales para impresora 3D en uso actualmente (Xin Wang, 2016).....	35
Tabla 2 – Materiales experimentales en impresión 3D.....	36
Tabla 3 – Características del sistema de extrusión neumático directo.....	39
Tabla 4 - Características del sistema de extrusión mecánico directo.....	41
Tabla 5 - Características del sistema de extrusión hidráulico directo.....	42
Tabla 6 – Características generales de la máquina HyperCube construida en Fab Lab UTFSM	61
Tabla 7 – Tabla de componentes y piezas para el Sistema de Extrusión Neumática, tal como se muestran en la Imagen 31.	69
Tabla 8 - Tabla de componentes y piezas para el Sistema de Alimentación Mecánico, tal como se muestran en la Imagen 32.	72
Tabla 9 – Parámetros base en el diseño de la pieza S-1.....	75
Tabla 10 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-2.	77
Tabla 11 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-3.	78
Tabla 12 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-5.	79

Tabla 13 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-5.	80
Tabla 14 - Tabla de componentes y piezas para el Sistema de Alimentación Mecánico, tal como se muestran en la Imagen 33.	81
Tabla 15 - Parámetros base en el diseño de la pieza E-5.	82
Tabla 16 – <i>Bill of Materials</i> para el BioFeeder.	87
Tabla 17 – Tabla de comunicación para los futuros componentes del control de los alimentadores, y sus correspondientes estados.	89
Tabla 18 – Constantes utilizadas para el control PID implementado en el sistema de tanque neumático.	95
Tabla 19 – Perfiles para el <i>software</i> Cura ya probados para imprimir en 3D distintos materiales viciados, y los tamaños de boquilla a los que están asociados.	101
Tabla 20 – Valores geométricos del sistema de extrusión mostrado en la Imagen 38 para configurar la impresora 3D.	102

7 Marco Teórico

7.1 Introducción

La manufactura aditiva ha revolucionado las industrias de fabricación, tanto a nivel industrial como a nivel personal. Su capacidad de convertir un archivo digital CAD en un medio físico de forma rápida y simple ha captado la atención de ambos tipos de usuario. Si bien esta técnica aún no permea las grandes industrias y procesos de manufactura masivos, y se ha limitado a formar parte esencial en los procesos de prototipado rápido, los expertos ven en esta tecnología un altísimo potencial de desarrollo. Por lo mismo, uno de los objetivos de desarrollo es la diversificación de los materiales que pueden ser utilizados en este proceso; resinas, polvos de metal, células madres, cartílago, cemento, cerámicas, materiales elásticos, entre otros, son ejemplos de materiales que se están probando para hacer de esta tecnología algo más robusto.

El presente trabajo de título tiene como fin el desarrollo un sistema completo de extrusión de materiales viscosos con el fin de entregar a Fab Lab UTFSM una mayor diversidad de materiales con los que se pueda trabajar. En el marco de esta memoria se diseñará y construirá un sistema de extrusión, tanques de alimentación para este y un perfil en el software CURA que facilite la interacción usuario-máquina.

La idea de este trabajo surge como parte del programa Fab Academy realizado en el laboratorio 3D Experience Lab de Dassault Systems en Boston, Massachusets. Esto con el fin de complementar el desarrollo de BioMateriales con las técnicas de fabricación digital, ambos desarrollados dentro de un Fab Lab.

7.2 Objetivos

7.2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema para extruir materiales viscosos que sea capaz de ser instalado en cualquier impresora 3D o sistema mecánico cartesiano de 3 ejes. El sistema debe incluir un extrusor que controle la salida de material desde la máquina, un tanque de alimentación para el extrusor, y un perfil *Slicer* desarrollado en un software *OpenSource*.

7.2.2 Objetivos Específicos

- Construcción de un prototipo.
- Definir el sistema mecánico bajo el cual funcionará el sistema de alimentación para el extrusor.
- Realizar pruebas de funcionalidad de la máquina.
- Establecer los lineamientos para diversificar la cantidad de materiales que se pueden trabajar con la máquina.

7.3 Impresión 3D

La impresión 3D es un proceso de Manufactura Aditiva definido como “el proceso de unir material para hacer objetos desde un modelo 3D digital, usualmente a través de la superposición de capas” (H. Bikas, 2015).

Este proceso ha demostrado tener distintas ventajas para la industria; flexibilidad en los diseños con los que se puede trabajar, permite trabajar modelos 3D con geometrías más complejas; menor consumo energético, especialmente en comparación con máquinas de mecanizado por arranque de viruta; uso fácil y rápido, acortando tiempos de desarrollo. Esta tecnología está aún en una etapa de maduración por lo que se ha mantenido como una herramienta para procesos de prototipado rápido, mecanizado rápido, y reparación de equipos. Sin embargo, ésta está siendo rápidamente incorporada a diversas industrias como la automotriz, médica y aeroespacial.

Las impresoras 3D se han convertido en las principales herramientas en los procesos de prototipado rápido esto, debido a; su bajo costo, hoy se puede adquirir una máquina como esta por un costo de US100 a US 10.000; y su fácil integración con software 3D tipo CAD o prácticamente cualquier modelo 3D.

7.3.1 Repaso Histórico

La impresión 3D nace en el año 1983 a partir de la patente presentada por Charles Hull, mientras trabajaba en *Ultra Violet Products*; quien creó un método de fabricación que consistía en depositar una resina curable capa a capa con el fin de generar una geometría, este método es conocido hoy como estereolitografía.

De ahí en adelante se enmarcan los siguientes hitos:

1986: Profesores de la *University of Texas at Austin*, Carl Deckard and Joe Beaman patentan el concepto de *direct selective laser sintering* (SLS).

1988: Scott Crump patenta el concepto de *fused deposition modeling* (FDM), además de fundar Stratasys, una de las compañías más grandes a nivel mundial en impresión 3D industrial.

1990: Se crea la primera pieza impresa en 3D de metal, la que consiste en una pieza de cobre desarrollada a través de la técnica de *laser sintering*.

1993: Los inventores Toho y Yamamoto de la empresa Toho Titanium patentan la técnica *electron beam melting* (EBM).

1997: Toho Titanium y Chalmers University of Technology de Gothenburg codesarrollan una impresora de metal a través de la técnica *powder-bed melting* y EBM.

1999: El uso de órganos impresos en 3D en la cirugía se convierte en realidad cuando una vejiga urinaria cultivada en laboratorio se trasplanta con éxito en un paciente, utilizando la tecnología desarrollada por el Instituto Wake Forest de Medicina Regenerativa.

2004: Adrian Bowyer, profesor de ingeniería mecánica en la Universidad de Bath en los Estados Unidos, funda el proyecto RepRap, un proyecto de código abierto que tiene como objetivo fabricar una impresora 3D que pueda imprimir la mayoría de sus propios componentes.

2009: Fused Deposition Modeling (FDM) printing process patents expired in 2009.[26]

2009: Industrias *MakerBot*, una compañía de hardware de código abierto para las impresoras 3D, comienza la venta de kits de montaje que permiten a los compradores fabricar sus propias impresoras 3D y productos.

El desarrollo de los proyectos Prusa y la compañía *MakerBot* son los puntos de inicio de la irrupción de la impresión 3D de escritorio y de escala personal a costos accesibles a las personas. Es este momento el que convierte este método de fabricación en el generador de un potencial cambio en como vemos nuestras formas de consumir.

La irrupción de la impresión 3D, tanto en la industria como en la forma en que consumimos ha sido comparada con los *eBooks* o la música digital (Berman, 3-D printing: The new industrial revolution, 2011); ya que elimina la necesidad de inventarios, genera una entrega instantánea de los productos y aumenta la posibilidad de personalización. Sin embargo, se ha puesto atención en los efectos que esto podría tener en áreas como copyright y la violación de patentes.

Se ha llegado a plantear que la irrupción de la impresión 3D puede cambiar completamente como concebimos la industria del diseño y la fabricación, cambiando completamente como se construyen las cadenas de suministros actuales (Hornick, 2013).

7.3.2 Ventajas y desventajas comparativas de la impresión 3D

La impresión 3D es generalmente comparada con los 2 procesos de manufactura convencionales, como son la inyección de plástico, y la fabricación sustractiva a través de fresadoras. Pero últimamente también se ha comparado con una nueva tendencia en el diseño llamada “Personalización en Masa”. La personalización en masa consiste en el proceso de diseñar piezas modulares, entregándole al cliente la posibilidad de personalizar su compra bajo una serie de propuestas por parte del vendedor.

Entre las principales ventajas de esta tecnología se pueden analizar las siguientes (Berman, 3-D printing: The new industrial revolution):

- Capacidad de desarrollar productos personalizados, en pequeñas series a bajo costo.
- No hay necesidad de herramientas costosas.
- No requiere del diseño de moldes.

- Prácticamente no existen residuos, 40% menor a las tecnologías sustractivas.
- Gran parte de los materiales utilizado son reciclables.
- Muy compatible con la metodología “*Just in time*”, por lo que tiene un bajo gasto por inventario.
- Los archivos son estándar y por ende fáciles de compartir.
- Los productos finales son fáciles de modificar.
- Bajos costos fijos.

Sin embargo, existen razones por las que esta tecnología no ha sido adoptada como el nuevo estándar de manufactura en masa, y eso es porque presenta las siguientes desventajas:

- Alto costo para producciones en masa, en comparación con la inyección de moldes.
- Pocas opciones de materiales, colores y calidades superficiales.
- Baja precisión en comparación con otras tecnologías como el fresado.
- Bajas propiedades mecánicas como resistencia, mal comportamiento térmico y problemas con la humedad.
- Alto tiempo de fabricación por pieza para grandes series.

7.3.3 Evolución de la Impresión 3D

En su primera etapa, la impresión 3D fue utilizada principalmente por arquitectos, diseñadores o artistas en la construcción de mock-ups. Es importante destacar que este sigue siendo el principal uso de esta tecnología, producto de las siguientes razones:

- Los productos desarrollados son fáciles de reproducir y replicar.
- Bajo costo unitario.
- Seguridad en cuanto a la privacidad de los planos, ya que no es necesario enviarlos a fabricantes externos.
- Productos fáciles de modificar, por lo que se pueden probar distintas versiones y características hasta llegar al diseño óptimo.

La segunda fase en la evolución de la impresión 3D involucra la utilización de esta tecnología en la creación de productos terminados. Este proceso se ha denominado “Manufactura digital directa” o “mecanizado rápido”.

La Manufactura Digital Directa o *Rapid Tooling* en inglés es la combinación entre las metodologías de prototipado rápido, impresión 3D y mecanizado. Tienen como objetivo el desarrollo rápido de un molde. Este proceso nace desde la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D, y de diversificar los materiales con los que se puede trabajar.

Para el desarrollo de esta técnica se utiliza el proceso de *Investment Casting*, este proceso consiste en desarrollar un molde desde una pieza ya desarrollada. Por lo general esta pieza es impresa en 3D y el molde utilizado para desarrollar piezas de plásticos, silicona o metal. Se estima que para el año 2020, 50% de las piezas desarrolladas en una impresora 3D serán para desarrollar moldes (Berman, 3-D printing: The new industrial revolution).

La tercera fase de la impresión 3D ya está comenzando y es la masificación de esta tecnología, en donde cualquier persona podrá tener una impresora de escritorio e imprimir los productos que necesite.

Hoy en día existen impresoras con costos de US300¹ se estima que para el año 2025 el mercado de las impresoras 3D será de 6.4 billones de dólares (<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>, 2018).

¹ <https://www.creality3d.shop/collections/3d-printer/products/creality-ender-3-3d-printer-economic-ender-diy-kits-with-resume-printing-function-v-slot-prusa-i3-220x220x250mm>

7.3.4 Principios generales de funcionamiento de la Impresión 3D



Imagen 1 – Esquema de trabajo de la impresión 3D.

Tal como se muestra en la Imagen 1 el proceso de impresión 3D comienza con el desarrollo de un modelo 3D en un software de modelado computacional o CAD. A continuación, este archivo es enviado a un *Slicer* en formato .stl, este tipo de software divide en capas el archivo, con el fin de convertirlo en un conjunto de planos, desde este software obtendremos el código G, el cual le indicará a la máquina como moverse y que hacer para construir la pieza.

7.3.5 Métodos de Impresión 3D

Fuse Deposition Model (FDM): La tecnología FDM (por sus siglas en inglés) es el método de impresión 3D más común en impresoras 3D de escritorio. El filamento termoplástico se calienta y se extruye en coordenadas de X e Y a través del cabezal de extrusión, mientras que la superficie de impresión va bajando el objeto capa por capa en la dirección Z.

De este modo el objeto se imprime de abajo hacia arriba. Si se diera el caso de que un modelo tuviera partes que sobresalen, necesitará estructuras de soporte temporales que sean fáciles de remover.

Estereolitografía (SLA): Esta tecnología funciona mediante la exposición de una capa de resina líquida fotosensible a un rayo láser UV para que se endurezca y se solidifique. Una vez que el láser recorre una capa de resina en el patrón deseado, esta comienza a endurecerse. Acto seguido, la plataforma de impresión del modelo, situada en el tanque líquido de la impresora, baja una capa y el láser comienza a formar la siguiente capa. Cada capa se construye sobre la anterior.

Procesamiento Digital de Luz (DLP): La tecnología DLP usa una red eléctrica de micro espejos controlados por ordenador dispuestos en un molde sobre un chip semiconductor. Estos diminutos espejos se inclinan hacia adelante y hacia atrás. Cuando un espejo está inclinado, refleja la luz, lo que refleja un píxel brillante. Mientras que, si el espejo está inclinado hacia el lado opuesto, el píxel se volverá oscuro. Este tipo de tecnología se usa en proyectores de películas, teléfonos móviles y también para la impresión en 3D. Uno de los beneficios que presenta para la impresión 3D es su velocidad: puede imprimir capas en un instante.

Sinterizado selectivo por láser (SLS): La tecnología SLS (por sus siglas en inglés) es similar a la SLA, pero la principal diferencia está en que este tipo de impresora 3D utiliza material en polvo en el área de impresión en lugar de resina líquida. Se usa un láser para sinterizar selectivamente una capa de gránulos que une el material para crear una estructura sólida. Cuando el objeto está completamente formado, se deja enfriar en la máquina antes de retirarlo.

Fusión selectiva por láser (SLM): La tecnología de fusión selectiva por láser se considera a veces como una subcategoría del tipo de impresora 3D SLS. La tecnología SLM usa un rayo láser de alta potencia para fundir completamente polvos metálicos transformándolos en piezas sólidas tridimensionales.

Los materiales típicos utilizados en estos tipos de impresoras 3D son: acero inoxidable, aluminio, titanio y cromo-cobalto. La tecnología SLM se utiliza en la industria aeroespacial o de la ortopedia para crear piezas con geometrías complejas y estructuras de paredes delgadas, con canales ocultos o espacios vacíos.

7.3.6 El futuro de la impresión 3D

Las impresoras 3D de escritorio han democratizado la manufactura, entregándole herramientas de bajo costo a todo aquel que quiera construir sus propios bienes. En el análisis del crecimiento e impacto de la impresión 3D se suele hacer un paralelo con el internet o los computadores. Si el invento de los computadores fue la revolución digital en la capacidad de cómputo, el internet fue la revolución digital en las comunicaciones, las impresoras 3D y en general las máquinas de manufactura digital de escritorio son la tercera revolución digital, ahora en la manufactura (Gershenfeld, 2012).

Pero no son solo es la democratización de la manufactura, o la construcción local y a pequeña escala las áreas en que la impresión 3D ha tenido impacto. Como una nueva tecnología emergente, se están estudiando diversas aplicaciones en campos completamente diferentes, a continuación, se realizará un recuento de estos:

7.3.6.1 Arte y Moda:

Si bien la impresión 3D siempre se ha concebido como una revolución en la manufactura, y por ende más ligado a las industrias, la ingeniería y la robótica; los artistas y diseñadores no se han quedado atrás en el uso de esta tecnología.

Esta tecnología les entrego la posibilidad de realizar fácilmente sus esculturas, diseños y conceptos.



Imagen 2 y 3 - A la derecha una escultura impresa en 3D from Sculpteo, a la izquierda una Catrina Mexicana de Joshua Harker.

También al industria de la moda ha puesto sus ojos en esta tecnología; mientras New Balance desarrolla sus zapatillas con suelas impresas en 3D (So, 2019), Danit Peleg crea chaquetas completamente impresas en 3D (Peleg, s.f.), o vemos joyas y artesanías impresas en los más diversos materiales.

7.3.6.2 Medicina

Las aplicaciones en la medicina son más abundantes y van desde sueños lejanos hasta aplicaciones reales y concretas.

Existen un sinnúmero de personas a lo largo de todo el planeta desarrollando prótesis en impresión 3D con el fin de reducir los costos que estas tienen para las personas con algún tipo de discapacidad.



Imagen 4 – Prótesis de mano y pierna desarrolladas por la empresa colombiana, *Take a Hand*, quienes trabajan en Chile.

Por otro lado, empresas como BIOMODEX (C, 2017) están desarrollando impresiones 3D de los órganos o zonas del cuerpo a operar con el fin de permitir a los doctores tener entrenamientos y simulaciones lo más reales posibles. Esto es de suma importancia ya que se estima que los errores médicos son la tercera causa de muerte en los EEUU.

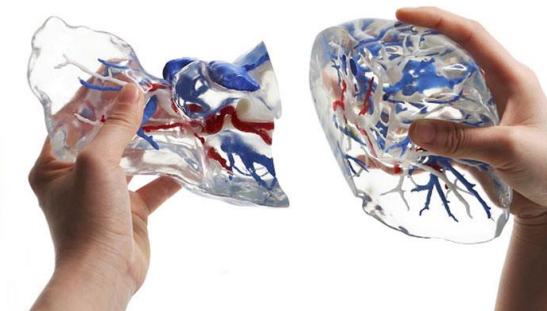


Imagen 5 – Replica de un riñón desarrollado por científicos de la Universidad de Hebei.

La impresión 3D de tejidos orgánicos consiste en la capacidad de imprimir células madre o cartílago con el objetivo de imprimir órganos o partes del cuerpo. Actualmente esta es una tecnología en desarrollo, y se utiliza para imprimir piel o cartílagos, solo con propósitos de investigación.

7.3.6.3 Arquitectura y Construcción

La impresión 3D es el aliado ideal de los arquitectos en sus procesos de construir maquetas, sin embargo, estos desarrollos han ido más allá, hasta impactar directamente la industria de la construcción.

Es importante destacar que esta industria es una de las más contaminantes del planeta, siendo la responsable de consumir un 50% de los recursos naturales, 40% de la energía, y de generar un 50% de los residuos. (Pacheco-Torgal, 2014)

El deseo de innovar y hacer de esta industria más eficiente y amigable con el medio ambiente ha llevado a adaptar la impresión 3D como una potencial tecnología para construir de forma local y con los materiales justos. Hoy en día ya se imprimen casas y estructuras de forma experimental.

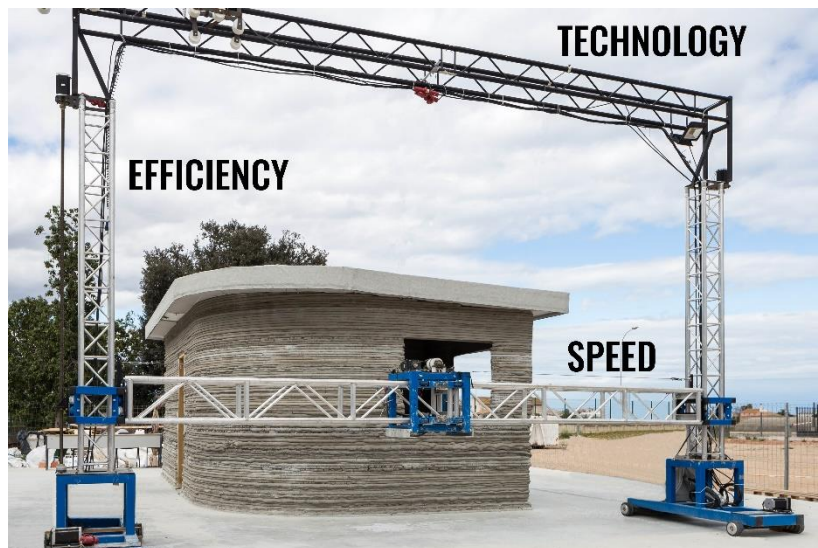


Imagen 6 – Casa impresa en 3D por la empresa Be More 3D.

Pero no es solo la impresión 3D in situ, sino que la fabricación de partes impresas para luego ensamblar una estructura final:



Imagen 7 – Edificio de la provincia de Jiangsu, China. Las paredes de estos edificios son impresas en 3D.

La impresión 3D en la construcción presenta las siguientes ventajas:

- Amigable con el Medio Ambiente: Se pueden utilizar materiales o residuos locales.
- Bajos costos: Se podría automatizar y generar cadenas de producción de edificios y estructuras.
- Tiempos más cortos de construcción: Esto entrega una mayor capacidad de respuesta en caso de necesitar construir viviendas de emergencias.
- Geometrías complejas: Permite la construcción de geometrías de mayor complejidad que en la construcción convencional.
- Alto potencial: La NASA ha puesto en la mira la impresión 3D para construcción de colonias en Marte.

