



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA CNC CON ACOPLAMIENTO FDM PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS EN 3D

Autores:

**Carlos Augusto Ramos Jaramillo
Oswaldo Hernández Londoño**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Villavicencio, Colombia
2021

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA CNC CON ACOPLAMIENTO FDM PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS EN 3D

**Carlos Augusto Ramos Jaramillo
Oswaldo Hernández Londoño**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

Jhonattan Bulla Espinosa, MSc

Línea de Investigación:

Robótica

Sistemas Electrónicos

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2021

Dedico este proyecto principalmente con mucho cariño a mi madre, la razón por la cual estoy aquí en otra etapa más de mi vida profesional.

A mis amigos incondicionales por la ayuda desinteresada brindada en cada obstáculo que se me presentó en este camino, gracias por su apoyo he llegado a cumplir una de mis metas.

A cada uno de los docentes que me depositaron su confianza y dedicación para formarme como profesional.

Carlos.

Agradecimientos

Inicialmente queremos agradecer a nuestras familias por depositar en nosotros toda su confianza, darnos la fortaleza para afrontar todas las dificultades que se cruzan en el camino y por brindarnos su amor incondicional en los buenos y en los malos momentos.

Les extendemos un sincero agradecimiento a todos los docentes y directivos del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Antonio Nariño por su gran acompañamiento en la formación académica y personal a lo largo de toda la carrera haciendo parte de nuestra formación profesional, pues cada uno de ellos aportó su valioso tiempo y conocimiento.

Por último, un agradecimiento infinito a todos los compañeros que compartieron y aportaron su granito de arena para motivarnos a seguir siempre adelante en busca de nuestros sueños.

Resumen

Las máquinas-herramientas de control numérico computarizado (CNC) configuran una tecnología y un elevado grado de eficacia, exactitud, uniformidad y mecanizado en la fabricación de piezas, por otro lado, la impresión 3D no es algo nuevo en el mundo tecnológico, desde hace mucho tiempo se fabrican objetos en 3 dimensiones para su réplica y producción en masa. Esto es a través de diferentes tipos de tecnologías de impresión 3D como lo es la FDM (Fused deposition modeling).

El presente trabajo se basa en el diseño y construcción de una maquina CNC con un acoplamiento de un sistema FDM para la fabricación de piezas en 3D para poder realizar prácticas de laboratorio en la Universidad Antonio Nariño (UAN) Sede Villavicencio la cual no cuenta con máquinas-herramientas de este tipo. La máquina permitirá obtener modelos físicos de diseñados hechos en CAD (computer-aided design) y el sistema estará compuesto por una estructura física que permitirá movimientos en los tres ejes (x, y, z).

Este trabajo describe cada una de las fases para la construcción de la estructura física y los parámetros del software de análisis de la información.

Palabras clave: CNC, FDM, Impresora, 3D, Prototipo, Diseño.

Abstract

Computerized numerical control (CNC) machine tools configure a technology and a high degree of efficiency, accuracy, uniformity and machining in the manufacture of parts, on the other hand, 3D printing is not something new in the technological world, since 3-dimensional objects are made for a long time for replication and mass production. This is through different types of 3D printing technologies such as FDM (Fused deposition modeling).

This work is based on the design and construction of a CNC machine with a coupling of an FDM system for the manufacture of 3D parts in order to reduce the costs of extra machines for laboratory practices at the Antonio Nariño University (UAN) Headquarters Villavicencio, which does not have machine tools of this type. The machine will allow to obtain physical models of designs made in CAD (computer-aided design) and the system will consist of a physical structure that will allow movements in the three axes (x, y, z).

This work describes each of the phases for the construction of the physical structure and the parameters of the information analysis software.

Keywords: CNC, FDM, Printing, 3D, Prototype, Design.

Contenido

Pág.