7.3.6.4 Automotriz y Aeroespacial

El diseño generativo o *generative design* es un proceso de diseño iterativo que genera un modelo 3D a partir de unas condiciones de borde.

Este proceso ha llamado la atención de la industria automotriz y aeroespacial por la posibilidad de desarrollar piezas más resistentes y livianas; además de llevar un proceso de diseño más rápido, automatizado y con menos residuos.



Imagen 8 – Pieza desarrollada utilizando el software *Frustrum*, pionero en el diseño generativo. Podemos ver como la densidad de material utilizando va disminuyendo de izquierda a derecha.

Si bien esto aún se encuentra en etapa experimental, a continuación, se mostrarán algunos ejemplos de usos del diseño generativo en estas industrias:



Imagen 9 – Chasis de un auto diseñado a través de software de diseño generativo de Autodesk.

7.3.7 Materiales

Como una industria emergente, la impresión 3D debe ser capaz de diversificar los materiales con los que trabaja si quiere permear de lleno en la industria. Con este fin es que se están desarrollando máquinas y métodos con los que se podrían imprimir nuevos materiales. A continuación, se presentarán los materiales más usados actualmente en impresión 3D; sus aplicaciones, beneficios y desventajas.

Hoy en día el material más usado en las tecnologías de manufactura aditiva son plásticos, como el PLA (ácido poli láctico), ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) o PETG (Tereftalato de polietileno). Con el fin de darle más capacidades a esta tecnología es que se investiga el trabajo con metales, cerámicos, compuestos, tejidos biológicos o concreto. A continuación, se presenta una tabla con los materiales usados en la impresión 3D y el estado en que se encuentra su desarrollo.

Tabla 1 – Resumen de los estados de los materiales para impresora 3D en uso actualmente (Xin Wang, 2016).

Material	Método de Impresión	Aplicaciones	Beneficios	Desventajas
PETG	FDM	Prototipado Rápido	Bajo costo, Rápida fabricación, fácil uso	Malas propiedades mecánicas, mala calidad superficial.
PLA				
ABS				
NYLON				
Cerámica	SLS	Biomédico, electrónica, aeroespacial, estructuras livianas, intercambiadores de calor	Alta calidad, resolución fina	Método lento, costoso, alta porosidad
Metal y aleaciones				
Polímeros				
Tinta	Ink Jet	Biomédico, grandes	Rápida impresión,	Mala adhesión
Pastas				

Cerámica	<i>Contour Crafting</i>	estructuras, edificios	capacidad de imprimir grandes estructuras	entre capaz, mala calidad superficial, alta porosidad
Concreto				
Tierra				
Resina	Estereolitografía	Prototipado Rápido, Biomédica	Alta calidad, resolución fina	Proceso lento, costoso

Tabla 2 – Materiales experimentales en impresión 3D.

Material	Aplicaciones	Beneficios	Desafíos
Metales y aleaciones	Aeroespacial y automotriz Militar Biomédica	Personalización en masa Bajo desperdicio de materiales Menor cantidad de piezas a ensamblar Fácil reparación de los sistemas	Limitada gama de aleaciones Baja calidad superficial Baja tolerancia dimensional Necesidad de realizar un post proceso.
Polímeros y compuestos	Aeroespacial y automotriz Medica Arquitectura Juguetes Deportes Biomédica	Prototipado rápido Bajos costos Geometrías complejas Personalización en masa	Bajas propiedades mecánicas Limitada gama de polímeros y resinas Propiedades mecánicas anisotrópicas

Cerámicas	Biomédica Aeroespacial y automotriz Química	Control de porosidad de las capas Impresión de estructuras complejas, andamios y soportes con aplicaciones en construcción y desarrollo de órganos humanos Bajo tiempo de fabricación	Baja gama de cerámicas con capacidad de ser impresas en 3D Baja calidad superficial Baja precisión dimensional Requiere postproceso
Concreto	Construcción	Personalización en masa No requiere de encofrado Menor impacto ambiental Menor necesidad de espacio para construir Requiere menos mano de obra	Baja calidad superficial, atentando a la estética de las estructuras Propiedades mecánicas anisotrópicas Mala adhesión entre las capas Dificultad de escalar a grandes estructuras Número limitado de métodos de impresión

8 Modelos actuales de extrusión para materiales viscosos

A lo largo de este capítulo se analizarán diferentes métodos utilizados actualmente para extruir materiales viscosos. Se analizarán por separado las formas en que el material es extruido; la presencia de tanques de almacenamiento para este; y los sistemas mecánicos para mover el material o extrusor, dependiendo del sistema. Se hará un especial énfasis en las ventajas y desventajas de cada sistema, sus usos actuales en la industria, y en qué casos usarlo.

8.1 Sistemas de Extrusión Directos

8.1.1 Sistema Neumático Directo

Este sistema funciona a través de una jeringa, normalmente de un volumen de entre 60 – 100 mL, la que es llenada con un material viscoso. Esta jeringa es tapada por una pieza que solo permite la entrada de aire desde una bomba, aumentando la presión interna en la jeringa empujando el material hacia afuera.

Este sistema es utilizado principalmente en la extrusión de pasta de soldar para placas electrónicas. Sin embargo, se ha comenzado a utilizar para extruir material biológico en impresoras 3D de cartílago o células madre.

En el mercado del desarrollo de placas electrónicas (PCB) existen máquinas que extruyen pasta de soldar, un material viscoso que contiene partículas de estaños. A esta pasta se le aplican altas temperaturas con el fin de derretirla lo que dejará las zonas de cobre de la placa cubiertas de estaño. Este método facilita la soldadura de circuitos electrónicos.

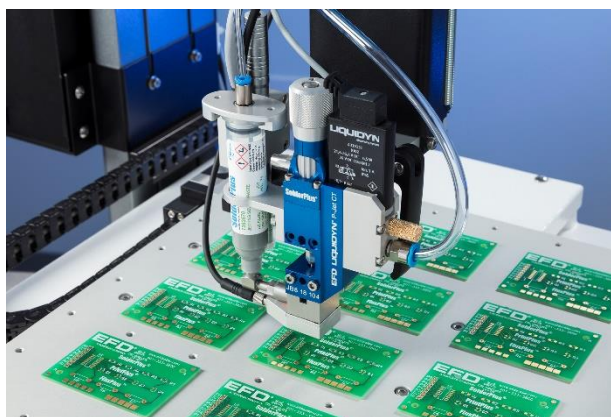


Imagen 10 – Sistema de extrusión de pasta de soldar de la máquina *Nordson EFD* (EFD, s.f.).

Tabla 3 – Características del sistema de extrusión neumático directo.

Volumen Aprox. Material	60 - 100 mL
Tipo de empuje	Neumático
Sistema separado Tanque-Extrusor	No

Ventajas de este sistema:

- Boquilla pequeña, lo que permite una mejor calidad dimensional.
- Ligero.
- Simple, pocos componentes.
- Diversidad de boquillas, permitiendo variar el ancho de líneas final.

Desventajas:

- El material a trabajar va almacenado directamente en el extrusor, aumentando el peso de este para grandes volúmenes. Esto aumenta la inercia del cabezal dando una mayor posibilidad de tener *backlash*.

- Requiere de altas presiones neumáticas para trabajar con materiales más viscosos, por lo que se necesitan equipos de alto costo.
- El aire como material compresible tiene un comportamiento errático, generando un flujo poco constante a altas presiones.
- Requiere de un sistema de control que no está contenido en las placas estándar.

8.1.2 Sistema mecánico directo

Este sistema es muy similar al sistema neumático directo, pero en lugar de empujar el material con aire desde una jeringa, se empuja utilizando directamente un motor, el cual a través de un tornillo sin fin empujará un embolo el que está en contacto directo con el material.

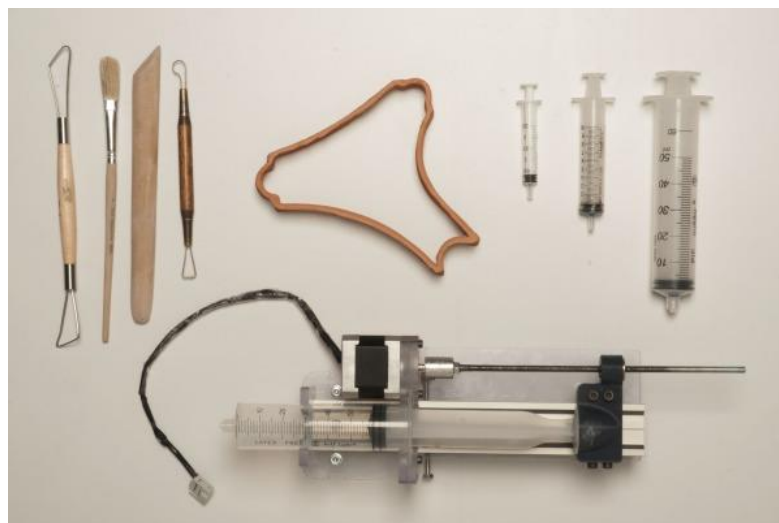


Imagen 11 – Extrusor mecánico directo, para materiales cerámicos y comida desarrollado en el +LAB, laboratorio del Politécnico de Milano centrado en el desarrollo de impresión 3D (Natale, 2016).

Tabla 4 - Características del sistema de extrusión mecánico directo.

Volumen Aprox. Material	60 - 250 mL
Tipo de empuje	Mecánico, a través de un embolo
Sistema separado Tanque-Extrusor	No

Ventajas:

- Mejor control del flujo.
- Mejor control de la presión ya que no utiliza un material compresible como el aire.
- Bajo costo.
- Pocos componentes.

Desventajas:

- El material a trabajar se va almacenado directamente en el extrusor, aumentando el peso de este para grandes volúmenes. Esto aumenta la inercia del cabezal dando una mayor posibilidad de tener *backlash*.
- Mayor peso en el extrusor en comparación con el sistema neumático para los mismos volúmenes, producto de tener el motor directo en el extrusor.
- Mayor volumen en el extrusor en comparación con el sistema neumático lo que disminuye el área de trabajo en el plano XY.

8.1.3 Sistema Hidráulico Directo

Este sistema es muy similar al sistema neumático, pero en lugar de impulsar el material utilizando aire, lo hace empujando un embolo con agua, la que tiene la característica de ser un material incompresible, manteniendo un flujo más constante y manejable.

Un motor empuja el embolo de una jeringa llena de agua, la que a su vez empujará el embolo de una jeringa que está rellena del material a extruir.



Imagen 12 – Impresora 3D de arcilla, greda y silicona desarrollada en el Fab Lab UChile (Joakin Ugalde, 2018).

Tabla 5 - Características del sistema de extrusión hidráulico directo.

Volumen Aprox. Material	60 - 250 mL
Tipo de empuje	Hidráulico, a través de un embolo
Sistema separado Tanque-Extrusor	No

Ventajas:

- Mejor control de flujo, al trabajar con un material no compresible.
- Bajo costo.
- Materiales de uso comunes y fáciles de encontrar.

Desventajas:

- Se compone de dos subsistemas.
- El material a trabajar se va almacenado directamente en el extrusor, aumentando el peso de este para grandes volúmenes. Esto aumenta la inercia del cabezal dando una mayor posibilidad de tener *backlash*.
- Mayor peso en el extrusor que el sistema neumático directo, e incluido que el sistema mecánico directo para grandes volúmenes, ya que la jeringa extrusora no solo almacena el material a extruir, sino que además el agua para empujar.

8.2 Sistema de Extrusión Indirecto – Bomba de Arquímedes

Producto de la limitación que existe en los volúmenes de material que los sistemas indirectos son capaces de extruir, es que se desarrollan los sistemas indirectos. En estos sistemas el material a extruir no está almacenado directamente en el extrusor, sino que es alimentado a este a través de un tanque.

Con el propósito de controlar el flujo de material que proviene desde el tanque es que se utiliza una Bomba de Arquímedes.

Las bombas de Arquímedes utilizan un *Auger Screw* para mover material a través de un cilindro. La rotación del tornillo generará esfuerzo de corte en el fluido generando un desplazamiento de este a través del cilindro (Dixon, 2010).



Imagen 13 – Extrusor indirecto basado en una Bomba de Arquímedes desarrollado por la empresa Wasp (Moretti, 2016).

8.2.1 Características claves de diseño en un *auger screw*, y como estas afectan el flujo de material

Revoluciones por Minuto: La velocidad de giro del tornillo afectará la presión de salida del material, el flujo de este, y el consumo de potencia del sistema.

No existe una sola regla para esto, ya que la relación de estas variables no es lineal, pero existen los siguientes principios:

- La velocidad de rotación del tornillo debe coincidir con el caudal de alimentación desde el tanque con el fin de evitar cavitación.
- La recomendación es utilizar velocidades menores a 800 [RPM].
- A mayor velocidad de rotación, más presión en la salida, lo que puede producir *backflow*. Por lo que existe un punto en el cual mayores velocidades no generan mayores flujos.
- A mayor velocidad mayor consumo de potencia.

Área Superficial: Este es uno de los factores que más influye en el flujo de material. Con el fin de obtener un mayor flujo de material, se recomienda trabajar con cortes superficiales en el tornillo, ya que cortes muy profundos favorecen el *backflow* del material a través del centro del tornillo.

Calidad Superficial: Superficies ásperas o porosas tienden a arrastrar más material que las superficies pulidas.

Profundidad de los cortes: Los cortes profundos tendrán una mayor sección transversal para que el fluido se mueva. Por eso es que los tornillos con cortes profundos son útiles para mayores flujos, sin embargo, aplican una menor presión y favorecen el *backflow*.

Geometría del corte: Para dos tornillos con parámetros iguales, los cortes redondos entregan una mayor superficie de contacto, lo que permite empujar más material por rotación en comparación con cortes más agudos.

Paso: El paso del tornillo afectará la capacidad de este para generar presión, y la retención de material cuando este no esté girando. A mayor paso, mayor presión y retención de material; sin embargo, el flujo será más pulsado y menos constante.

Holgura: La distancia que exista entre el tornillo y el tubo que lo contenga es uno de los factores claves para determinar el flujo máximo del material. Para holguras de 1[mm] el tornillo puede generar altas presiones sobre el fluido. A mayor holgura menor es la capacidad de generar presión sobre el fluido ya que aumenta el *backflow*. Sin embargo, holguras muy pequeñas no son recomendables para materiales con grandes partículas ya que estas se pueden atorar entre el tornillo y el cilindro que lo contiene.

8.3 Tanque:

El sistema de extrusión indirecto requiere de un tanque que lo alimente de material. Este también requiere de un mecanismo para empujar el material. A continuación, se mostrarán los distintos tanques que existen actualmente poniendo énfasis en sus ventajas y desventajas.

Al igual que en los equipos directos, las dos formas utilizadas para empujar el material son neumáticas o mecánicas a través de émbolos.

Ventajas de los sistemas de tanque:

- Capacidad de aplicar un mayor torque desde la fuente de presión, para ambos sistemas. Esto permite extruir materiales más viscosos y mayores volúmenes.
- Capacidad de extruir mayores volúmenes sin aumentar la inercia en el extrusor.

Desventajas:

- Necesidad de equipos de mayor potencia y más costosos.
- Mayores distancias de desplazamiento para el fluido, lo que aumenta la carga por fricción y por ende la presión que se debe ejercer.
- Constantes cambios de áreas en la transmisión del fluido, lo que aumenta la presión necesaria.
- Requiere de equipos anexos a la impresora, los que no están controlados desde las placas estándar, lo que requiere del desarrollo de electrónica específica para controlarlos.

8.3.1 Jeringa Neumática

Este sistema es el más similar a los sistemas directos, sin embargo, soluciona las variaciones del flujo de material que producen los cambios de presión en la bomba de aire a medida que el

material es extruido. Esto se logra a través de la combinación de una jeringa que almacena material, la que alimenta un *auger screw* a través de presión neumática.



Imagen 14 – Diseño de un sistema que combina una jeringa neumática y un auger screw desarrollada por Kevin Lee para extruir pasta de soldar (Lee, 2015).

Ventajas:

- Sistema simple de controlar a través de un *Slicer*.
- Materiales de bajo costo.
- Mejor control de flujo en comparación con el sistema neumático directo.

Desventajas:

- El material a trabajar se va almacenado directamente en el extrusor, aumentando el peso de este para grandes volúmenes. Esto aumenta la inercia del cabezal dando una mayor posibilidad de tener *backlash*.

- Volumen de impresión limitado.
- Requiere de un sistema de control que no esté contenido en las placas estándar.

8.3.2 Tanque de Almacenamiento

Este sistema consiste en un tanque que no va directamente en el extrusor, sino que alimenta un *auger screw*, reduciendo el peso y la inercia de este con el fin de trabajar con mayores volúmenes de material y así hacer piezas más grandes. Al igual que los demás sistemas, este puede ser impulsado por un tornillo mecánico o a través de un sistema neumático.

8.3.2.1 Tanque Neumático

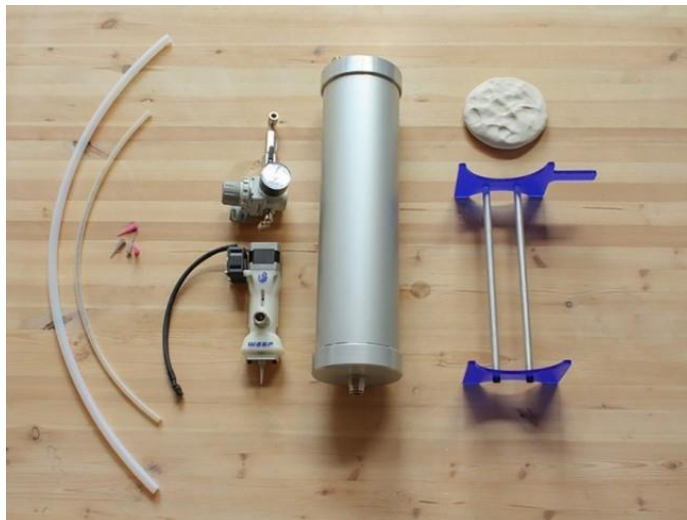


Imagen 15 – Sistema de extrusión de cerámicas desarrollado por la empresa Wasp, basado en un tanque neumático (Scan-Express, s.f.).

Ventajas:

- Menor inercia en el extrusor, permitiendo mayores volúmenes de impresión, velocidades y aceleraciones.

- Capacidad de trabajar con presiones mayores, y por ende con materiales más viscosos.

Desventajas:

- El sistema requiere de grandes bombas de aire, las que son ruidosas o costosas.
- Mayores costos en comparación con los equipos directos.
- Requiere de un sistema de control que no se incluye en las placas estándar.
- Requiere de un algoritmo de control para la presión interna, con el fin de mantenerla constante.
- Mayores presiones aumentan la aparición de fugas.
- Requiere transportar el material a través de distancias mayores, lo que provoca pérdidas de carga.

8.3.2.2 Tanque Mecánico

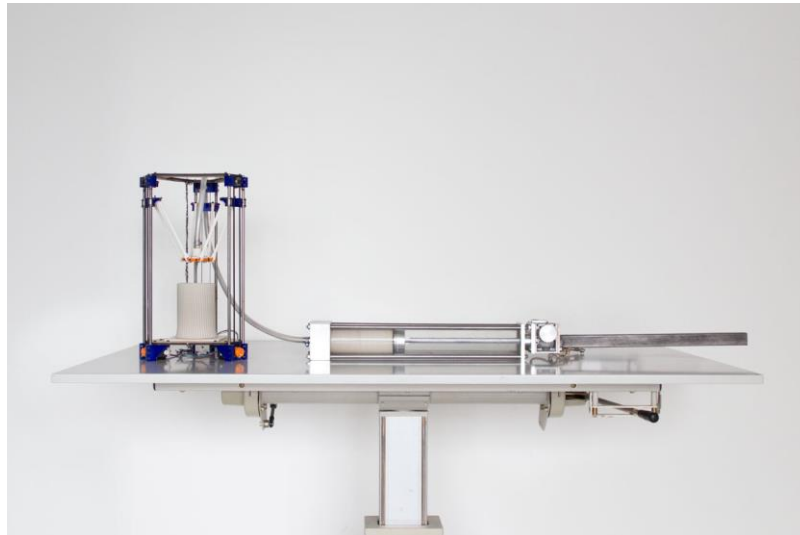


Imagen 16 – Tanque mecánico desarrollado por Olivier Van Herpt (Herpt, 2013).

Ventajas:

- Menor inercia en el extrusor, permitiendo mayores volúmenes de impresión, velocidades y aceleraciones.
- Capacidad de trabajar con presiones mayores, y por ende con materiales más viscosos.
- Componentes menos costos y más accesibles en un laboratorio de desarrollo.