1. Marco teórico	3
1.1 Control Numérico computarizado	3
1.1.1 Funcionamiento de máquinas CNC	4
1.1.2 Código G y M	5
1.1.3 Diagrama de flujo	7
1.2 Impresión 3D	8
1.2.1 Funcionamiento de la impresora 3D	9
1.2.2 Clasificación de las impresoras 3D	10
1.2.3 Modelado por deposición de hilo fundido (FDM).	12
1.3 Materiales	13
1.3.1 Acrylonitrilo butadieno styreno (ABS).	15
1.4 Sistema de control	16
1.4.1 Control de lazo abierto:	16
1.4.2 Control de bucle cerrado	17
1.5 Programa para la comunicación	18
1.5.1 Cura	19
1.5.2 Repetier-Host	19
2. Metodología.....	21
2.1 Diseño y construcción de un prototipo de máquina CNC	21
2.1.1 Metodología del diseño	22
2.1.2 Adaptación del diseño CAD	22
2.1.3 Ordenar Materiales	23
2.1.4 Fabricación.....	23
2.1.5 Ensamble	24
2.2 Adaptación de un sistema FDM extraíble a la máquina CNC.	24
2.2.1 Extrusor.....	24
2.2.2 Motor paso a paso para filamento.....	26
2.2.3 Plancha de calentamiento.....	26
2.3 Acople del sistema electrónico para el control de los motores paso a paso	27
2.3.1 Controlador principal	27
2.3.2 Tarjeta Arduino.....	27
2.3.3 Shield Ramps 1.4	28
2.3.4 Motor paso a paso	29
2.3.5 Drivers para motores.....	30
2.3.6 Calibración driver A4988.....	30
2.3.7 Ajuste el voltaje de referencia del driver	31

2.3.8	Alimentación	32
2.3.9	Software de control Marlin 1.x	32
2.3.10	Configuración del firmware Marlin 1.x.....	33
2.4	Calibración del sistema de coordenadas a través de un modelo patrón	36
2.4.1	Ajustes iniciales	36
2.4.2	Ajustes del eje Z	38
2.4.3	Ajustes del eje X	39
2.4.4	Ajuste del eje Y	39
2.5	Diseño de un entorno gráfico para la manipulación de la máquina.....	39
3.	Resultados	40
3.1	Estructura base con acople FDM	40
3.2	Ensamble del sistema eléctrico	41
3.3	Diseño eléctrico	42
3.3.1	Conexión entre Arduino Mega y controladores de motores paso a paso	43
3.4	Sistema de control.....	45
3.4.1	Control a lazo cerrado.....	47
3.4.2	Sistema de calentamiento.....	48
3.4.3	Sistema de control de posicionamiento	49
3.5	Pruebas y ajustes	51
3.5.1	Pruebas de temperatura	55
3.6	Interfaz para el usuario.....	56
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	58
4.1	Conclusiones	58
4.2	Recomendaciones.....	59

Lista de figuras

Figura 1-1 Máquina CNC con sus respectivos ejes.	4
Figura 1-2 Diagrama de flujo del funcionamiento de una máquina CNC	7
Figura 1-3. Charles “Chuck” W. Hull inventor de la Estereolitografía.....	8
Figura 1-4 Máquina SLA-1 inventada por Charles “Chuck” Hull en 1987 y actualmente ...	9
Figura 1-5 Los diferentes componentes de una impresora por Estereolitografía (SLA) ..	10
Figura 1-6 Los diferentes componentes de una impresora de Sintetizado Selectivo por Laser (SLS).....	11
Figura 1-7 Proceso de Sinterización Selectiva por Láser	12
Figura 1-8 Esquema Sistema FDM.	13
Figura 1-9 Objeto moldeado en ABS.	15
Figura 1-10 Sistema de control de lazo abierto.....	17
Figura 1-11 Sistema de control de lazo cerrado	18
Figura 1-12 Software Repetier-host	18
Figura 2-1 Estructura base de la máquina en SolidWorks	21
Figura 2-2 Extrusor.....	25
Figura 2-3 Plancha de calentamiento.....	26
Figura 2-4 Arduino Mega 2560.....	28
Figura 2-5 Shiel Ramps 1.4.....	28
Figura 2-6 Motor paso a paso Nema 17.....	29
Figura 2-7 Driver A4988	30
Figura 2-8 Medios pasos de un motor.....	31
Figura 2-9 Fuente de alimentación.....	32
Figura 2-10 Firmware Mariln 1.x	33
Figura 2-11 Proceso de selección de velocidad en la comunicación del firmware Marlín	34
Figura 2-12 Parámetros del firmware para controlar temperatura del extrusor.....	35
Figura 2-13 Parámetros que establecen el control PID de la temperatura	36
Figura 2-14 Final de carrera.....	37
Figura 2-15 Configuración de los pasos por mm en cada eje, máxima velocidad y máxima aceleración en el movimiento.	38
Figura 3-1 Estructura base.....	40
Figura 3-2 Estructura base con acople FDM.....	41
Figura 3-3 Estructura Shield Ramps 1.4	42
Figura 3-4 Estructura del diseño eléctrico conectado.	42
Figura 3-5 Estructura general del driver A4988	43

Figura 3-6 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Eje x).....	44
Figura 3-7 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Eje y).....	44
Figura 3-8 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Eje z).....	44
Figura 3-9 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Extrusor)	45
Figura 3-10 Conexión Arduino Mega y Finales de carrera X, Y, Z	45
Figura 3-11 Proceso de impresión con su sistema de control	46
Figura 3-12 Adquisición de pulsos utilizando un control a lazo cerrado	48
Figura 3-13 Señales STEP y DIR para el movimiento del motor X.....	50
Figura 3-14 Figura para calibración	51
Figura 3-15 Longitud de diseño vs Longitud obtenida	52
Figura 3-16 Ancho de diseño vs Ancho obtenido	53
Figura 3-17 Movimiento Teórico vs Movimiento Obtenido (10mm).....	54
Figura 3-18 Movimiento Teórico vs Movimiento Obtenido (1mm).....	55
Figura 3-19 Curva de temperatura del extrusor y la plancha de calentamiento.....	56

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Comando básicos de códigos G y sus acciones	6
Tabla 1-2 Características principales de los tipos de materiales para impresión 3D	14
Tabla 2-1 Temperaturas recomendables para el extrusor y la cama	25
Tabla 2-2 Conexión de pines	30
Tabla 3-1 Frecuencias del controlador para diferentes velocidades.	50
Tabla 3-3 Muestras de modelo de calibración.....	52
Tabla 3-4 Muestras del desplazamiento en Z (10mm)	53
Tabla 3-5 Muestras del desplazamiento en Z (1mm)	54

Introducción

El Control Numérico Computarizado (CNC) automatiza los movimientos de una máquina-herramienta, insertando al sistema instrucciones codificadas y optimizando la productividad en diversas áreas, siendo una de ellas la impresión en 3 dimensiones (3D). En este proceso, se crean piezas a partir de un modelo digital empleando capa sobre capa de diversos materiales según las particularidades de la impresora, en contraposición a las metodologías de la fabricación sustractiva, tales como el mecanizado tradicional. En la actualidad existen diferentes métodos disponibles para la impresión 3D en el mercado, y estas tecnologías día a día poseen más alcances y brindan más facilidades en las condiciones para el diseño y fabricación de piezas en 3D (Wan et al., 2010).

Cabe destacar que en el mercado nacional no se comercializan máquinas con doble funcionalidad CNC-Impresora 3D. Asimismo, en la Universidad Antonio Nariño, Sede Villavicencio, no se han generado desarrollos prototipo o trabajos similares que propendan el desarrollo de prácticas de laboratorios en esta área del conocimiento. Este proyecto, presenta la metodología y resultados obtenidos tras el desarrollo de un prototipo de máquina herramienta CNC con acoplamiento de un sistema de modelamiento por deposición fundida, esta tecnología, más conocida como FDM de las siglas en inglés *Fused Deposition Modeling* en donde los estudiantes de ingenierías podrán realizar prácticas de laboratorio orientadas en la programación CNC.

En su desarrollo se integran teorías, principios, estrategias y herramientas del diseño mecánico, la automatización y control que permiten la construcción de la misma. Los resultados de este proyecto constituyen un referente de diseño de una maquina CNC y la evaluación de los productos terminados por su uso en el campo del prototipado rápido.

La combinación de diferentes materias como robótica, sistemas de control, maquinas eléctricas y elementos de máquinas, son bases fundamentales para la implementación de la impresora 3D de control numérico computarizado.