Desventajas:

- Mayor cantidad de componentes, y por ende más difícil de ensamblar.
- Requiere de un sistema de control que no se incluye en las placas RAMPS.
- Mayores presiones aumentan la aparición de fugas.
- Requiere transportar el material a través de distancias mayores, lo que provoca pérdidas de carga.

8.4 Sistemas Mecánicos

A continuación, se presentarán las distintas estructuras mecánicas que se utilizan para desarrollar los brazos que moverán el extrusor. Se señalará cuáles son sus ventajas y desventajas, y que tipos de extrusores funcionan mejor con estos.

8.4.1 SCARA

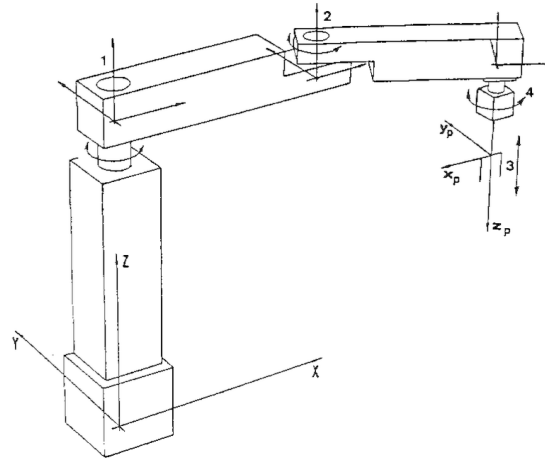


Imagen 17 – Estructura de un robot Scara. (Incerti, 2000)

Los brazos SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), fueron desarrollados en el año 1981 por Hirosho Amkino, profesor de la *University of Yamanashi*. Este sistema mecánico horizontal, que se caracteriza por la capacidad de rotar el plano XY, y de moverse de forma vertical en el eje Z. Con el paso del tiempo se le han agregado más grados de libertad, como podemos notar en Imagen 17. Su principal uso en la industria es en tareas de *pick and place* (Kahirul, 2011).

Ventajas:

- Pequeñas distancias entre la base del eje Z y el punto de impresión, disminuye el torque provocado por la masa de material a extruir en los sistemas de extrusión directa.
- Permite generar estructuras más robustas con el fin de reducir las vibraciones.
- Sistema ideal para poder trabajar con estructuras de mayor volumen ($>1[m]$).
- Su geometría permite trabajar de mejor forma en coordenadas no cartesianas, lo que permite trabajar de forma más eficiente con geometrías cilíndricas.

Desventajas:

- Mecanismo no estándar de una impresora 3D, por lo que requiere que el usuario aprenda un nuevo *workflow*.
- Requiere de la construcción de estructuras más robustas, y por ende de mayor costo en los materiales.
- Este mecanismo no está disponible normalmente en espacios tipo Fab Lab.

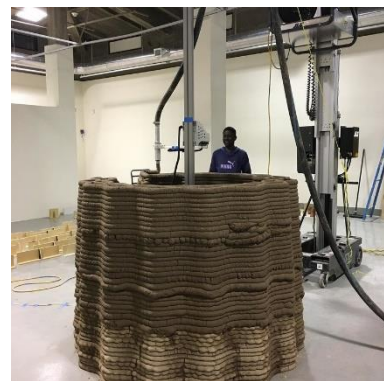


Imagen 18 y 22 – Ejemplos de robots SCARA utilizados en la impresión 3D de materiales viscosos (Plotter, s.f.).

8.4.2 Brazo Robótico

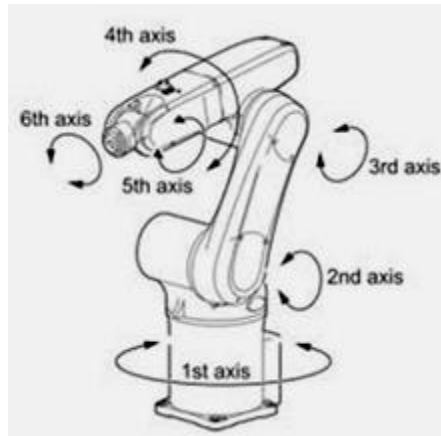


Imagen 19 – Diagrama del sistema mecánico de un brazo robótico de 6 GDL.

Un brazo robótico corresponde a un sistema mecánico, generalmente de 6 grados de libertad, programable, con funciones similares a las de un brazo humano. Generalmente se compone de 7 segmentos, los que van unidos en sistemas que permiten el desplazamiento lineal o rotatorio (Rahul, 2017).

Ventajas:

- Sistema robusto, ideal para trabajar con grandes volúmenes y extrusores directos.
- Su geometría permite trabajar de mejor forma en coordenadas no cartesianas, lo que permite trabajar de forma más eficiente con geometrías cilíndricas.
- Diversidad de usos, por lo general estos mecanismos tienen un cabezal intercambiable, por lo que este sistema podría cumplir diversas funciones de fabricación digital, no solo la extrusión de materiales viscosos.

Desventajas:

- A medida que el eje Z va aumentando su tamaño, el sistema se hace más costoso, menos robusto y por ende menos confiable.
- *Workflow* distinto al común de las impresoras 3D.
- Para pequeños volúmenes, los diseños actuales son muy costosos o inestables para los pesos con los que se trabajará.

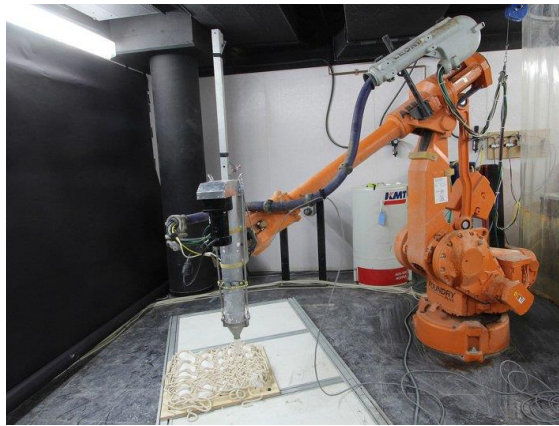


Imagen 20 – Robot Kuka con un cabezal la impresión 3D de cementos, proceso que está siendo investigado con el fin de utilizar estos mecanismos en la construcción (Deyle, 2013).

8.4.3 Delta

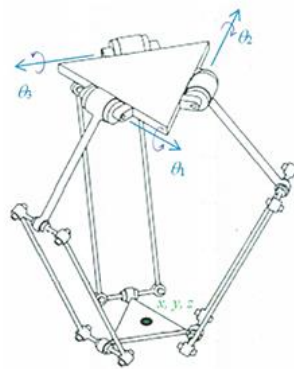


Imagen 21 – Diagrama del sistema mecánico de un robot tipo Delta, detallando sus grados de libertad.

La configuración de un robot Delta, es una de las configuraciones más recientes en el desarrollo de geometrías para robots. Este sistema se compone de 3 brazos ensamblados con una geometría prismática, los que concurren en el cabezal de la máquina. Los motores se ubican en la zona superior de la máquina, y no se trasladan con el cabezal, reduciendo el peso de este, lo que le otorga altas aceleraciones y velocidades (Wilson, 2015).

Ventajas:

- El reducido peso en el cabezal permite trabajar con mayores velocidades y aceleraciones.
- Su geometría permite trabajar de mejor forma en coordenadas no cartesianas, lo que permite trabajar de forma más eficiente con geometrías cilíndricas.
- Fácilmente redimensionable en el eje Z.

Desventajas:

- Carga útil máxima de 8[kg].

- Menos preciso en el diseño de piezas con geometrías rectangulares.
- Calibración tediosa.
- Sistema más escaso y por ende menos documentado.

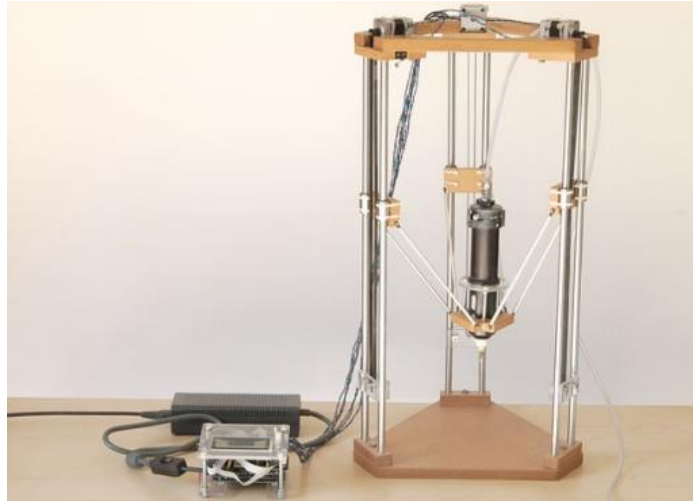


Imagen 22 – Impresora 3D Delta para cerámicas, modelo *OpenHardware* desarrollada por Jonathan Keep. (Keep, 2015)

8.4.4 Sistema Cartesiano

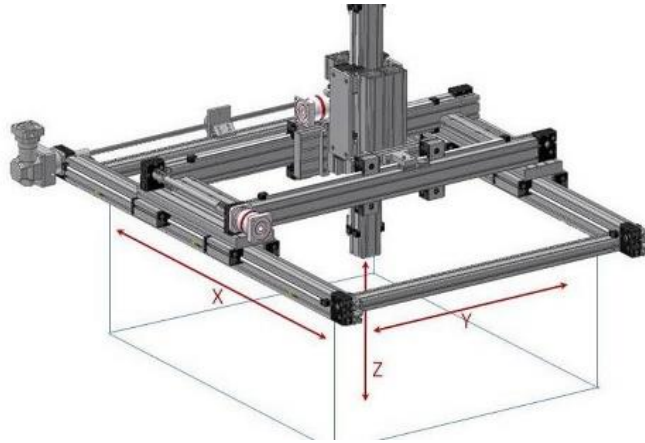


Imagen 23 - Diagrama del sistema mecánico de un robot cartesiano de 3 ejes, detallando sus grados de libertad (Macron, s.f.).

Los sistemas mecánicos cartesianos son aquellos que se mueven en 3 ejes ortogonales, por lo general definidos como X, Y y Z, si bien desarrollos modernos han llegado a aumentar el número de grados de libertad, llegando a los 7, los 3 ya mencionados son la estructura básica de estos robots y la base para el movimiento de los otros 4 (Collins, 2018).

Ventajas:

- Modelo estándar para las impresoras 3D, lo que lo convierte en una estructura compatible con todos los *firmwares*, *workflows* y *Slicers*.
- Sistema de bajo costo que se basa en materiales fáciles de encontrar.
- Fácilmente escalable a mayores volúmenes.
- Diversidad de subsistemas, como son el CORE XY, XY tables, y 2X-Y-Z; lo que permite adaptarse a las necesidades del diseñador.

Desventajas:

- Peor definición en geometrías cilíndricas o esféricas.
- Menor velocidad de impresión.
- Cada eje tiene su propia inercia.



Imagen 24 – Impresora 3D cartesiana de cerámica desarrollada por la empresa Stone Flower 3D (Stone Flower 3D, s.f.).

8.4.5 Sistemas de Base Móvil

Este sistema corresponde a un subsistema de los sistemas cartesianos y SCARA utilizado, producto de los problemas que estos tienen con altas inercias en sus planos XY.

A diferencia de los sistemas presentados anteriormente, en este el cabezal de la máquina solo se mueve en el eje Z, y es la mesa de la máquina la que se mueve en el plano XY.



Imagen 25 – Impresora 3D de cerámica con un sistema SCARA de base móvil desarrollada por la empresa Delta Bots (Delta Bots , s.f.).

Ventajas:

- Menor inercia en el plano XY, permitiendo trabajar con mayores velocidades y aceleraciones.
- Ideal para sistemas con extrusores directos.
- Escalable en su eje Z.
- Materiales fáciles de encontrar y de bajo costo.

Desventajas:

- Complicaciones con modelos muy altos y que utilizan materiales muy líquidos, ya que el movimiento de este puede generar su colapso.
- Produce vibraciones en modelos muy altos, por lo que este mecanismo está limitado en su eje Z.

9 La Máquina

Este capítulo tiene como objetivo presentar el estado inicial en el que se encontraba la impresora 3D con la que se trabajó, sus características mecánicas y de firmware con el fin de explicar las decisiones que posteriormente se toman en el desarrollo y adaptación de esta.

Tal como se explica en los objetivos, este desarrollo es adaptable a cualquier máquina, sin embargo, existen muchas decisiones que se tomarán en función de las características de esta. En el capítulo Resultados no solo se mostrará la implementación del sistema en esta máquina, sino que además en distintas máquinas con las que se ha trabajado.

9.1 HyperCube

La HyperCube es una impresora 3D desarrollado por el usuario del sitio web *Thingiverse* cuyo seudónimo es *Tech2C* (Tech2C, 2016). Esta máquina es un modelo *OpenHardware*, que se caracteriza por su bajo costo de desarrollo, simpleza y modularidad.

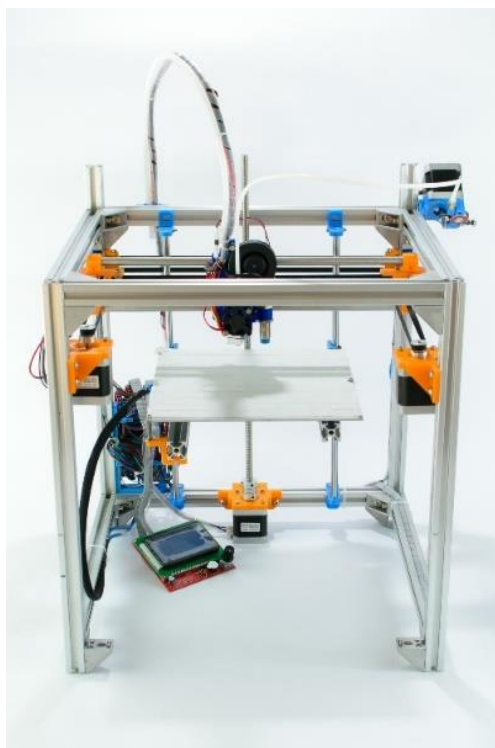


Imagen 26 – Impresora 3D HyperCube construida en Fab Lab UTFSM por el estudiante de Ingeniería en Diseño de productos, Javier de la Cerda.

9.1.1 Características de la máquina:

9.1.1.1 Características Generales

Tabla 6 – Características generales de la máquina HyperCube construida en Fab Lab UTFSM

Tipo de Impresora 3D	FDM
Volumen de impresión	300x300x300 [mm]
Motores	Nema 17
Placa Electrónica	RAMPS 1.4.4
Mecanismo en Z	Tornillo sin fin
Mecanismo en XY	CoreXY
Alimentación	12[V] 10[A]

9.1.1.2 Sistema Mecánico Eje XY

El sistema mecánico que utiliza esta máquina se denomina Core XY, es un sistema de dinámica paralela, desarrollado el año 2012 por Ilan E. Moyer, profesor del M.I.T., este sistema tiene las siguientes características claves (Moyer, 2012):

- Velocidad: La dinámica paralela, la cual mantiene a los motores estáticos en todo momento, permite trabajar con mayores aceleraciones en estos ejes.
- Simpleza: El sistema Core XY puede ser implementado fácilmente en cualquier máquina.
- Flexibilidad: El sistema es adaptable a cualquier tipo de material o tamaño.

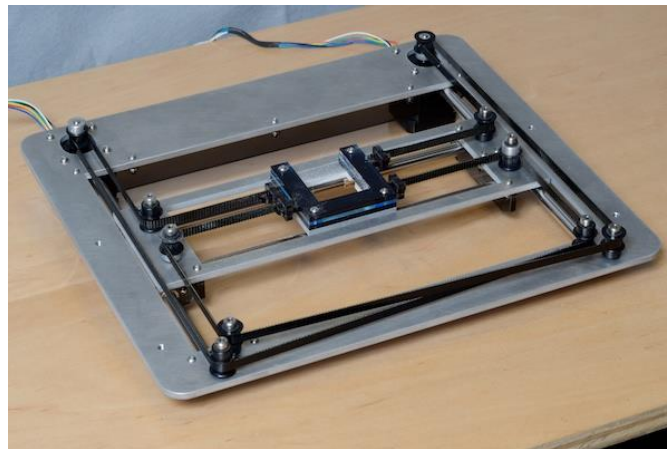


Imagen 27 – Sistema motriz CoreXY desarrollado por Ilan E. Moyer.

9.1.2 Marlin *Firmware*²

El *firmware* utilizado por la máquina se llama *Marlin*. Este fue desarrollado el año 2012 a partir de los firmwares *opensource* para el control de máquinas CNC; GRBL y *Sprinter*. Con el fin de poder controlar impresoras 3D por FDM, RepRap, sin embargo este desarrollo escalo hasta convertirse en uno de los estándares en el control de estas máquinas, pero lo que no solo está siendo usado por desarrolladores independientes sino también con fines comerciales por empresas como *Ultimaker*, *Printrbot*, *AlephObject*, *Prusa Research*, entre otras (João Brázio, 2011).

Las principales características de este *firmware* son:

- Capacidad de trabajar con aproximadamente 150 comandos estándar de GCode
- Soporta diversos sistemas de transmisión de movimiento como SCARA, Cartesiano, Delta, CoreXY, etc.
- Soporte para múltiples extrusores.
- Capacidad de imprimir desde tarjeta SD.
- Gama completa de posibles movimientos del GCode, líneas, arcos, curvas de *Bézier*.

Con el crecimiento del número de desarrolladores de impresoras 3D personalizadas, se crearon placas electrónicas especiales para utilizar con este *firmware*; estas placas son llamadas *RAMPS* y funcionan en el formato *Shield* de Arduino para un Arduino Mega (johnnyr, s.f.).

² <https://marlinfw.org/>

RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4

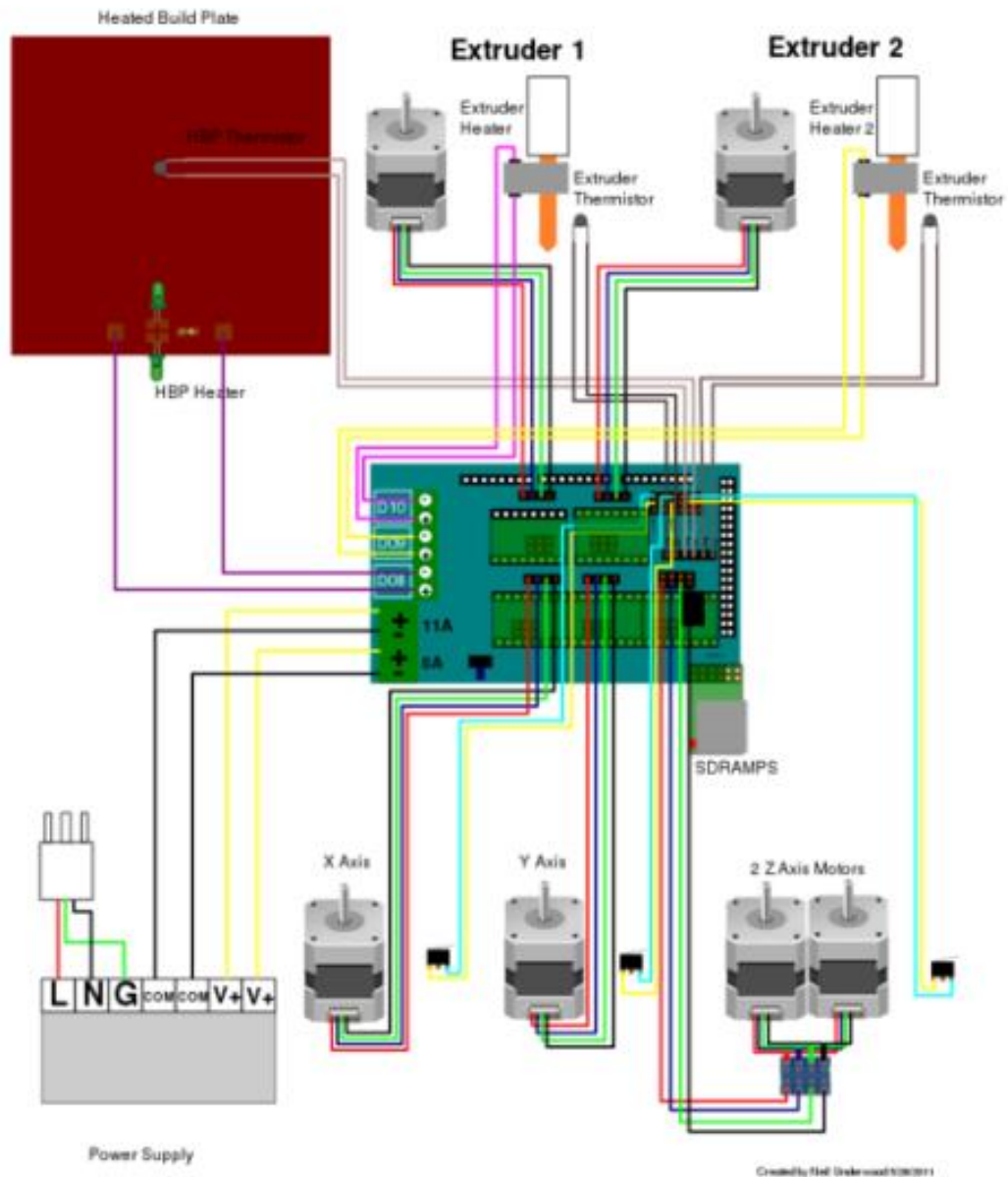


Imagen 28 – *Shield* de Arduino Mega RAMPS 1.4 mostrando los distintos componentes que pueden ser insertados en esta, lo que permite construir una impresora 3D completa.