El libro está dividido en 4 capítulos que describen el diseño e implementación de la impresora 3D. Capítulo 1 describe la revisión bibliográfica sobre el estado actual del conocimiento y las teorías aplicadas, en los capítulo 2 se muestra el diseño mecánico del sistema de posicionamiento tridimensional y el diseño de la herramienta extrusora de material, y presenta los criterios de selección del sistema electrónico de control y las herramientas informáticas que comandan el proceso de impresión, el capítulo 3 presentan los resultados obtenidos tras el desarrollo, y finalmente, el capítulo 4 presenta los apartados de conclusiones, recomendaciones y logros obtenidos con el proyecto.

1. Marco teórico

1.1 Control Numérico computarizado

Las máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC) contienen una tecnología que controla una gran variedad de herramientas industriales por medio de un conjunto de elementos que permiten automatizar los movimientos de los ejes X, Y, y Z de la máquina como se observa en la Figura 1-1.

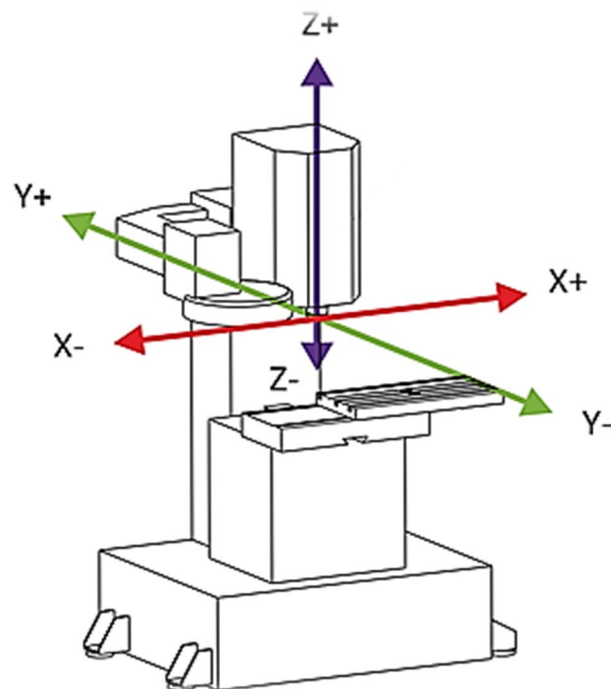
En la actualidad se pueden apreciar diferentes tipos de CNC, las más comunes son el tipo fresadora de puente, la cual se destaca debido a que fue uno de los primeros diseños, su estructura es ligera y robusta a la vez, por lo que permite realizar movimientos rápidos, grabados o mecanizado de materiales blandos. Otro tipo de CNC es la fresadora de 3 ejes, siendo este tipo la más comercial debido a su estructura robusta la cual permite el mecanizado sobre materiales duros, haciendo que su peso sea mayor a los demás tipos de CNC. Y, por último, tenemos el torno fresadora el cual es capaz de mecanizar piezas con formas cilíndricas y realizar perforaciones a los costados del material (Castro Cervantes & Contreras Hernández, 2017).

La aplicación de esta técnica es muy utilizada en torneado, taladrado, fresado y, hoy en día, ampliando su aplicación a otras tareas distintas al mecanizado, como la impresión 3D. Un sistema CNC es normalmente construido con 3 ejes, X, Y para el movimiento de la pieza de trabajo y Z para el movimiento de la herramienta. Con un sistema CNC es posible obtener una alta precisión a lo largo del eje, con la ayuda de motores paso a paso o servomotores. Estos motores generalmente están orientados en el plano Z para obtener una precisión aún mejor. En un sistema CNC típico, el operador crea una serie de pasos desde un diseño asistido por computadora, (más conocido como CAD por sus siglas en inglés "*computer-aided design*") y la máquina convierte estos pasos en movimientos por

medio un código llamado “G” para crear una pieza que coincida con el CAD original (Gómez & Sola, 2013).

En la actualidad se pueden apreciar diferentes tipos de CNC, los más comunes son el tipo fresadora de puente, la cual se destaca debido a que fue uno de los primeros diseños, su estructura es ligera y robusta a la vez, por lo que permite realizar movimientos rápidos, grabados o mecanizado de materiales blandos. Otro tipo de CNC es la fresadora de 3 ejes, siendo este tipo la más comercial debido a su estructura robusta la cual permite el mecanizado sobre materiales duros, haciendo que su peso sea mayor a los demás tipos de CNC. Y por último, tenemos el torno fresadora el cual es capaz de mecanizar piezas con formas cilíndricas y realizar perforaciones a los costados del material (Castro Cervantes & Contreras Hernández, 2017).