10 Implementación

En el siguiente capítulo se presentará el proceso de desarrollo del sistema de extrusión de materiales viscosos. Durante este proceso se trabajó con distintos modelos ya presentados en el Capítulo 8, en primera instancia se presentará únicamente el proceso de construcción de estos sistemas, junto a algunas conclusiones específicas.

Es importante comprender que este desarrollo no se enmarca en un deseo puntual de tener maquinaria de manufactura aditiva para distintos materiales, sino que va más allá, y busca acercar el desarrollo de Bio Materiales o Bio Compuestos a la fabricación digital. El desarrollo de nuevos materiales tiene como requisito la posibilidad de utilizarlos en los procesos de fabricación actuales; lo que implica adaptarlos a los métodos existentes, o adaptar estos métodos a los nuevos materiales.

“Bajo una mirada técnica, el innovar en un nuevo campo, en este caso materiales, suele ir unido a la innovación de las herramientas que te permiten realizarlos.

Es por ello, desde diferentes partes del mundo, estamos investigando en la creación de nuevas técnicas y metodologías en las que la tecnología y biotecnología se unan creando un nuevo producto de valor agregado.

Productos como tazas de café hechas de café, o platos de hojas de banano no sería posibles sin la adaptación de las maquinarias y softwares industriales a estos nuevos materiales.” (Cijes, 2019)

Es por esto que no se puede concebir el desarrollo de un sistema sin considerar el desarrollo de su perfil en el software para control de la máquina, y las características propias del material a usar. Estos tres factores han ido generando cambios en cada uno de los subsistemas, llegando al punto de que la unión de los tres logró funcionar como un sistema completo. Este modelo se presenta en la Imagen 29.

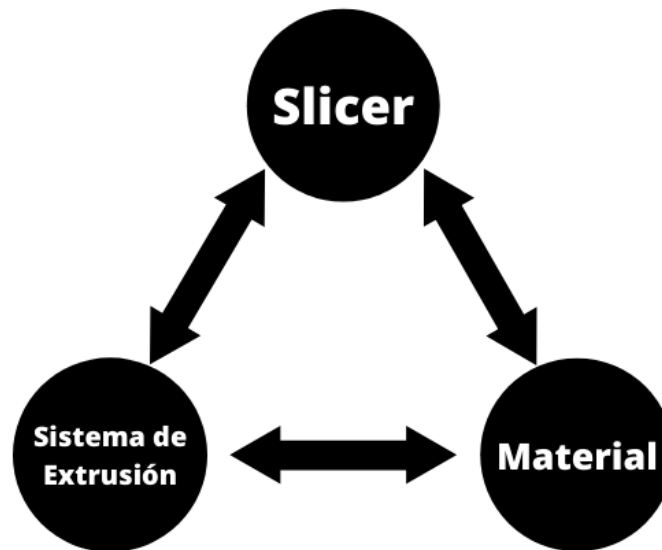


Imagen 29 – Relación de los 3 componentes claves del sistema de extrusión.

Durante este capítulo no solo se explicará la construcción del sistema de extrusión, sino que además el proceso desarrollado en la búsqueda de materiales aptos para la impresión 3D a partir de Arcilla, o BioCompuestos desarrollados a partir de residuos industriales, y los parámetros claves del perfil de *Slicer* desarrollado en el software Cura.

10.1 Arquitectura del Sistema

Con el fin de facilitar el entendimiento de las distintas relaciones mecánicas y electrónicas existentes en el sistema a trabajar, es que se muestra en la Imagen 30 la Arquitectura del sistema completo. Esta engloba el sistema de movimiento en 3 ejes, y los dos sistemas de tanques de alimentación desarrollados.

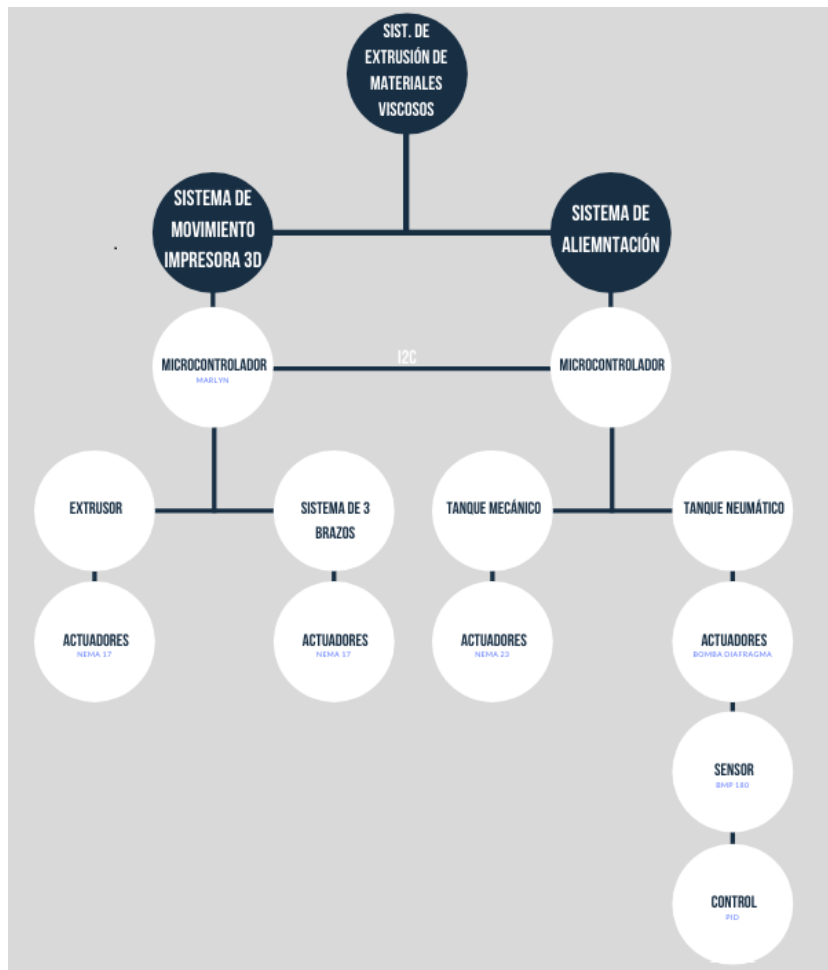


Imagen 30 – Arquitectura del sistema de movimiento y extrusión.

A continuación, se presentarán los distintos sistemas que se han desarrollado, dando especial énfasis en sus procesos de desarrollo y su funcionamiento. Al contrario de lo que se podría intuir, los sistemas se presentarán desde el de más abajo hasta arriba, de esta forma se profundizará en los desarrollos de esta tesis y no en aquello que ya se encuentra desarrollado. También se presentarán diagramas y arquitecturas de subsistemas para facilitar el entendimiento del lector.

10.2 Sistemas de Extrusión

10.2.1 Sistema de Alimentación Neumático

Este primer sistema se basa en el Jeringa Neumática presentado en la Sistema Neumático Directo o Tanque Neumático Tanque Neumático de subsistemas, y tiene como fin poder trabajar con pequeñas cantidades de material para poder probar mezclas de BioCompuestos o Arcillas.

El principal desafío de este sistema es mantener constante el flujo de material a pesar de la pérdida de este, lo que va disminuyendo la presión sobre el sistema. Con el fin de lograr esto es que se implementó un algoritmo de control PID, el cual será explicado más adelante.

En la Imagen 31 se muestra un render del sistema diseñado, desde el cual podemos ver el rotulo de las distintas partes que componen el sistema, las que están descritas en la

Tabla 7.

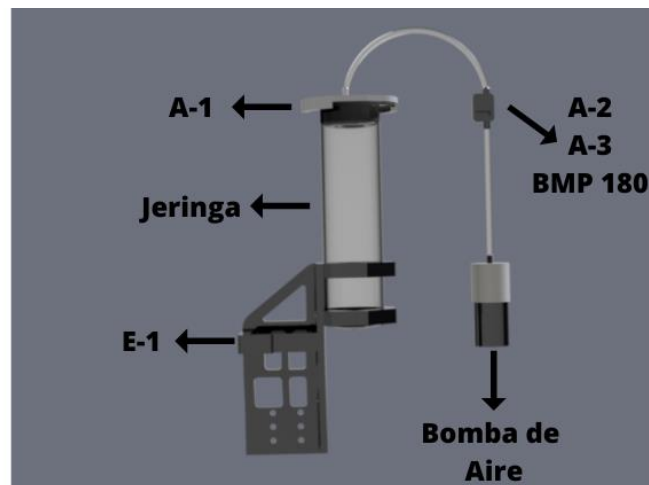


Imagen 31 – Render del sistema de alimentación neumático.

Tabla 7 – Tabla de componentes y piezas para el Sistema de Extrusión Neumática, tal como se muestran en la Imagen 31.

Nombre	Descripción	Sistema	Fabricación	Enlace descarga	Costo CLP
Jeringa	150 mL	Sistema Alimentación Neumática	Estándar		\$ 7.450
A-1	Sello para la jeringa	Sistema Alimentación Neumática	Impresión 3D	https://a360.co/2WIXQO2	-
BMP 180	Sensor de presión de aire	Sistema Alimentación Neumática	Estándar		\$ 2.300
Bomba de Aire	Diafragma	Sistema Alimentación Neumática	Estándar		\$ 5.490
A-2	Caja para sellado de sensor	Sistema Alimentación Neumática	Impresión 3D	https://a360.co/2tWThzV	-
A-3	Tapa de caja para sensor BMP 180	Sistema Alimentación Neumática	Impresión 3D	https://a360.co/36AvUtl	-
Conector Fitting Neumático	1/2 pulgada	Sistema Alimentación Neumática	Estándar		\$ 2.247

10.2.1.1 Sistema Neumático directo v/s Sistema Neumático Indirecto

Tal como se mostró en la sección Modelos actuales de extrusión para materiales viscosos, los sistemas neumáticos se pueden utilizar de forma directa Sistema Neumático Directo o indirecta Jeringa Neumática.

Se probaron ambos sistemas, y los resultados se presentan a continuación:



Imagen 32 – Diferencias de impresión para el sistema indirecto (izquierda) y directo (derecha).

Como podemos notar en la imagen el sistema de impresión directa no funciona, a continuación, se presentarán algunas de las conclusiones obtenidas de este desarrollo:

- Se requiere de un sistema de extrusión con mayor control desde el microcontrolador del sistema de movimiento impresora 3D, y no desde el del sistema de alimentación.
- Se espera que la boquilla de extrusión pueda cambiar su diámetro, para trabajar de mejor manera.
- Los pulsos que genera el PID (ver Imagen 48) no permiten obtener la calidad esperada en la impresión.

Como conclusión se opta por avanzar en el desarrollo de un sistema de alimentación indirecto, el cual requiere de la implementación de un *Auger Screw* (ver Sistema de Extrusión Indirecto

– Bomba de Arquímedes), al unir estos sistemas se obtienen resultados como los presentados en la Imagen 32, donde podemos notar una línea uniforme en las capas finales, y se obtiene un mayor control de la extrusión. Mas adelante en este capítulo se explicará el sistema de extrusión y sus principales características.

10.2.2 Sistema de Alimentación Mecánico

El siguiente sistema de alimentación se diseña con fin de entregarle a la máquina la capacidad de imprimir con mayores volúmenes de material, por lo mismo este sistema no puede ir directamente en el extrusor, sino que debe ir separado de la máquina. Para su desarrollo se opta por seguir el modelo de Tanque Mecánico, imitando el funcionamiento de un pistón.

Es importante destacar que desde su concepción el sistema completo, alimentador – extrusor está definido como sistemas separados y modulares, de esta forma los parámetros de impresión no dependerán del extrusor a usar.

Con el fin de no limitar el desarrollo a un material, o a ciertos componentes elegidos durante el desarrollo de esta tesis, es que las piezas se diseñan de forma paramétrica, tomando como parámetros iniciales las características de los componentes que el futuro usuario compré. A lo largo de este capítulo se presentarán las tablas con los parámetros modificables de cada pieza, y los componentes a los que esta se relaciona.

En la Imagen 33 se muestra un render del sistema diseñado, desde el cual podemos ver el rotulo de las distintas partes que componen el sistema, las que están descritas en la Tabla 18.

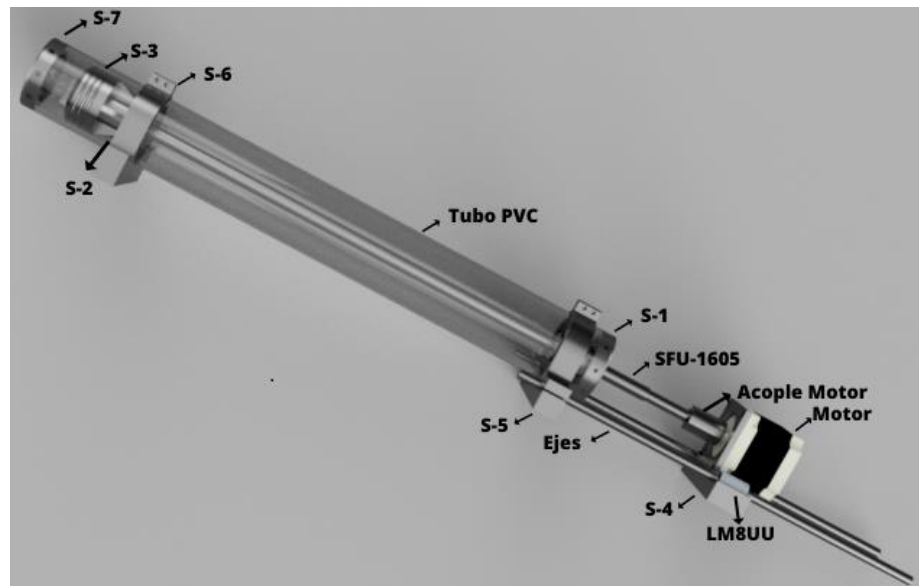


Imagen 33 - Render del sistema de alimentación mecánico.

Tabla 8 - Tabla de componentes y piezas para el Sistema de Alimentación Mecánico, tal como se muestran en la Imagen 33.

Nombre	Descripción	Sistema	Fabricación	Enlace descarga	Costo CLP
Tubo de PVC	Tubo de PVC en donde se almacena el material. DO: 51mm, DE: 59mm.	Sistema de alimentación Mecánico	Estándar	-	\$ 1.500
6000 2RS C3	Rodamiento de bolas	Sistema de alimentación Mecánico	Estándar	-	\$ 5.000
SFU1605	Husillo de bolas	Sistema de alimentación Mecánico	Estándar	-	\$ 11.642
S-1	Unión tubo de PVC - Hilo de potencia	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	https://a360.co/2GvVLle	-
S-2	Soporte del pistón	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	https://a360.co/2U5Pdrl	-

S-3	Pistón	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	https://a360.co/37zir6r	-
Nema 23	Motor para el hilo de potencia	Sistema de alimentación Mecánico	Estándar	-	\$ 23.521
S-4	Unión motora y ejes lineales	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	https://a360.co/36EFrjb	-
LM8UU	Rodamientos lineales	Sistema de alimentación Mecánico	Estandar	-	\$ 1.290
Axis	Ejes guías	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	-	-
S-5	Unión tubo de PVC - Ejes guía	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	https://a360.co/2RUYRe9	-
S-6	Unión Tubo de PVC - Tierra	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	https://a360.co/38MzBgQ	-
S-7	Tapa Tubo de PVC	Sistema de alimentación Mecánico	Impresión 3D	https://a360.co/3aPodTu	-
Conector Fitting Neumático	Conector manguera	Sistema de alimentación Mecánico	Estándar	-	\$ 2.247
O'ring	Sello pistón	Sistema de alimentación Mecánico	Estándar	-	\$ 1.200
Acople	Acople Motor - Hilo de potencia	Sistema de alimentación Mecánico	Estándar	-	\$ 2.200

Este sistema fue desarrollado únicamente de forma indirecta, después de notar las diferencias presentadas por ambos métodos, y mostradas en la Imagen 32. Por otro lado, la instalación de este sistema requeriría utilizar otro sistema motriz, ya que los grandes pesos, necesarias para impresiones en grandes volúmenes de material, provocarían vibraciones en el extrusor utilizado.

10.2.2.1 Diseño Paramétrico

Ya que este sistema se compone de una mayor cantidad de componentes estándar o difíciles de fabricar de forma digital (rodamiento, tubos de PVC son algunos ejemplos), es que todas las piezas se diseñan de forma paramétrica, con el fin de hacer fácil su modificación por parte de los futuros desarrolladores, y de esta forma la construcción no dependa de los materiales con los que cuentan, volúmenes que deseen trabajar, etc.

Fusión 360³, un software desarrollado por la empresa Autodesk entrega una forma simple de trabajar de forma paramétrica y remota, a través de tablas fáciles de modificar, y carpetas compartidas de forma en la *web*.

A continuación, se presentarán las piezas diseñadas, una breve descripción de sus funciones, y como esta se relaciona con las piezas estándar presentadas en la Tabla 8.

Con el fin facilitar el correcto entendimiento de los parámetros, se explicarán las siglas utilizadas a continuación. Dejando explicaciones específicas solo para casos en los que sea necesario:

- PVC: Todos los parámetros que contengan la sigla PVC corresponden al tubo de PVC encargado de almacenar el material.
- SFU: Todas las siglas SFU corresponden a parámetros estándar de los husillos de bolas SFU, se ingresaron al *software* utilizando las mismas siglas de la tabla DIN 69051 que puede ser encontrada en el Anexo 1.

³ <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators>

- Las siglas OD e ID se repetirán en distintos componentes y representan el *Outer Diameter* o Diámetro Exterior y el *Inner Diameter* o Diámetro Interior de dicho elemento.

10.2.2.1.1 S-1



Imagen 34 – Pieza S-1, donde podemos ver su relación con el husillo de bolas.

En la Imagen 34 podemos ver el resultado de la pieza S-1, fabricada a través de impresión 3D y como esta se relaciona con el tubo PVC, el husillo de bolas y el tornillo de sujeción que va entre la pieza y el tubo de PVC, la que corresponde a los parámetros con la palabra *Screw*. En la Tabla 9 podemos ver cuáles son los parámetros base entorno a los que se diseñó la pieza.

Tabla 9 – Parámetros base en el diseño de la pieza S-1.

Nombre Parámetro	Unidad	Valor Actual
PVC_ID	mm	51
Screw	mm	4

Screw_Deepness	mm	3,5
SFU_A	mm	48
SFU_H	mm	40
SFU_W	mm	38
SFU_X	mm	5,5
SFU_D	mm	28

10.2.2.1.2 S-2



Imagen 35 – Pieza S-2, donde podemos notar la perforación para que pase el husillo de bolas, y los tornillos que la unirán con la pieza S-3.

En la Imagen 35 podemos ver el resultado de la pieza S-2, fabricada a través de impresión 3D y como esta se relaciona con las piezas Tubo de PVC y husillo de bolas. Esta pieza además está diseñada para calzar con la pieza S-3 como podemos notar en la Imagen 33, por lo que existirá una relación en los parámetros de diseño de estas dos piezas. En la Tabla 10 se muestran los parámetros base para el diseño de la pieza.

‘

Tabla 10 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-2.

Nombre Parámetro	Unidad	Valor Actual
PVC_ID	mm	51
SFU_d	mm	16

10.2.2.1.3 S-3



Imagen 36 – Pieza S-3 donde podemos notar la misma geometría para los tornillos que en la pieza S-2, y los O’Ring necesarios para empujar el material de forma óptima.

En la Imagen 36 podemos ver el resultado de la pieza S-3, fabricada a través de impresión 3D y como esta se relaciona con las piezas Tubo de PVC, O’Ring y el rodamiento de bolas 6000 2RS C3.

Esta pieza además está diseñada para calzar con la pieza S-2 como podemos notar en la Imagen 33, por lo que los parámetros de estas piezas tendrán dependencias cruzadas, para que las relaciones sean siempre las mismas. En la Tabla 11Tabla 10 se muestran los parámetros base para el diseño de la pieza.

Tabla 11 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-3.

Nombre Parámetro	Unidad	Valor Actual
PVC_ID	mm	51
ORing_Thikness	mm	16
ORing_ID	mm	47,5
BallBearing_OD	mm	26

10.2.2.1.4 S-5



Imagen 37 – Piezas S-5 y S-6 con el tubo de PVC donde se almacenará el material.

En la Imagen 37 podemos ver el resultado de la pieza S-5, fabricada a través de impresión 3D y como esta se relaciona únicamente con el Tubo de PVC, las demás piezas no deberían variar,

por lo que estos parámetros no están incluidos como base. Todo lo utilizado en la pieza S-5 aplica para la pieza S-6, ya que a pesar de que no son exactamente iguales, la pieza S-6 es una derivación de la pieza S-5.

Tabla 12 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-5.

Nombre Parámetro	Unidad	Valor Actual
PVC_OD	mm	59

10.2.2.1.5 S-7



Imagen 38 – Pieza S-7 y su relación con el Tubo de PVC y el conector fitting neumático.

En la Imagen 38 podemos ver el resultado de la pieza S-7, fabricada a través de impresión 3D y como esta se relaciona con las piezas Tubo de PVC, y los tornillos que la unen a este.

En la Tabla 11 se muestran los parámetros base para el diseño de la pieza.

Tabla 13 - Parámetros base en el diseño de la pieza S-5.

Nombre Parámetro	Unidad	Valor Actual
PVC_ID	mm	51
Screw	mm	16
Screw_Deepness	mm	47,5

10.2.3 Extrusor

Al estar trabajando con un sistema indirecto, se debe desarrollar algún sistema de control para la extrusión de material, el cual sea controlado por el mismo microcontrolador que los brazos mecánicos, manteniendo la lógica que se utiliza actualmente en la impresión 3D FDM. Todo este sistema es controlado a través del *Firmware Marlin* como se explica en la sección *Marlin Firmware*.

El concepto nace a partir del desarrollo del Sistema de Alimentación Neumático, producto de los problemas que este presentaba para obtener una extrusión uniforme (para ver detalles de estos problemas dirigirse a la sección Sistema Neumático directo v/s Sistema Neumático Indirecto).

El desarrollo de este sistema se basa en el concepto previamente analizado; *Auger Screw* (presentado en la sección Sistema de Extrusión Indirecto – Bomba de Arquímedes), el cual nos entrega la posibilidad de manejar el flujo de fluidos a través del movimiento de un motor, lo que nos permite imitar el funcionamiento de una impresora 3D por FDM.

En la Imagen 39 se muestra un render del sistema diseñado, desde el cual podemos ver el rotulo de las distintas partes que componen el sistema, las que están descritas en la Tabla 14.

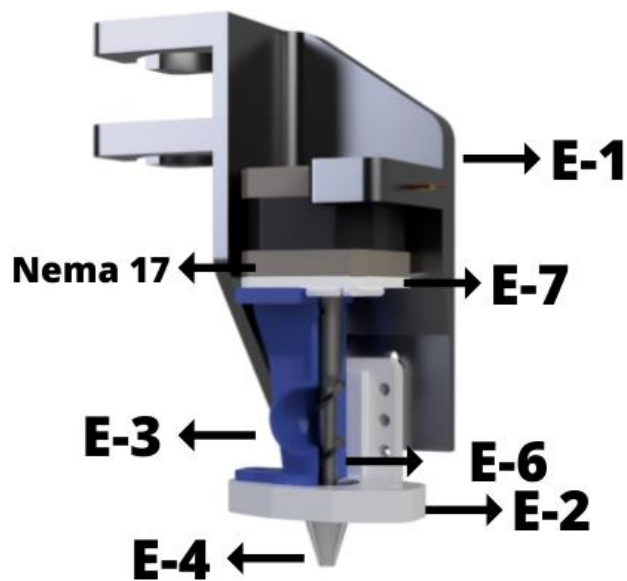


Imagen 39 - Render del Sistema de Extrusión

Tabla 14 - Tabla de componentes y piezas para el Sistema de Alimentación Mecánico, tal como se muestran en la Imagen 39.

Nombre	Descripción	Sistema	Fabricación	Enlace descarga	Costo CLP
Nema 17	Motor Nema 17	Sistema de Extrusión	Estándar		\$ 13.090
E-1	Unión Jeringa - Extrusor	Sistema de Extrusión	Impresión 3D	https://a360.co/2S9RgbV	-
E-2	Unión Extrusor - Máquina	Sistema de Extrusión	Impresión 3D	https://a360.co/36wnOC0	-
E-3	Extrusor	Sistema de Extrusión	Impresión 3D	https://a360.co/2HElloV	-
E-4	Boquilla	Sistema de Extrusión	Impresión 3D	https://a360.co/37xIJXO	-
E-5	Espaciador entre las piezas E-3 y E-2	Sistema de Extrusión	Impresión 3D por SLA	https://a360.co/36xuU9d	-

E-6	Auger Screw	Sistema de Extrusión	Impresión 3D	https://a360.co/2O70MLr	-
M-3 x 6	Tornillo prisionero para el Auger Screw	Sistema de Extrusión	Estándar		-
E-7	Tapa protectora para que no entre material al motor	Sistema de Extrusión	Impresión 3D	https://a360.co/2O2j7JC	-
Conector Neumático	Conector manguera	Sistema de Extrusión	Estándar		\$ 2.247

10.2.3.1 Diseño Paramétrico

Como se presenta en la sección Características claves de diseño en un *auger screw*, y como estas afectan el flujo de material, existen distintos parámetros claves a la hora de diseñar este sistema, que definirán la capacidad de este de generar el flujo de material. Por lo mismo se diseñó una pieza con la capacidad de variar estos parámetros, y de esta forma probar distintas características hasta obtener una combinación ideal. En la Tabla 15 se muestran los parámetros base en torno a los que fue diseñada la pieza, y a continuación se detallaran los que corresponden a parámetros claves en la definición de la capacidad de extruir de la máquina.

Tabla 15 - Parámetros base en el diseño de la pieza E-5.

Nombre Parámetro	Unidad	Valor Actual
<i>Angle</i>	deg	0,5
<i>Thread_Height</i>	mm	2,5
<i>N_Thread</i>	-	4
<i>Thread_Path</i>	mm	70

<i>Stem</i>	mm	26
<i>OD</i>	mm	6
<i>Hole_Diameter</i>	mm	5
<i>Motor_Hole</i>	mm	4,8
<i>Motor_Hole_Deepness</i>	mm	20

Con el fin de facilitar la comprensión de los parámetros base de diseño presentados en la Tabla 15 y que definen la capacidad de extrusión del sistema es que se presenta la Imagen 40, todas las explicaciones estarán basado en los parámetros presentados en esta.

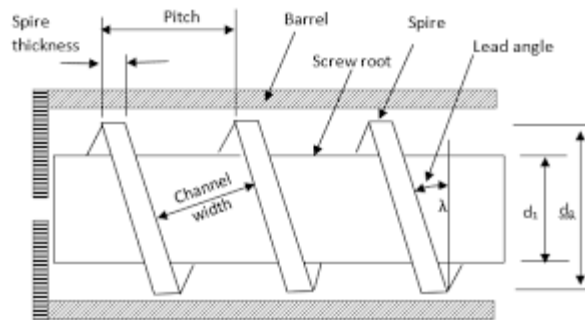


Imagen 40 – Parámetros clave de diseño de un *Auger Screw*.

- *Angle*: Corresponde al ángulo con el cual el valor d_1 varía a lo largo de la pieza.
- *Thread_Height*: Corresponde a la diferencia entre los valores d_1 y d_0 .
- *Thread_Path*: Corresponde al largo útil del *Auger Screw*.
- *N_Thread*: Corresponde a la cantidad de dientes que tendrá la pieza a lo largo del *Thread_Path*.



Imagen 41 – 3 versiones distintas del *Auger Screw* para los que se varió algún parámetro.

10.3 Sistema de Control

Tal como se muestra en la Imagen 30 el sistema se utilizan dos microcontroladores para controlar el sistema completo; un Arduino Mega junto a un *shield Ramp 1.4* (ver Imagen 28), y un Arduino Uno con un *shield “BioFeeder”* desarrollado como parte de este trabajo (ver Imagen 42).

Ambos microcontroladores se comunicarán entre ellos a través del protocolo I2C, donde el primero le enviará ordenes al segundo, con el objetivo de que el sistema alimentador puede ser controlado a través de código G, de todas formas, el segundo sistema tendrá independencia para que el usuario de la máquina pueda cambiar parámetros que no están funcionando bien a lo largo de la impresión.

10.3.1 Marlin4Clay⁴

Como se explica en la sección Marlin *Firmware*, Marlin es un *firmware* lector de código G diseñado para el uso específico de impresoras 3D por FDM. Esto último es de suma importancia ya que este tuvo que ser adaptado para poder ser usado en una máquina impresora de materiales viscoso.

Cambios realizados a la sección Configuration.h:

- Se anula el sensor de Temperatura del extrusor, ya que no se calentará el material. Este valor se cambia por el valor “*Dummy*” a través del comando `#define TEMP_SENSOR_0 999`
- Se comenta la sección `Heater_MAXTEMP` ya que esta tiene como objetivo proteger la cama y el extrusor de posibles sobrecalentamientos. Al no tener lecturas del sensor y trabajar con el valor *dummy* este error se activaba constantemente.
- Se cambia el valor `EXTRUDE_MINTEMP` a 0, ya que este valor está diseñado para evitar que se extruya cuando el valor leído por el sensor de temperatura es menor a este. Un error definido como *cold extrusión*.
- Se comenta la línea `#define PREVENT_COLD_EXTRUSION`.
- El error “Too long extrusión” está asociado a la línea `#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE` la cual también se comenta con el fin de no tener limite en los desplazamientos que le damos al extrusor. Esto ya que la velocidad de extrusión necesaria para extruir materiales viscosos llega a ser 1000 veces superior a la necesaria para extruir filamento.
- La variable `EXTRUDE_MAXLENGTH` se define como 100000000 para evitar el error mencionado anteriormente.

⁴ Enlace de descarga: https://github.com/josetomas/Marlin_ClayExtruder

- Se comentan las funciones `#define THERMAL_PROTECTION_HOTENDS` y `#define THERMAL_PROTECTION_CHAMBER` con el fin de evitar error por fallas de lectura al no usar un termistor ni tener sensor de temperatura para los extrusores y cama.
- Se eliminan los caracteres que dejan como comentario la línea `#define COREXY` con el fin de que el *firmware* esté habilitado para el mecanismo COREXY de la máquina.
- Se cambia la configuración de los finales de carrera a normalmente cerrado a través del comando `#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true`, donde *true* corresponde a normalmente cerrado y *false* a normalmente abierto. Esto aplica para todos los ejes.
- Se cambian las aceleraciones máximas a los siguientes valores `#define MAX_FEEDRATE_EDIT_VALUES { 3000, 3000, 100, 10000 }`.
- Se comenta la línea `#define Z_MIN_PROBE_USES_Z_MIN_ENDSTOP_PIN` ya que no se usa *probe*.
- Se deshabilitan los motores cuando no están siendo usados con el fin de reducir el consumo de voltaje y la temperatura de estos a través del comando `#define DISABLE_X true`.
- Se define la dirección de cada motor a través del comando `#define INVERT_X_DIR false`, fijando *true* o *false* dependiendo de la dirección necesaria. Se recomienda a los futuros usuarios definir esto en sus correspondientes máquinas.

Cambios realizados a la sección `Configuration_adv.h`:

- Se eliminan los caracteres que dejan como comentario la línea `#define EXPERIMENTAL_I2CBUS` con el fin de habilitar la comunicación I2C para poder comunicar ambos microcontroladores.

10.3.2 BioFeeder

Para el control de los distintos sistemas de alimentación se desarrolló una placa única en formato *Shield* de Arduino, llamada “*BioFeeder*”. Este *shield* le otorga al Arduino las siguientes capacidades:

- Leer los datos provenientes de un sensor de presión atmosférica BMP-180.
- Generar un pulso PWM, controlado a través de un PID, con el fin de mantener la presión entregada por una bomba de diafragma constante dentro de la jeringa.
- Controlar un driver para Motor Stepper DRV 8825.
- Manejar un voltaje de entrada de 12 [V].
- Comunicación I2C entre el Arduino y los distintos dispositivos periféricos.

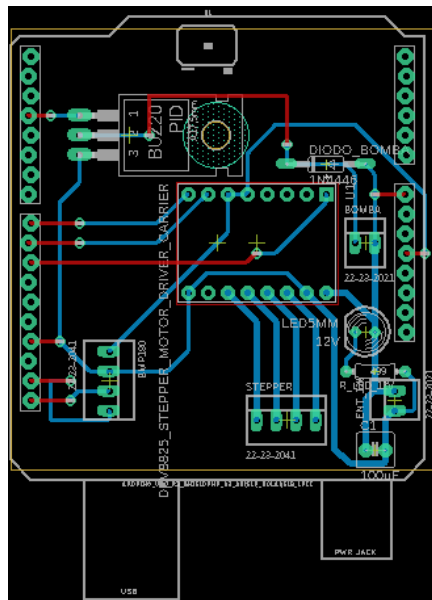


Imagen 42 – Arduino *Shield BioFeeder* desarrollado en el software Autodesk Eagle.

A continuación, en la Tabla 16 se presenta la lista de materiales que conforman la placa:

Tabla 16 – *Bill of Materials* para el *BioFeeder*.

Componente	Cantidad	Precio CLP
Pin Macho 4x1	2	\$ 500
Condensador 100uF	1	\$ 200
LED	1	\$ 100
N MOSFET	1	\$ 250

DRV 8825	1	\$ 5.000
Diodo	1	\$ 250
Pin Macho 4x1	2	\$ 500

Ya que el Motor Stepper tiene un voltaje nominal superior a 1 [A], es que requiere calcular los espesores de las vías, los cables internos de la placa, ya que la sobre corriente en estas las puede quemar. Para realizar este cálculo se utiliza la plataforma online *CircuitCalculator*⁵.

10.3.2.1 *BioFeeder* – Firmware

A diferencia de lo presentado para la placa *Ramps 1.4*, *BioFeeder* no tiene un único firmware, sino que se han desarrollado distintos códigos en función de que es lo que se necesita que este haga, a continuación, se presentarán las distintas funciones que este tiene, cual es el fin de estas, y los códigos que se usan.

10.3.2.2 I2C

El protocolo I2C, es un estándar de comunicación serial para la comunicación de varios dispositivos periféricos con un nodo maestro, donde la información se transmite bit a bit a través de un mismo cable (SDA), y se sincroniza a través de un pulso PWM en un cable (SCL) que sincroniza las velocidades de trabajo entre todos los dispositivos. Esta configuración se muestra en la Imagen 43.

⁵ <http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/>

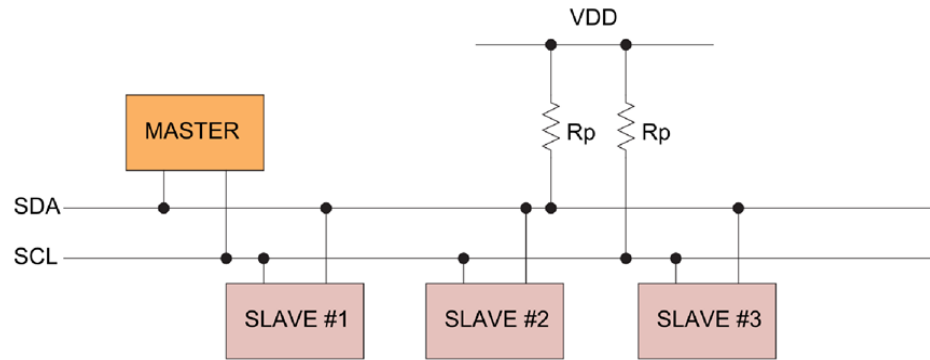


Imagen 43 – Configuración estándar para la comunicación I2C desde un maestro a 3 esclavos, misma configuración que se busca utilizar en la palca *BioFeeder* Versión 1.3.

En la versión 1.1, la que se encuentra actualmente en uso, solo el sensor BMP-180 utiliza comunicación I2C, con el fin de tener la capacidad de manejar más componentes periféricos en nuestro sistema, es que esta capacidad se aumentará en la versión 1.3 para poder comunicarse mediante este protocolo a los componentes presentados en la Tabla 17.

Tabla 17 – Tabla de comunicación para los futuros componentes del control de los alimentadores, y sus correspondientes estados.

Componente	Clase
Arduino Uno + <i>BioFeeder Shield</i> 1.3	Esclavo#1
Pantalla LCD 16x2	Esclavo#2
Arduino Mega + <i>Ramps</i> 1.4	Maestro#1
BMP-180	Esclavo#3

Para el desarrollo de la comunicación I2C de todos los componentes presentados en la tabla, se utilizará la librería *Wire.h*⁶, librería estándar, incluida en el IDE de Arduino.

Para poder utilizar este protocolo con la pantalla LCD se utiliza la librería *LiquidCrystal_I2C.h*⁷ desarrollada por la compañía DFRobots (<https://www.dfrobot.com/>).

Para activar este protocolo de comunicación con el sistema de control de los ejes cartesianos, activamos la función `EXPERIMENTAL_I2CBUS`, agregada en la versión 2.0 del *firmware Marlin* el año 2019. Esta función permite la comunicación entre microcontroladores mientras la máquina se encuentra en funcionamiento. Para activar la comunicación serial a través del código G que maneja la máquina se utilizan los siguientes comandos:

- M260: Se utiliza para enviar data a través del Bus I2C.
- M260 A#: Se utiliza para definir la dirección del periférico al que se le enviará el buffer.
- M260 B(byte): Se utiliza para añadir bytes al buffer que se busca enviar.
- M260 S1: Envía el buffer al esclavo receptor.
- M260 R1: Reinicia el buffer.
- M261: Se utiliza para recibir información desde un esclavo.

En el marco del desarrollo de esta memoria, la comunicación será únicamente Maestro – Esclavo, por lo que solo se utilizarán los comandos asociados a M260. En la sección donde se describan las configuraciones de los códigos G asociados al *Slicer* se mostrará cómo se utilizan estos comandos.

⁶ Información acerca de la librería: <https://www.arduino.cc/en/reference/wire>

⁷ Enlace de descarga: <https://github.com/fdebrabander/Arduino-LiquidCrystal-I2C-library>

10.3.2.3 Sensor BMP-180

Con el fin de tener la capacidad de monitorear la presión de aire que la bomba diafragma está aplicando sobre el material dentro de la jeringa, se utiliza un sensor BMP-180, el que se muestra en la imagen a continuación:



Imagen 44 – Sensor BMP-180, de presión de aire desarrollado por *Sparkfun*.

Para el control de este sensor se utiliza la librería `SFE_BMP180.h`⁸, la que fue desarrollada por la empresa *SparkFun* (<https://www.sparkfun.com/>), esta librería incluye todos los comandos necesarios para las lecturas e interpretaciones de la presión interna de la jeringa, además de incluir los protocolos de comunicación mediante I2C.

10.3.2.4 Sistema de control para la Bomba de Diafragma

La bomba de diafragma por su parte será controlada a través de un pulso PWM. El microcontrolador solo tiene la capacidad de generar un pulso entre los 0 y 5 [V], sin embargo,

⁸ Enlace de descarga: https://github.com/LowPowerLab/SFE_BMP180

la bomba tiene un voltaje de alimentación de entre los 0 a 12 [V]. Con el fin de poder controlar mayores voltajes, es que se incorpora un N-Mosfet.

El pulso PWM es un método digital para entregar voltajes más bajos al *HIGH* del controlador (normalmente 5 o 3.3 [V]), entregador en una señal eléctrica. Para realizar esto es que se discretiza la señal, generando un voltaje ($\bar{V}$), el que va definido por el porcentaje del *Duration Time* en que el voltaje se encuentra en *HIGH*, denominado *Duty Cycle*, todo esto se representa en la Imagen 45.

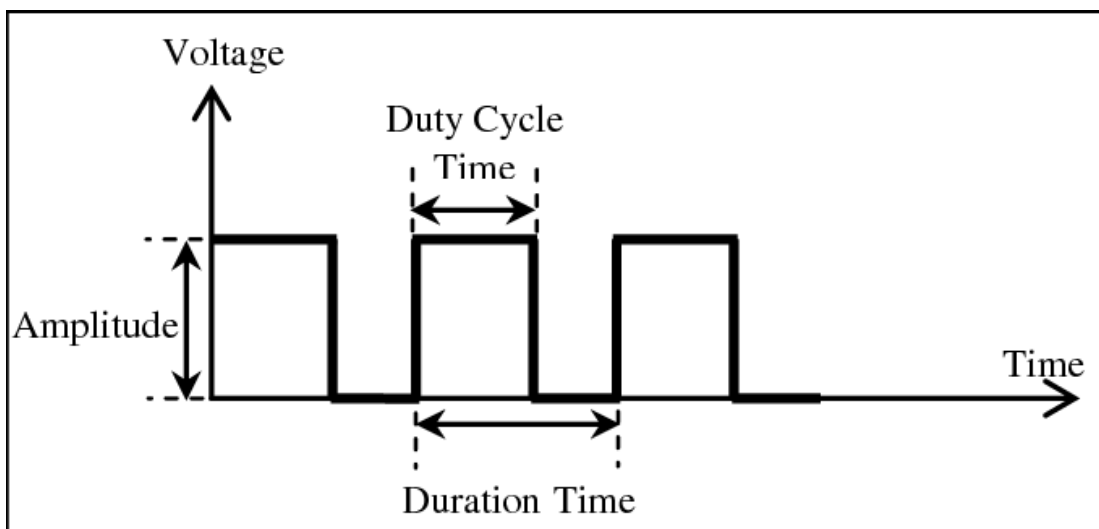


Imagen 45 – Ciclo estándar de un PWM en donde se detalla gráficamente que representa cada parámetro del ciclo.