Figura 1-1 Máquina CNC con sus respectivos ejes.



Fuente: *CNC Milling Coordinate System Made Easy*

1.1.1 Funcionamiento de máquinas CNC

Las máquinas CNC poseen un sistema que incorpora la asistencia por computadora para llevar a cabo las diferentes tareas de control de los procesos necesarios para la

manufactura de un producto. El sistema incluye tecnologías que emplean: máquinas-herramientas que son controladas numéricamente, sistemas flexibles de manufactura y un sistema de inspección asistida por computadora que recopila automáticamente la información del control de calidad y analiza los informes estadísticos (Castro Cervantes & Contreras Hernández, 2017).

Para obtener los diseños a mecanizar, las máquinas CNC se apoyan en las tecnologías CAM y CAD, el mecanizado CAM es un término en inglés que define la fabricación asistida por ordenador (computer-aided manufacturing), por otro lado, la tecnología CAD (computer-aided design, responsable de los diseños de planos 2D y 3D de piezas que conocemos). El CAM utiliza los modelos y ensamblajes creados en el software CAD para generar las trayectorias de las herramientas dirigidas por las máquinas, y así convertir los diseños en planos virtuales en partes (Blasnilo et al., 2018) (Nandi et al., 2017).

1.1.2 Código G y M

La mayoría de las máquinas herramientas CNC utilizan un lenguaje de programación establecido por la Asociación de la Industria Electrónica (EIA) en la década de 1960. El nombre oficial de este idioma es RS-274D, pero todos se refieren a él como “código G” o “código G&M” debido a que muchas de las palabras de este idioma comienzan con las letras G o M.

El código G como lenguaje de programación está dedicado especialmente para las máquinas herramienta CNC, ya que esta lee los códigos, los interpreta y de este modo genera los movimientos u otra tarea. Es un lenguaje de programación exclusivo, pero puede variar de una máquina a otra, sin embargo los conceptos básicos siguen un estándar adoptado por la industria (Gómez & Sola, 2013).

Cuando se realiza un programa en código G, se deben tener algunas reglas en cuenta, así como unos formatos ya establecidos de manera general y se deben seguir o al menos considerar. La primera parte de cualquier programa debe ser un bloque de inicio para asegurar que algunos módulos estén desactivados y otros estén configurados de la mejor manera. Un ejemplo de código sería el siguiente:

```
G00 G90 G17 G54 G40 G49 G80
```

Este bloque de código configura a la máquina en un modo rápido y emplea una posición absoluta en el plano ZX y al mismo tiempo nos aseguramos de que se cancelen los ciclos fijos activos. En la tabla 1-1 se puede apreciar algunos comandos del código G.

Tabla 1-1 Comando básicos de códigos G y sus acciones

Comandos	Descripción
G00	Interpolación Lineal Rápida.
G01	Interpolación lineal a la velocidad programada en el registro F.
G02	Movimiento Circular en el sentido horario Feedrate.
G03	Movimiento Circular en el sentido anti-horario Feedrate.
G04	Es una demora o una pausa con un tiempo específico.
G17	Selección del Plano X-Y
G18	Selección del Plano X-Z
G19	Selección del Plano Y-Z
G40	Compensación anulada, o al centro de la línea de desplazamiento.
G41	Compensación a la Izquierda de la línea de desplazamiento.
G42	Compensación a la Derecha de la línea de desplazamiento.
G70	Unidad de Datos expresados en Pulgadas.

Fuente: Tabla propia.