Como se explicó anteriormente, para poder llevar el pulso desde el rango 0 a 5 [V] a los 0 a 12 [V] se utiliza un N-Mosfet, los Mosfet son semiconductores capaces de abrir y cerrar el paso de corriente, emulando el pulso, pero con una amplitud de mayor. Este componente se puede ver en la Imagen 42 bajo el nombre de *BUS20 PID*.

Al desarrollar este sistema de control se notó que el grosor de la línea de impresión comenzaba a aumentar cuando el material disponible dentro de la jeringa disminuía, tal como se puede notar en la Imagen 46.



Imagen 46 – Diferencia entre las impresiones utilizando el sistema de alimentación neumático con PID (izquierda) y sin PID (derecha).

Para solucionar este problema es que se implementa un algoritmo de control PID (*proportional-integral-derivative*). Este sistema de lazo cerrado es ampliamente utilizado en la industria por su fácil implementación y óptimos resultados, su diagrama de funcionamiento se puede ver en la Imagen 47.

El PID calcula un error basado en la diferencia entre el valor medido, en este caso el entregado por el sensor BMP 180; y el valor deseado, definido por el usuario, en este caso obtenido experimentalmente.

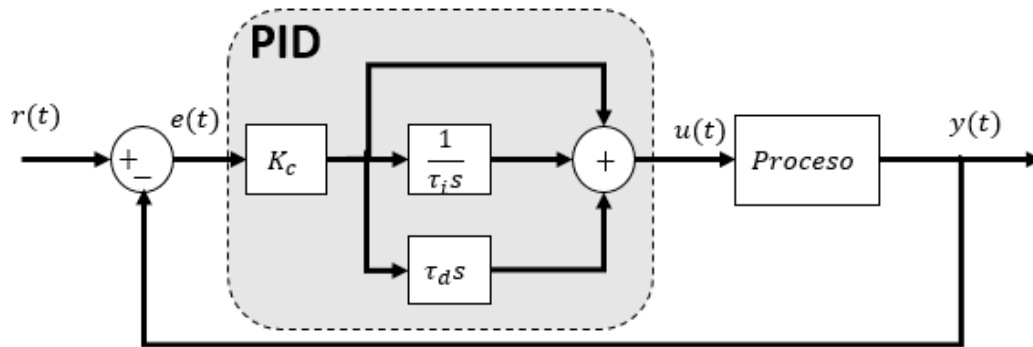


Imagen 47 - Sistema de control PID de lazo cerrado.

Como parte del firmware se utilizó la librería PID_v1 desarrollada por el usuario de Github brettb⁹. Esta librería pide al usuario definir los parámetros k_p , k_i y k_d , constantes de proporción, integración y derivación correspondientemente.

Existen distintos métodos para la sintonización de estas 3 constantes; el método Ziegler-Nichols y el método manual. Para definir estas constantes es que se optó por el segundo, por su mayor facilidad, repetibilidad y eficiencia.

El objetivo de la sintonización es conseguir que nuestra variable deseada (en este caso la presión) se comporte lo más similar a una función escalón, reduciendo el sobre impulso, oscilaciones y error de estado estacionario lo más cercanos a 0. En la Imagen 48 podemos ver los resultados obtenidos

⁹ Esta librería está disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/brarq3ttb/Arduino-PID-Library>

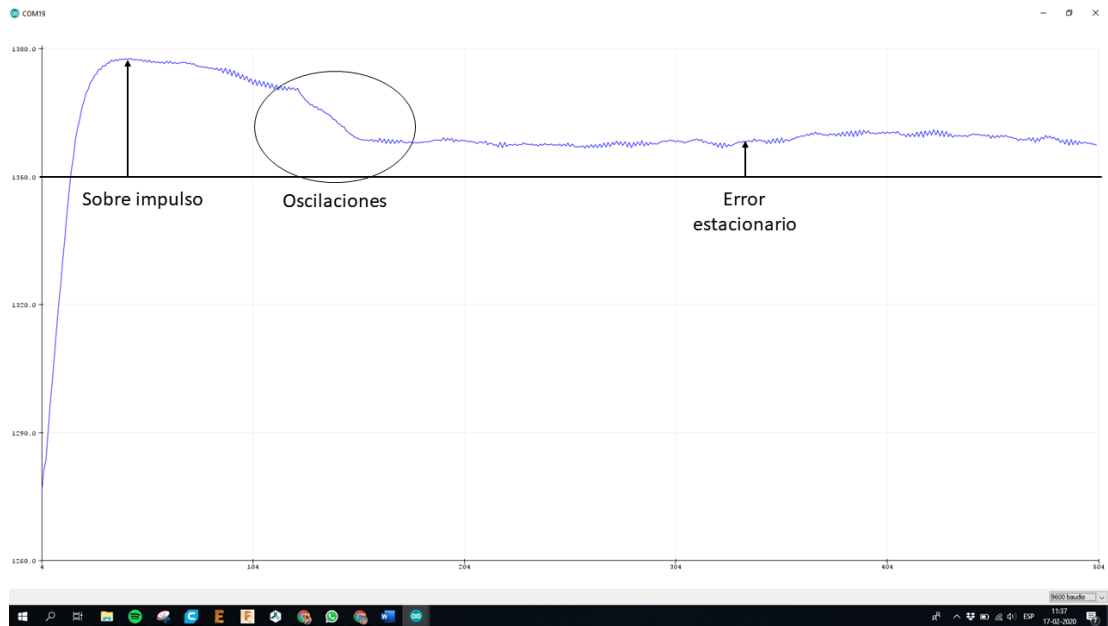


Imagen 48 – Resultados de la implementación del PID en el sistema de alimentación neumático.

Para estos resultados se utilizaron las constantes presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 18 – Constantes utilizadas para el control PID implementado en el sistema de tanque neumático.

k_i	1
k_d	0
k_p	0.3

Con los dos sistemas descritos anteriormente, Sensor BMP-180 y Sistema de control para la Bomba de Diafragma tenemos controlado el Sistema de Alimentación Neumático. El código utilizando en la versión 1.1 se muestra en el Anexo 2.

10.3.2.5 Sistema de Control Motor Stepper

Para el control del Sistema de Alimentación Mecánico se requiere manejar el driver para motor Stepper DRV8825, este componente se puede ver en la Imagen 49 bajo el nombre de DRV8825_STEPPER_MOTOR_DRIVER_CARRIER. Este componente está diseñado para poder alimentar un motor stepper con voltajes de hasta 30 [V], utilizando únicamente 2 salidas digitales desde el microcontrolador, una para generar el movimiento a través de disequilibrios en los motores, y otra definiendo la dirección.

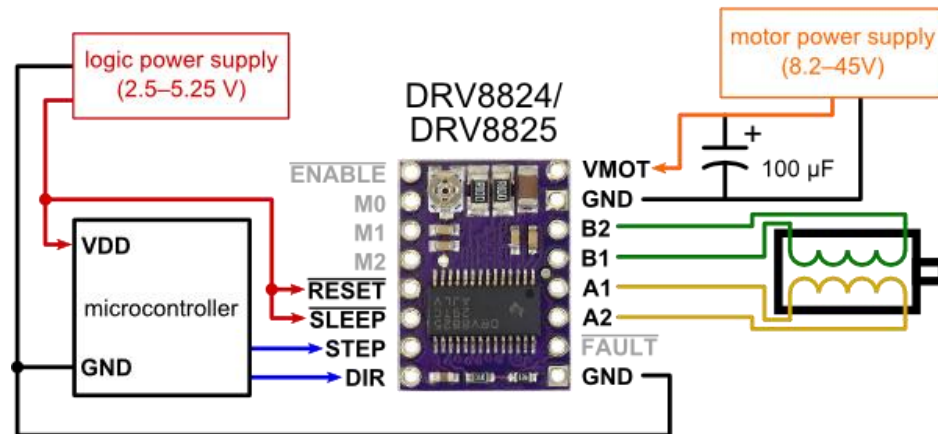


Imagen 49 – Conexión electrónica estándar para un Driver de motor stepper 8825.

Para el manejo de este controlador se utiliza la librería *AccelStepper.h*¹⁰, la que nos entrega la posibilidad de manejar fácilmente la velocidad del motor, su dirección, estado, generar rampas

¹⁰ Enlace de descarga: <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/index.html>

de velocidad, y manejar distintos *Shield* de Arduino para motor stepper, drivers o motores de forma directa.

10.4 Perfil *Slicer* – Cura

Tal como se muestra en la Imagen 29, el desarrollo de un sistema de extrusión de materiales viscosos, en especial de materiales que se encuentran aún en desarrollo como son los BioCompuestos, es una relación que dependerá de 3 variables claves, el sistema físico, el material y el desarrollo de un *Slicer* ad-hok para el funcionamiento de la máquina.

En las secciones anteriores se habló de todo el desarrollo mecánico y electrónico que llevo a una impresora 3D FDM a tener la capacidad de imprimir materiales viscosos. Sin embargo, esto requiere del *input* de un código G que responda a las complicaciones que este tipo de materiales generará.

Si el lector se dirige a la Imagen 1, notará que a lo largo de este capítulo se ha narrado como se trabaja la impresión 3D de materiales viscosos, desde el final (obtención de una pieza impresa en 3D), hasta el inicio, generación de un archivo CAD. En la siguiente sección se describirá el proceso desarrollado para la obtención de un perfil para BioCompuestos en el *Slicer* Cura. Se hará un especial énfasis en las variables claves, como estas afectan la impresión, como detectar que estas no están dentro de los rangos correctos, etc.

10.4.1 Parámetros claves de Cura

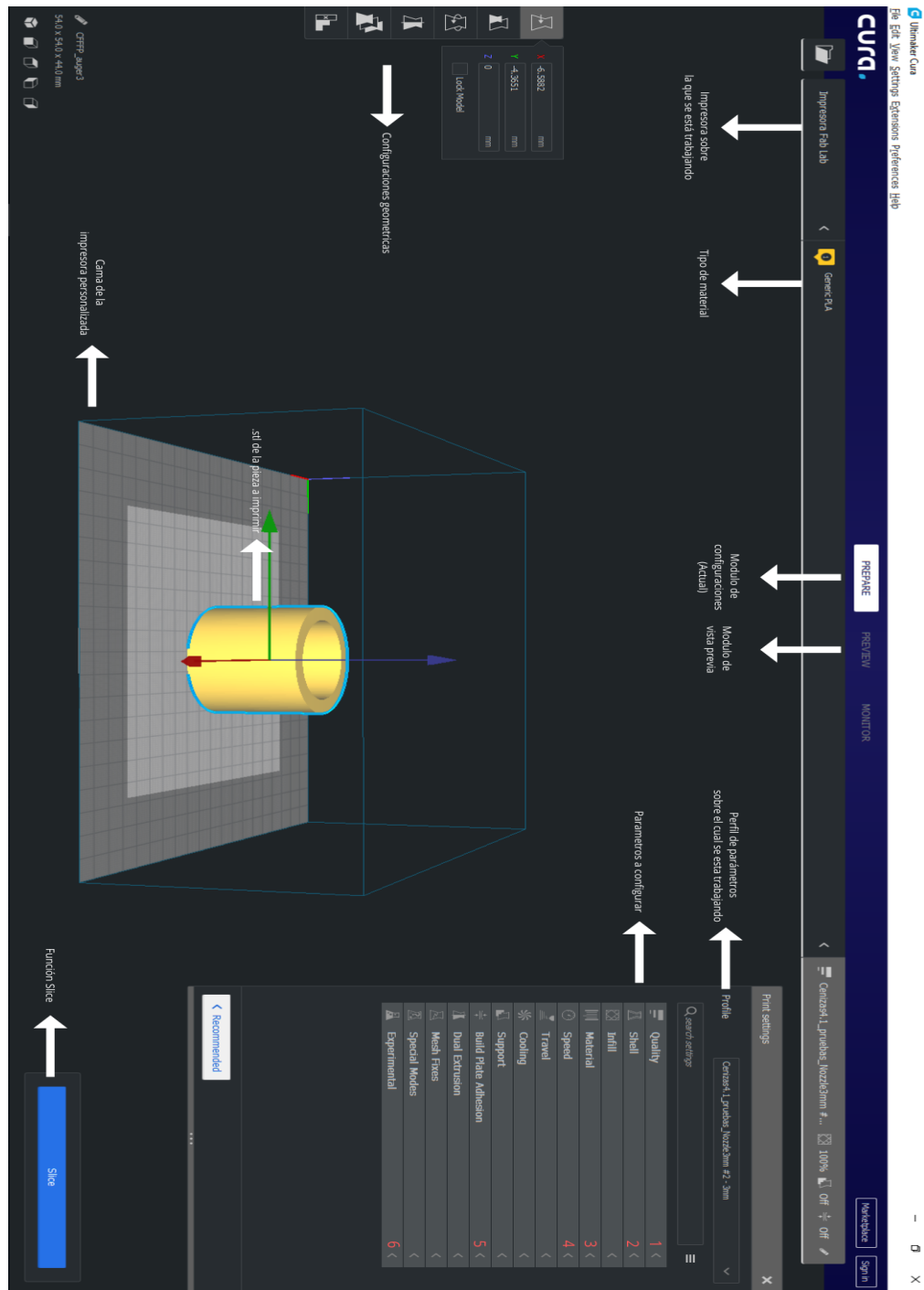


Imagen 50 – Interfaz del programa *Slicer Cura*, destacando sus parámetros claves.

En la Imagen 50Imagen 50 se muestra la interfaz del *software* y a continuación se mencionarán los parámetros que se pueden modificar y como estos influyen en la impresión 3D:

1. *Quality*: Define la calidad superficial de la impresión, en función del tamaño de la altura y el ancho de esta.
 - *Layer Height*: Definirá la altura de capa de impresión, como norma, la altura de capa es igual al diámetro de salida de la boquilla del extrusor.
 - *Initial Layer Height*: Definirá la altura de la primera capa, generalmente mayor al *Layer Height*.
 - *Line Width*: Define el ancho de la línea que saldrá del extrusor, esto es especialmente crítico en el *infill* ya que un número muy bajo dejará espacios entre las líneas, y uno muy grande generará un sobre material con lo que la capa no saldrá con las dimensiones esperadas.

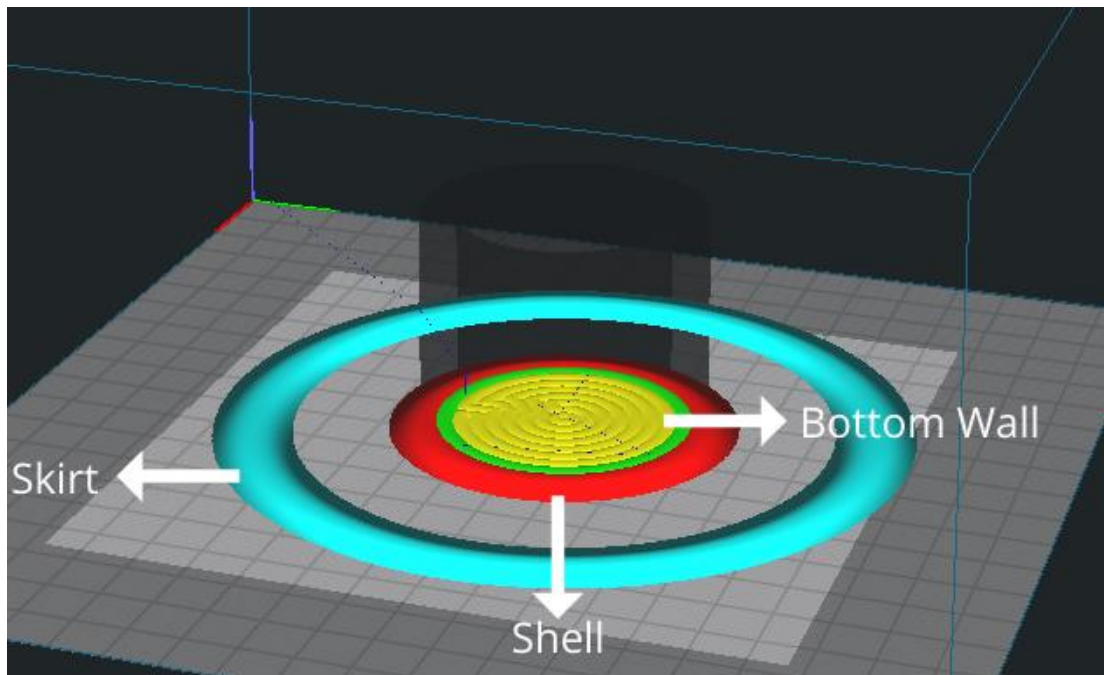


Imagen 51 - *Preview* del *software* Cura, haciendo un énfasis en la primera capa.

2. *Shell*: Definirá la cantidad de líneas que se usarán en las capas exteriores e interiores (*Wall Thickness*); y superior e inferior (*Top/Bottom Thickness*). Podemos ver en la Imagen 51 las líneas verdes y roja que representan el *Shell* y el *Inner Wall*.
3. *Material*: En esta sección el parámetro clave es *Flow*, el que definirá las RPM con las que rotará el motor stepper del extrusor que contiene el *Auger Screw* (ver Imagen 39). Este parámetro es clave en el funcionamiento de un *Auger Screw* como se explicó en la sección Características claves de diseño en un *auger screw*, y como estas afectan el flujo de material.

Existen dos formas de saber si este parámetro no está bien configurado:

- *Flow* muy bajo: Podremos notar que este parámetro está muy bajo si las líneas no tienen el ancho esperado.
- *Flow* muy alto: *Flow* funciona asignando valores numéricos en el *GCode* para el movimiento de motor asignado al extrusor.

Si este valor es muy alto, el numero asignado a este motor será muy alto. La máquina ajustara las velocidades de cada eje (X,Y,Z y E) para llegar a cada coordenada al mismo tiempo, teniendo como límite superior la velocidad máxima del motor, es por esto que con valores muy altos para el motor del extrusor, los otros ejes se moverán mas lentamente para llegar de forma simultanea a la misma posición.

En la Imagen 51 podemos ver que las líneas asociadas al *Brim* y *Shell* se ven más gruesas ya que tienen un *Flow* superior al de las líneas asociadas al *Bottom Wall*.

4. *Speed*: Define la velocidad con la que se moverán los motores de los ejes X, Y, y Z. Esta velocidad se tiene que ajustar con la velocidad de extrusión, con el fin de mantener el ancho de la línea como el que se definió en *quality*.
5. *Build Plate Adhesion*: Este parámetro está pensado para las impresoras 3D por FDM ya que permite generar estructuras que mejoren la adherencia de la pieza a la cama.

Si bien esto no es necesario para la impresión 3D de materiales viscosos, la opción *Skirt*, genera una primera línea que permite modificar ciertos parámetros para obtener la altura y anchura de línea que se había configurado en el *quality*, esta línea se puede ver de celeste en la Imagen 51.

6. *Experimental*: Esta opción nos permite trabajar con configuraciones experimentales que han desarrollado distintos usuarios de Cura, entre ellas la opción *Spiral Mode*, el que imprime la pieza sin dejar de extruir, en una sola línea, la que es ideal para la impresión 3D de materiales viscosos.

A continuación, se presentará la Tabla 19 donde se pueden descargar los distintos perfiles que han funcionado para imprimir en 3D materiales viscosos.

Tabla 19 – Perfiles para el *software* Cura ya probados para imprimir en 3D distintos materiales viscosos, y los tamaños de boquilla a los que están asociados.

Material	Tamaño Extrusor [mm]	Estado	Enlace Descarga
Arcilla	2	Estable	https://www.dropbox.com/s/szjv3fwz6j7qfib/Clay_2mm.curaprofile?dl=0
Arcilla	3	Estable	https://www.dropbox.com/s/h9y0s434kc6yd3h/Clay_3mm.curaprofile?dl=0
Arcilla	4	Estable	https://www.dropbox.com/s/2oo9ywclvsses4u/Clay_4mm.curaprofile?dl=0
Cenizas	3	Estable	https://www.dropbox.com/s/mgtw1teaiwhfvxf/Cenizas_3mm.curaprofile?dl=0
Cascara de Huevo	3	Estable	https://www.dropbox.com/s/7dihmgvbiwcdnly/CascaraHuevo_3mm.curaprofile?dl=0

10.4.1.1.1 Configuración de la máquina

Tal como podemos ver en la Imagen 50 además de configurar los perfiles para cada material, debemos configurar la impresora que usaremos. A diferencia de los perfiles desarrollados para los materiales, los de las máquinas no son exportables por lo que no se podrá entregar un enlace de descarga, además, recordando los objetivos de esta tesis, el sistema de alimentación y

extrusión están diseñados para poder ser implementados en cualquier máquina, y no en la presentada en el capítulo La Máquina. En el capítulo Resultados se mostrará la implementación del sistema en distintas máquinas y los desafíos que esto presente.

En esta sección se entregarán las características geométricas y el *GCode* necesario para el correcto funcionamiento de esto.

En esta sección no se explicará como agregar una impresora al software, ya que eso se encuentra documentado¹¹

Tabla 20 – Valores geométricos del sistema de extrusión mostrado en la Imagen 39 para configurar la impresora 3D.

<i>Printhead Settings</i>		
Valor	Medida [mm]	Descripción
X min	30	Distancia desde el centro del extrusor al extremo de este, en el sentido -x
Y min	30	Distancia desde el centro del extrusor al extremo de este, en el sentido -y
X max	80	Distancia desde el centro del extrusor al extremo de este, en el sentido +x
Y max	15	Distancia desde el centro del extrusor al extremo de este, en el sentido +y
<i>Gantry Height</i>	35	Distancia entre la punta del extrusor y los ejes del sistema de desplazamiento XY

Además de agregar los valores geométricos del extrusor, se pueden agregar comandos que permitirán a la máquina funcionar de mejor manera al inicio del *GCode*, este código se puede

¹¹ : <https://ultimaker.com/en/resources/52029-manage-printers>.

ver en el Anexo 4. Si bien los comandos presentados en el código inicial de la máquina son comandos propios del *GCode*, estos tendrán más sentido si el usuario está trabajando con el *firmware Marlin* ya que son para eliminar errores producto de no estar usando una impresora 3D FDM convencional. A continuación, se mostrarán los comandos clave de *GCode* utilizados en la programación de la máquina:

- M109: Este comando comenzará la impresión a pesar de que esta se encuentre aumentando la temperatura del extrusor o la placa. Además, puede bloquear comandos de error por estar trabajando bajo la temperatura de extrusión.
 - Al añadir la S (M109 S0) se define la temperatura objetivo, fijándola en 0 el tiempo de espera entregado por el comando es de 0, por lo que la impresión comenzará inmediatamente.
- M82: Fijará el extrusor en coordenadas absolutas, independiente del tipo de coordenadas en las que estén trabajando los demás ejes.
- M107: Apaga el ventilador usado en las impresoras 3D FDM.
- M302: Extrusión en Frio, este comando permite que el extrusor se mueva a pesar de estar trabajando en temperaturas inferiores a la de fusión del material.
 - Agregar la letra P (M302 P0) definirá si la extrusión en frio está habilitada (P0), o deshabilitada (P1).
- G28: *Home*, Enviará todos los ejes a la posición (0,0,0), en este caso definida por los finales de carrera.

10.5 Materiales

Finalmente, si retomamos la Imagen 29 vemos que el último componente clave en el desarrollo del sistema son los materiales. A continuación, se explicará cuáles son las variables claves que estos deben cumplir para poder ser utilizados en la impresión 3D. Además, se mostrará un proceso experimental que se ha desarrollado en el transcurso de este trabajo de título. El cual tiene el fin de evaluar el desempeño de las recetas antes de que estas sean probadas en la máquina, reduciendo los tiempos de ensayo y error.

Es importante comentar que las recetas no serán entregadas, ya sea en esta sección, ni en la sección de resultados, ya que estas no son parte de los objetivos del presente trabajo, y son confidenciales.

10.5.1 Características de los materiales

Para que un material pueda ser impreso por el sistema diseñado, y además imite las formas de impresión por FDM, este debe cumplir con las siguientes características:

- Viscosidad: El material debe ser lo suficientemente viscoso para poder sostener una estructura de construcción capa a capa, pero debe tener la capacidad de fluir desde el sistema de alimentación, pasando por el extrusor, hasta la cama de la máquina.
- Tiempo de secado: El material no debe solidificarse dentro de las siguientes 2 horas después de ser preparado, dándole al usuario tiempo suficiente para realizar pruebas en la máquina, ajustes en función del material, y la impresión 3D.
- Secado: A lo largo de las evaluaciones con distintos materiales, se ha visto que muchos de ellos se quiebran al momento de secarse, esto por los cambios de volúmenes generados por la pérdida de agua. Por lo mismo, se busca que el porcentaje de pérdida de volumen del material sea lo menor posible.

Es importante destacar que los materiales plásticos también sufren de cambios de volúmenes al perder temperatura, por lo que ese problema es un problema no resuelto en la impresión 3D.

- Adherencia: Los materiales deben mantener la adherencia interfaz entre capas, de lo contrario la pieza final será frágil.
- Sustentación: El material debe tener la capacidad de sustentarse en el aire, sin apoyo mientras se pasa de una línea a otra, con el fin de no tener que generar un *infill* del 100% tal como se utiliza en la impresión 3D por FDM.

10.5.2 Pruebas de material

Con el objetivo de saber si el material cumpliría con las características presentadas anteriormente, es que se realizaba una prueba a cada receta, la que consistía en insertar el material dentro de una jeringa, y simular la impresión 3D con las manos. La fuerza necesaria para imprimir podía venir de la fuerza física de quien realizará el test, o de una bomba de aire, emulando el proceso realizado por el sistema neumático indirecto.

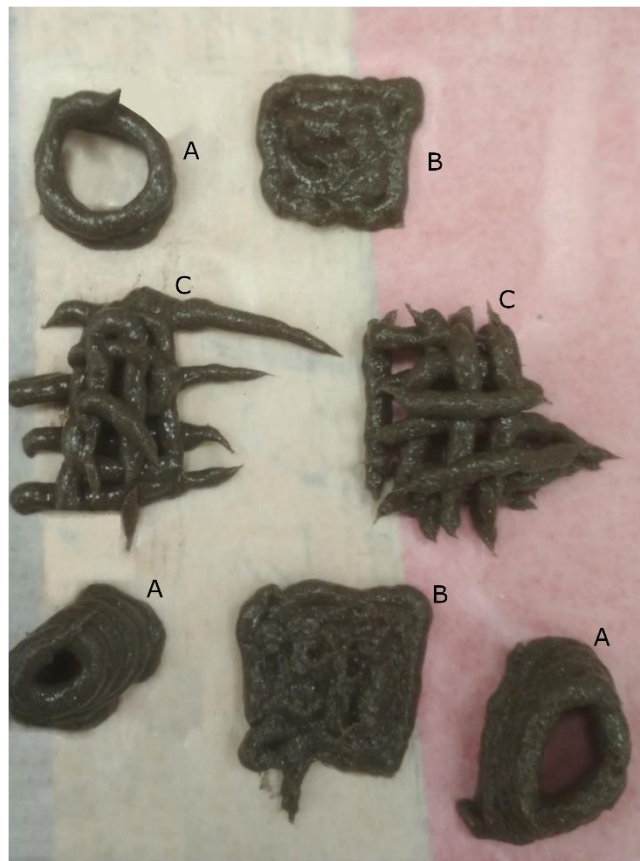


Imagen 52 – Resultados para las pruebas de materiales utilizando como bases cenizas.

En la Imagen 52 se pueden ver las distintas pruebas que se realizan en los materiales, previo a probarlos en la máquina. Cada prueba busca evaluar una característica distinta de las mencionadas en la sección Características de los materiales:

- A. La prueba A busca evaluar la capacidad que tiene el material de mantener su altura, como se menciona en la sección anterior, el material debe ser lo suficientemente viscoso para no perder la forma a medida que la impresión se realiza.

Además, se busca evaluar la adherencia de las capas una vez que se secan los materiales.

- B. La prueba B busca evaluar la influencia de la contracción del material una vez que este se seca. Por lo general este pierde volumen y se quiebra, este experimento nos permite anticipar estos problemas.
- C. La prueba C busca evaluar la sustentación del material en el aire, lo que permitiría trabajar con $Infill < 100\%$.

11 Manual de Usuario

Para desarrollar el manual de usuario, se recomienda al lector volver a la Imagen 1, donde se explica el flujo de trabajo normal para una impresora 3D FDM.

Si bien este proceso es muy similar para esta versión, se añaden ciertos pasos presentados en el diagrama a continuación:

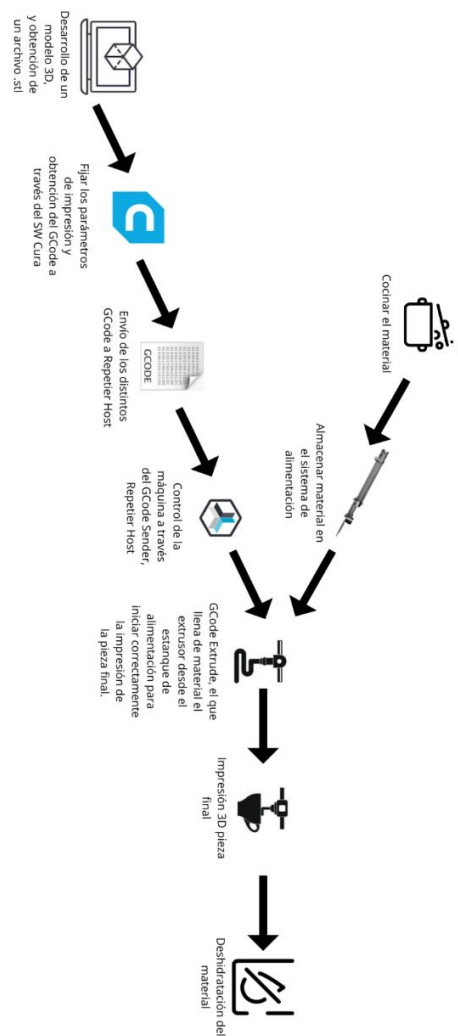


Imagen 53 – Flujo de trabajo para utilizar la impresora 3D de materiales viscosos.

Como se puede ver en la Imagen 53 es la existencia de dos procesos paralelos, uno que comienza con el archivo CAD, y otro que comienza con la cocción del material. Como se explicó anteriormente, las recetas no se entregarán ya que no forman parte de los objetivos de este trabajo, pero si la persona quiere comenzar a preparar recetas de BioCompuestos, puede visitar el recetario online *Materiom*¹², por lo que únicamente se explicará el proceso desde la obtención del archivo .stl.

A continuación, se explicará el desarrollo de cada uno de los pasos:

1. Obtención de un archivo .stl: El formato .stl abreviación de *Sterolithography*, este formato representa la superficie de un objeto a través de la interpolación de triángulos entre puntos clave, se utiliza en la industria del prototipado rápido, impresión 3D y mecanizado CNC. Por lo general cualquier software de modelado 3D entrega al usuario la posibilidad de exportar su archivo en este formato, en caso de estar utilizando *Fusion 360*, se recomienda el siguiente tutorial (<https://knowledge.autodesk.com/support/fusion-360/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-export-an-STL-file-from-Fusion-360.html>).
2. A continuación, importamos uno de los perfiles que están disponibles en la Tabla 19, para esto vamos a la sección *Profiles* del *software* (ver Imagen 50), en el fondo de esta sección presione *Manage Materials*, y ahí se hace click en *Import*.
En caso de que la persona quiera construir su propio perfil para un material nuevo, siga el siguiente tutorial de cómo hacer perfiles en Cura (<https://ultimaker.com/en/resources/20441-manage-profiles>) y diríjase a la sección Parámetros claves de Cur para entender como cada parámetro influye en el proceso de impresión.
Para generar el *GCode* el usuario debe hacer *click* en el botón *Slice* (ver Imagen 50), este generará la estructura capa a capa para la impresión, para verlo hacemos *click* en

¹² <https://materiom.org/>

el botón *Preview* en esta sección el usuario podrá simular la impresión, en caso de querer hacer modificaciones, vuelve al punto anterior, iterando hasta tener la impresión perfecta. Para guardar el *GCode* se hace *click* en *Save to File* donde el usuario seleccionará la dirección en su computador donde quiere guardar el archivo.

3. Una vez guardado el archivo, se abre el *Software Repetier*, y nos comunicamos con la máquina apretando el botón Conectar (ver Imagen 54). En caso de tener problemas con la conexión de la máquina diríjase al siguiente *link* (<https://www.repetier.com/connection-problems/>) y ver la sección *Serial Conection*. Después de conectados, llenamos el extrusor antes de comenzar con la impresión. Para esto, tomamos el *GCode Extrude*¹³, se suelta el archivo en el *Repetier* y se envía a la máquina haciendo *click* en el botón Imprimir, se debe esperar hasta que salga material desde el extrusor.
4. Una vez que el extrusor esté listo, se suelta el *GCode* del archivo que se quiere imprimir en el *Repetier* y nuevamente se hace *click* en Imprimir. Una vez que la impresión comienza, la máquina imprimirá el *Skirt*, la línea que se puede ver rodeando la impresión en la Imagen 54, durante esta impresión el usuario podrá probar el funcionamiento de los parámetros asignados a la velocidad de alimentación en el tanque mecánico, presión interna en el tanque neumático, el flujo de extrusión o la velocidad de la máquina en cada eje.
5. Una vez que la impresión esté lista, tomamos la pieza y la introducimos en la deshidratadora, donde perderá el agua, quedando la pieza final.

¹³ Enlace de descarga: <https://www.dropbox.com/s/khiol6bmdbk0801/Extrude.gcode?dl=0>

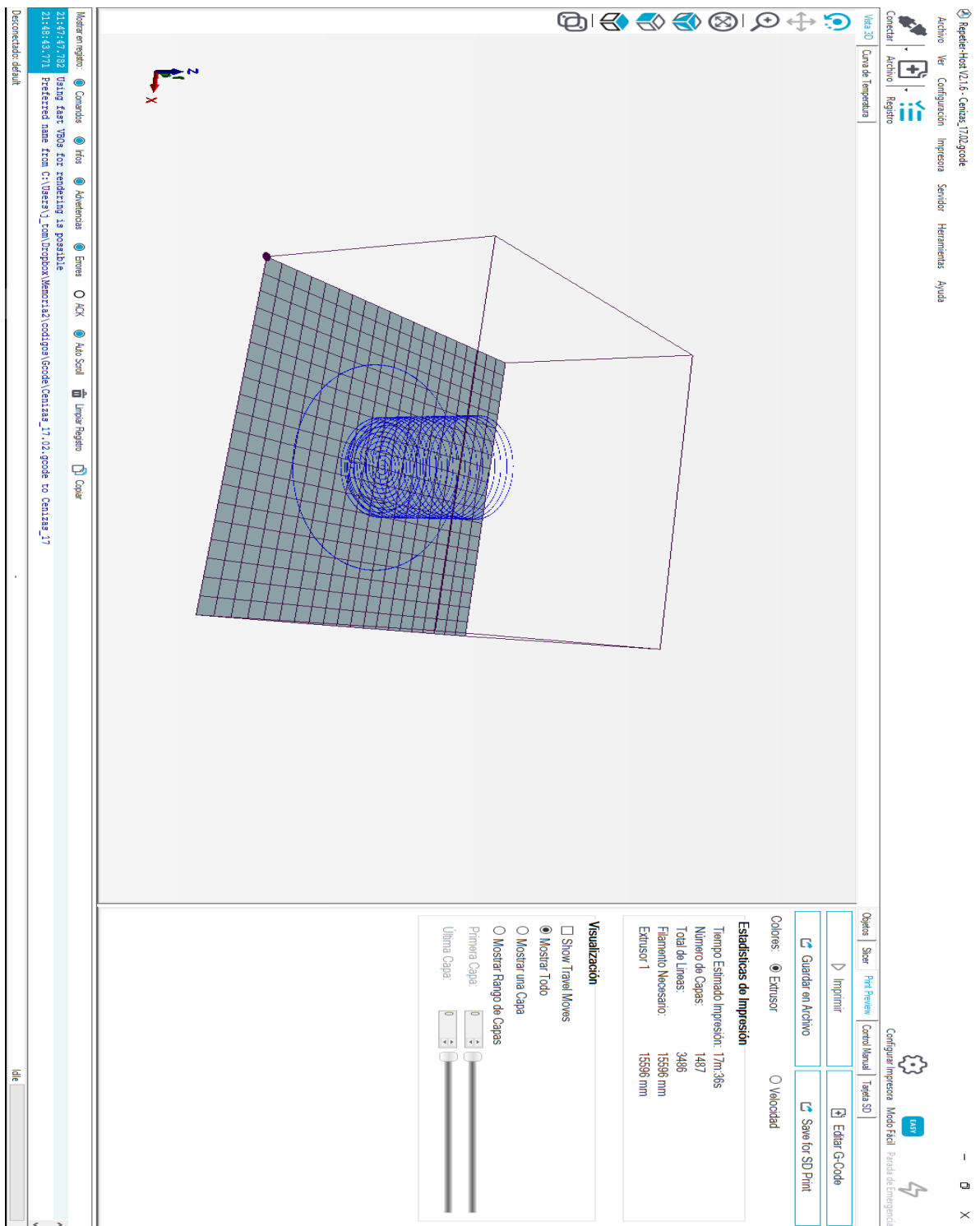


Imagen 54 – Repetier Host, mostrando las rutas que tomará la máquina al momento de imprimir.

12 Resultados

En el siguiente capítulo se presentarán los resultados obtenidos a partir de todo lo presentado en la implementación, todo esto acompañado de imágenes y enlaces a videos.

12.1 Fabricación de Sistemas de Extrusión y Alimentación

Tal como se explica en Implementación, el sistema de extrusión de materiales viscosos se ha desarrollado en base a un sistema de extrusión indirecto, presentado en la sección Sistemas de Extrusión, este puede ser alimentado a través de dos sistemas de alimentación; presentados en las secciones Sistema de Alimentación Mecánico y Sistema de Alimentación Neumático.

A continuación, se presentarán imágenes de cada uno de estos sistemas, a diferencia de las presentadas en la sección Implementación, estas presentan la construcción física de los sistemas.

12.1.1 Imágenes de los sistemas físicos



Imagen 55 – Sistema de extrusión indirecto basado en *Auger Screw*.



Imagen 56 – Sistema de alimentación neumático.



Imagen 57 – Imagen del sistema de alimentación mecánico.

Por otro lado, se desarrolló un *Shield* de *Arduino*, con la capacidad de comunicarse con la placa estándar para impresoras 3D FDM *RAMP*. Esta se presenta en la sección *BioFeeder*.

A continuación, se presenta la imagen de esta placa:

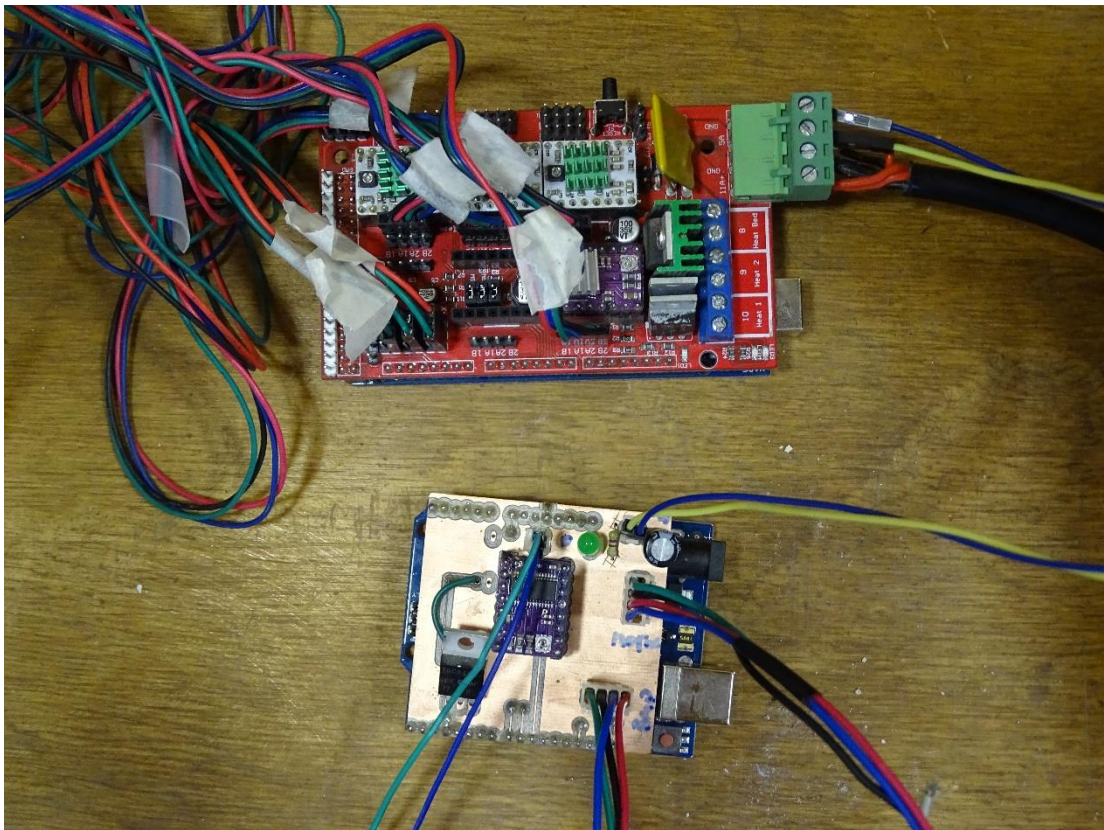


Imagen 58 – Placa electrónica *RAMPS 1.4*, conectada con el *BioFeeder* para controlar la Impresora y los sistemas de alimentación.

12.2 Materiales

Estos sistemas se han utilizado para imprimir distintos materiales. Parte de los objetivos de esta memoria es diversificar los materiales disponibles para la impresión 3D, presentados en las Tabla 1 y Tabla 2. Se trabajo con BioCompuestos en base a lignina, celulosa, y cenizas; además de trabajar con arcilla.

A continuación, se presentan las imágenes con los resultados de cada una de estas recetas:

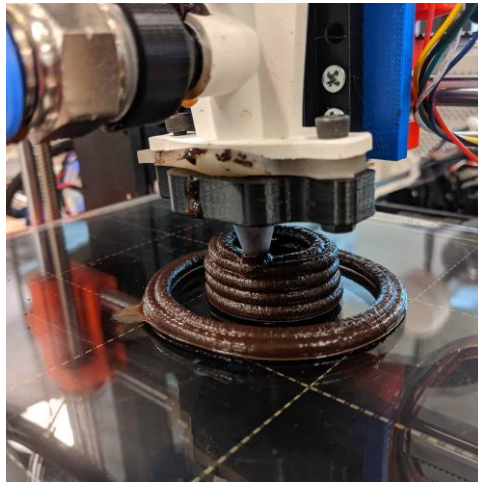


Imagen 59 – Impresión 3D de BioCompuestos en base a Lignina.



Imagen 60 - Impresión 3D de BioCompuestos en base a cenizas de madera.

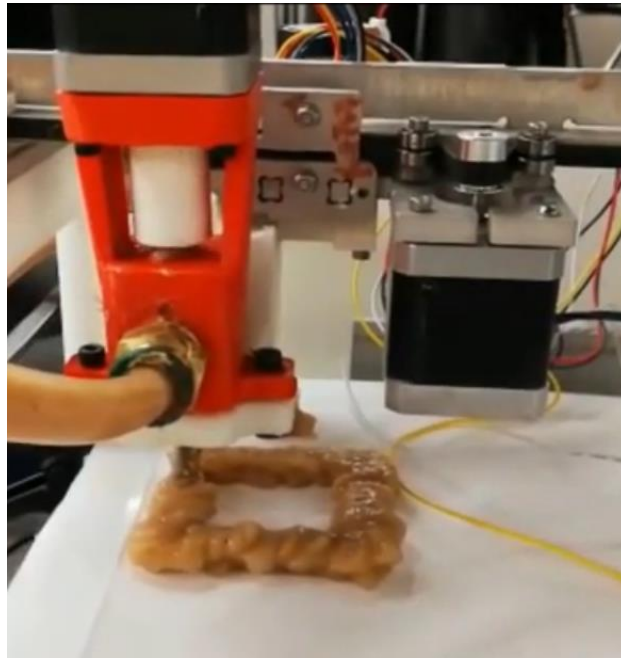


Imagen 61 – Impresión 3D de BioCompuestos en base a celulosa de madera.

12.3 Máquinas

Por último, como parte de los objetivos se buscaba desarrollar un sistema modular, capaz de ser instalado en cualquier impresora 3D comercial, por lo general *Open Hardware* ya que son más fáciles de intervenir. Este sistema ha sido montado en 3 máquinas distintas; Hypercube, presentada en la sección HyperCube, una *RepRap Prusa i3 MS3S*¹⁴, y la máquina ClayStack¹⁵ desarrollada por *Jake Read* del *Center of Bits and Atoms* de MIT.

¹⁴https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/180-original-prusa-i3-mk3-kit.html?gclid=Cj0KCQjwu6fzBRC6ARIsAJUwa2TPSW6zPg3eaKcJc6JYBwWICS75Lq5uE1IRFdtw5SWBOW241QsaIz8aAtZkEALw_wcB

¹⁵ <https://gitlab.cba.mit.edu/jakeread/claystack>

A continuación, se presentarán imágenes del sistema instalado en las distintas máquinas:

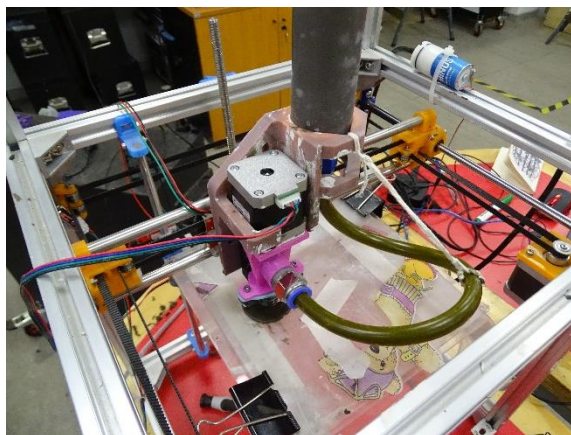


Imagen 62 – Sistema de impresión 3D implementado en una máquina HyperCube.



Imagen 63 - Sistema de impresión 3D implementado en una máquina ClayStack.

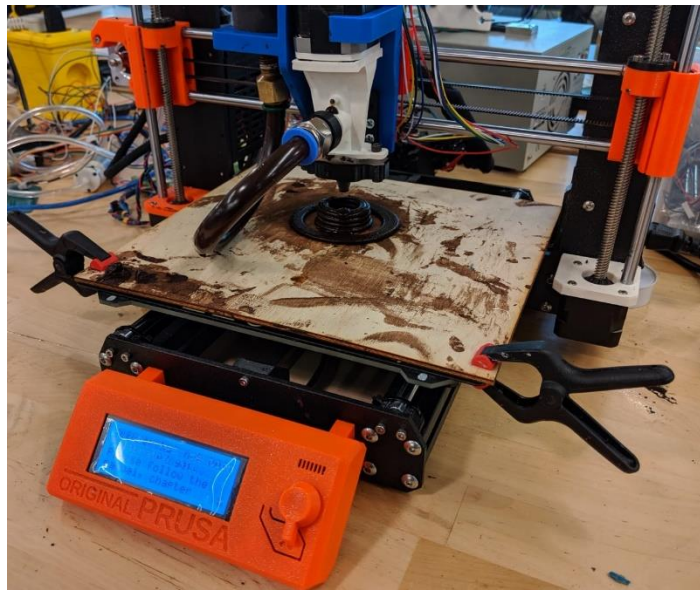


Imagen 64 - Sistema de impresión 3D implementado en una máquina *RepRap Prusa i3 MK3*.

13 Conclusiones

A lo largo del trabajo de esta memoria se diseñaron tres sistemas mecánicos, modulares y con la capacidad de ser instalados en cualquier impresora 3D comercial o desarrollada como prototipo. Estos sistemas fueron fabricados en las instalaciones de Fab Lab UTFSM, dejando una máquina construida para el uso personal o investigación de estudiantes y docentes asociados al laboratorio.

Como parte de este trabajo, se evaluaron distintos sistemas de extrusión, tal como fue presentado en la sección Implementación, si bien entre los objetivos de este trabajo se buscaba elegir un único sistema de alimentación, se optó por trabajar con ambos. A continuación, se enumerarán los sistemas seleccionados para el prototipo final, y las ventajas de estos:

- **Sistemas de Extrusión Indirecto a través de un *Auger Screw*:** Tal como se presentó en la Imagen 32, las impresiones desarrolladas a través de un sistema indirecto tuvieron resultados notablemente mejores que las realizadas con sistemas indirectos, producto de la capacidad de controlar de mejor manera el flujo de material a través de un *Auger Screw*, y su fácil integración a los *GCodes* entregados por los *Slicers*.
- **Sistema Neumático:** Este sistema entrega la capacidad al usuario de trabajar con una menor cantidad de material, un factor clave, ya que uno de los principales objetivos de esta máquina no es la construcción de piezas sino la experimentación con distintas recetas de materiales. Por último, es importante destacar el bajo costo que este sistema tiene (menos a 50.000 pesos) y que está basado en materiales fáciles de encontrar o fabricar en cualquier laboratorio de prototipado rápido.
- **Sistema Mecánico:** Este sistema tiene la capacidad de trabajar con volúmenes superiores y no requiere de un control de flujo. Sin embargo, su fabricación o adquisición es más costosa en terminarnos económicos y de tiempo de fabricación. Por lo que se recomienda su uso solo para recetas ya probadas, y cuando el usuario quiera construir piezas de gran volumen.

Además de esto, y con el fin de probar las capacidades de los diseños, estos han sido instalados en distintas máquinas, en distintos lugares del mundo; Hypercube, Fab Lab UTFSM, Santiago, Chile; *Rep Rap Prusa MK3*, *3D Experience Lab*, *Boston Massachusetts*; *ClayStack*, *Fab@CIC*, *Boston Massachusetts*, *RepRap Prusa I3*, *TU Berlin*, *El Gouna*, Egipto, *Crealty Ender*, *Fellesverkstedet*, Oslo, Noruega . Demostrando que el sistema es modular y tiene la capacidad de ser fácilmente instalado en cualquier máquina que se encuentre en desuso, o sea comprada con este fin.

Tal como se presentó en la Resultados el sistema ha sido probado con diversos materiales y en distintas máquinas demostrando tener un sistema funcional y confiable.

Para aquellos que busquen introducirse en el desarrollo de nuevos materiales para la impresión 3D, es que se desarrolló un experimento fácil de realizar, presentado en la sección Pruebas de material, con el cual se podrán testear las características claves que el material debe tener para ser impreso.

14 Bibliografía

Berman, B. (2011). 3-D printing: The new industrial revolution.

Berman, B. (s.f.). 3-D printing: The new industrial revolution.

C, L. (28 de Abril de 2017). *3DNatives* . Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/startup-3d-biomodex-280420172/>

Capella, R. (2000). *Medición del nivel de descargas parciales*. Schneider Electric.

Chryssolouris, H. B. (2014). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review.

Cijes, M. (2019). Neo-Handicraft in America. En W. Gonzalez, *Neo-Handicraft in America* (pág. 125). Lima: VRI UNI.

Collins, D. (5 de Octubre de 2018). *Linear Motion Tips*. Obtenido de <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-cartesian-robot/>

Delta Bots . (s.f.). Obtenido de <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/deltabots-3d-potterbot-7/>

Deyle, T. (2013). *Large-Scale Rapid Prototyping Robots: Industrial Robot Arm Extruders and Building-Scale 3D Printers*. Obtenido de Hizook: <http://www.hizook.com/blog/2013/11/13/large-scale-rapid-prototyping-robots-industrial-robot-arm-extruders-and-building-sca>

Dixon, D. (2010). *Archimides Pumps*.

EFD, N. (s.f.). *Nordston*. Obtenido de <https://www.nordson.com/en/divisions/efd/products/jet-dispensers/p-jet-solderplus-valve>

Elias, Y. Y. (2013). CNC Machine System via STEP-NC Data Model and LabVIEW Plataform for Milling Operation.

Gershenfeld, N. (2012). *How to make almost anything: The digital fabrication revolution*.

H. Bikas, P. S. (2015). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review.

Herpt, O. V. (2013). *oliviervanherpt*. Obtenido de [oliviervanherpt: http://oliviervanherpt.com/3d-printing-ceramics/](http://oliviervanherpt.com/3d-printing-ceramics/)

Hornick, J. &. (2013). 3D printing and intellectual property: Initial thoughts. The. 12-17.

(s.f.). <http://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>.

<https://carbide3d.com/shapeoko/>. (s.f.).

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>. (2018).

[https://www.techspex.com/machining-centers/denford\(2609\)/306](https://www.techspex.com/machining-centers/denford(2609)/306). (s.f.).

Incerti, G. (2000). *On the possibility to minimize trajectory tracking errors of planar robots endowed with compliant joints*.

Joakin Ugalde, J. R. (1 de Septiembre de 2018). *Fab Lab UChile*. Obtenido de Fab Lab UChile : <http://fablab.uchile.cl/proyectos/286/impresora-multimaterial/>

João Brázio, L. L. (2011). *MarlinFW*. Recuperado el 2019, de <http://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>

johnnyr. (s.f.). *reprap.org*. Recuperado el 2019, de https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4

Kahirul, M. (2011). *Design and development of a 4-DOF SCARA robot for educational purpose*.

Keep, J. (5 de Septiembre de 2015). *3dClayPrinting*. Obtenido de <https://3dclayprinting.com/build-your-own-ceramic-delta-3d-printer/>

Kreuger, F. (1992). *Industrial High Voltage 4. Co-ordinating 5. Measuring 6. Teting* .

Kreuger, F. (1992). *Industrial High Voltage 4.Co-ordinating 5.Measuring 6.Testing*. . Delft Univ. Press.

Lara, C. A. (2017). IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE MÚLTIPLES FUENTES DE DESCARGA PARCIAL USANDO ANÁLISIS DE COMPONENTES INDEPENDIENTES.

Lee, K. (25 de 6 de 2015). *0x7d*. Obtenido de 0x7d: <https://0x7d.com/2014/3d-printed-precision-paste-dispenser/>

Macron. (s.f.). *Macron Dynamics*. Obtenido de <https://www.macrondynamics.com/job-stories/gantry-systems-overview>

Moretti, F. (22 de Mayo de 2016). *Wasp*. Obtenido de Wasp: <https://www.3dwasp.com/en/wasp-launches-the-new-professional-clay-extruder/#>

Moyer, I. E. (2012). *CoreXY*. Obtenido de CoreXY: <https://corexy.com/>

Natale, G. (30 de Agosto de 2016). *Piulab*. Obtenido de Piulab:
<http://www.piulab.it/projects/a-lunga-vite>

Pacheco-Torgal, F. (2014). Introduction to the environmental impact of construction and building materials .

Paulo Augusto Sherring da Rocha Junior, R. D. (2010). Prototype CNC Machine Design.

Peleg, D. (s.f.). *DanitPeleg*. Obtenido de <https://danitpeleg.com/product/create-your-own-3d-printed-jacket/#>

Plotter, 3. (s.f.). *3D Plotter*. Obtenido de <https://3dpotter.com/>

Rahul, G. (2017). *Review on Development of Industrial Robotic Arm*.

Scan-Express. (s.f.). Obtenido de Scan-Express: <https://www.scan-xpress.com.au/services/3d-printing/clay/>.

So, A. (28 de 06 de 2019). *Wired*. Obtenido de <https://www.wired.com/story/new-balance-triplecell-3d-printed-shoe/>

Stone Flower 3D. (s.f.). Obtenido de <https://www.stoneflower3d.com/store/3d-printer-stoneflower/>

Tech2C. (4 de Sept de 2016). *Thingiverse*. Recuperado el 2018, de <https://www.thingiverse.com/thing:1752766>

Tomas Duda. (s.f.).

Willner-Giwer, S. (s.f.). <https://sites.google.com/site/machinecontroltoolkit/examples>.

Wilson, M. (2015). *Science Direct*. Obtenido de
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/delta-robot>

Xin Wang, M. J. (2016). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective.

Yusri Yusof, K. L. (2015). Development of new Open Soft-CNC System.

15 Anexos

Anexo 1 – Tabla de parámetros estándar DIN 69051 para husillos de bolas SFU.

TBI MOTION 滾珠螺桿規格表 Dimension Table of TBI MOTION Ball Screws

型式 (TYPE) : SFU (DIN 69051 FORM B)

Technical drawings of TBI MOTION ball screws showing cross-sections and side views with dimensions. The drawings include: 8-X 通孔 (Hr.) with 45° and 22.5° angles; 8-X 通孔 (Hr.) with 30°, 15°, and 30° angles; and a side view showing dimensions d, W, B, L, and d. The unit is mm.

單位 (Unit) : mm

I: 導程 Lead Da: 珠徑 Ball Dia. n: 珠圈數 Number of Circuits K: 剛性 Stiffness (Kg/μm)
Ca: 動額定負荷 Basic Dynamic Rating Load (Kg) Coa: 靜額定負荷 Basic Static Rating Load (Kg)

型號 Model No.	d	l	Da	D	A	B	L	W	X	H	Q	n	Ca	Coa	K	
SFU01204-4	12	4	2.5	24	40	10	40	32	4.5	30	1x4	902	1884	26		
★ SFU01604-4	4	2.381	28	48	10	40	38	5.5	40	M6	1x4	973	2406	32		
★ SFU01605-4	16	5	3.175	28	48	10	50	38	5.5	40	M6	1x4	1380	3052	32	
★ SFU01610-3	10	3.175	28	48	10	57	38	5.5	40	M6	1x3	1103	2401	28		
SFU02004-4	4	2.381	36	58	10	42	47	6.6	44	M6	1x4	1086	2987	38		
★ SFU02005-4	5	3.175	36	58	10	51	47	6.6	44	M6	1x4	1551	3875	39		
SFU02504-4	4	2.381	40	62	10	42	51	6.6	48	M6	1x4	1180	3795	43		
★ SFU02505-4	5	3.175	40	62	10	51	51	6.6	48	M6	1x4	1724	4904	45		
SFU02506-4	25	6	3.969	40	62	10	54	51	6.6	48	M6	1x4	2318	6057	47	
SFU02508-4	8	4.762	40	62	10	63	51	6.6	48	M6	1x4	2963	7313	49		
★ SFU02510-4	10	4.762	40	62	12	85	51	6.6	48	M6	1x4	2954	7295	50		
SFU03204-4	4	2.381	50	80	12	44	65	9	62	M6	1x4	1296	4838	51		
★ SFU03205-4	5	3.175	50	80	12	52	65	9	62	M6	1x4	1922	6343	54		
SFU03206-4	6	3.969	50	80	12	57	65	9	62	M6	1x4	2632	7979	57		
SFU03208-4	8	4.762	50	80	12	65	65	9	62	M6	1x4	3387	9622	60		
★ SFU03210-4	10	6.35	50	80	12	90	65	9	62	M6	1x4	4805	12208	61		
★ SFU04005-4	5	3.175	63	93	14	55	78	9	70	M8	1x4	2110	7988	63		
SFU04006-4	6	3.969	63	93	14	60	78	9	70	M6	1x4	2873	9913	66		
SFU04008-4	8	4.762	63	93	14	67	78	9	70	M6	1x4	3712	11947	70		
★ SFU04010-4	10	6.35	63	93	14	93	78	9	70	M8	1x4	5399	15500	73		
SFU05010-4	10	6.35	75	110	16	93	93	11	85	M8	1x4	6004	19614	85		
★ SFU05020-4	20	7.144	75	110	16	138	93	11	85	M8	1x4	7142	22588	94		
SFU06310-4	10	6.35	90	125	18	98	108	11	95	M8	1x4	6719	25358	99		
SFU06320-4	20	9.525	95	135	20	149	115	13.5	100	M8	1x4	11444	36653	112		
★ SFU08010-4	10	6.35	105	145	20	98	125	13.5	110	M8	1x4	7346	31953	109		
SFU08020-4	20	9.525	125	165	25	154	145	13.5	130	M8	1x4	12911	47747	138		
SFU10020-4	100	20	9.525	150	202	30	180	17.5	155	M8	1x4	14303	60898	162		

備註: 有標註★記號者可製作左螺紋 Note: with sign★ can be produced in left helix

Anexo 2 – Firmware para operar como PID utilizando el sistema de alimentación neumático.

```
#include <PID_v1.h>
#include <Wire.h>
#include <SFE_BMP180.h>

SFE_BMP180 bmp180;

int Altitude = 558;
float comp;

#define PIN_OUTPUT 3

//Definir variables de entrada
double Setpoint, Input, Output;

//parametros del PID
double Kp=0.3, Ki=1, Kd=0;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

void setup()
{
    //Initialize pressure sensor
    Serial.begin(9600);
    bool success = bmp180.begin();
    if (success) {
        Serial.println("BMP180 init success");
    }
    //fijar punto objetivo para el PID
    Setpoint = 1800;

    //inciiar PID
    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
}

void loop()
{
    char status;
    double T, P;
    bool success = false;

    status = bmp180.startTemperature();

    if (status != 0) {
        delay(3);
        status = bmp180.getTemperature(T);

        if (status != 0) {
            status = bmp180.startPressure(3);

            if (status != 0) {
                delay(status);
                status = bmp180.getPressure(P, T);

                if (status != 0) {
                    comp = bmp180.sealevel(P, Altitude);
                }
            }
        }
    }
}
```

Anexo 3 – Firmware para el motor stepper del sistema de alimentación mecánico.

```
#include <TFT.h>

#include <AccelStepper.h>

#define dirPin 8
#define stepPin 9
#define motorInterfaceType 1
AccelStepper stepper = AccelStepper(motorInterfaceType, stepPin, dirPin);

void setup()
{
    stepper.setMaxSpeed(1000);
    stepper.setSpeed(0.3);
}

void loop()
{
    digitalWrite(dirPin,HIGH);
    stepper.runSpeed();
}
```

Anexo 4 – GCode de inicialización de la impresora 3D para insertar en el *software* Cura.

```
M109 S0
M82 ;absolute extrusion mode
M107
M302 P1
G28
```