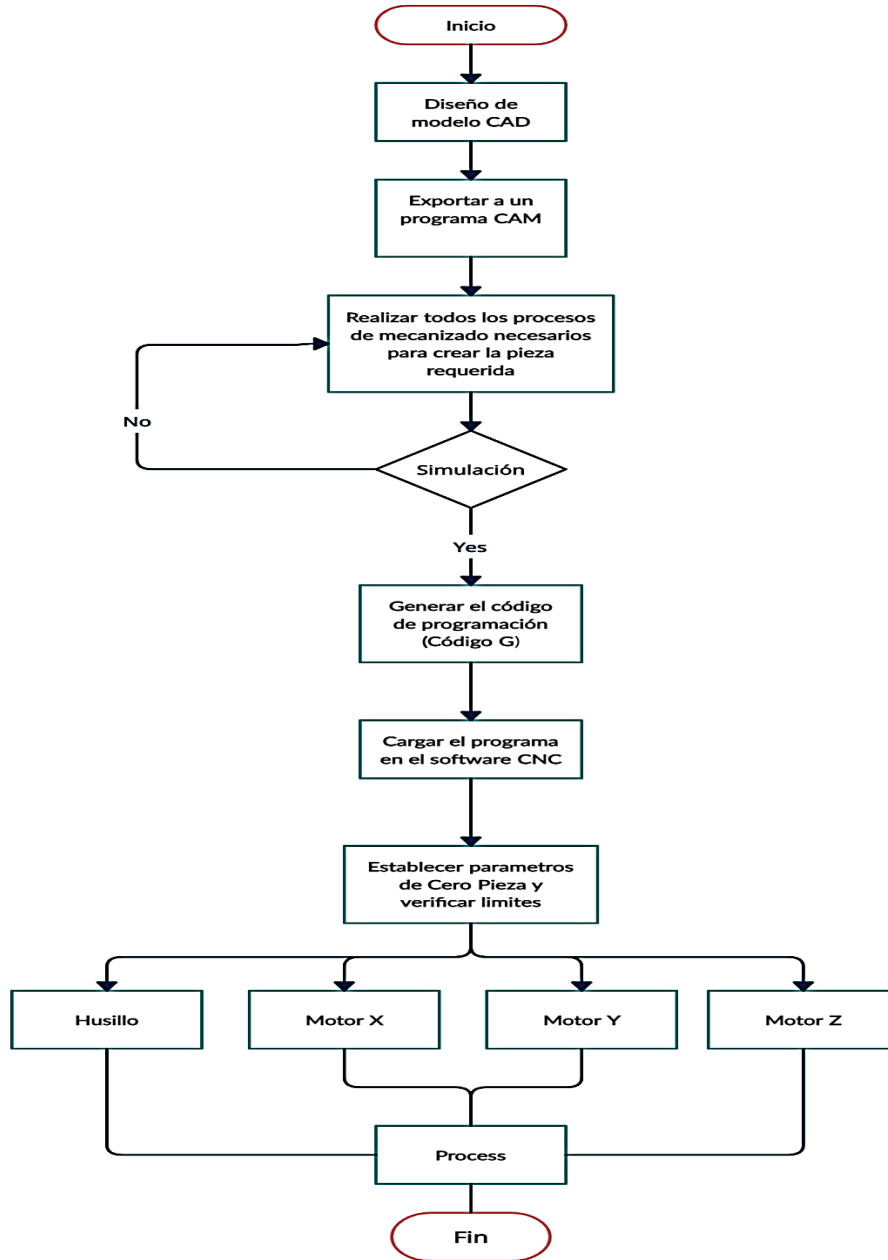
Como se puede apreciar en la tabla 1-1, el primer comando G00 representa un movimiento rápido, este código ordena a la máquina que se mueva lo más rápido posible a un punto específico, siempre se usa con una posición de coordenadas específica, a diferencia de G01, G00 no coordina los ejes para moverse en línea recta, sino que cada eje se mueve a su máxima velocidad hasta su límite, sin ser controlados puede llegar a ocasionar que uno de los ejes llegue a su posición final antes que otro. En ese punto, dejará de moverse, pero el otro continuará hasta terminar su trayectoria.

Por otro lado, los códigos M se encargan de programar las funciones especiales de la máquina, como, por ejemplo: Iniciar las acciones, finalizar las acciones, pausar las acciones, Pausar las maquinas-herramientas, llamado de un subprograma, etc.

1.1.3 Diagrama de flujo

A continuación, se muestra en la Figura 1-2, el diagrama de flujo para el procesamiento de un programa en CNC. Para la realización de mecanizado de una parte es necesario seguir cada uno de los pasos.

Figura 1-2 Diagrama de flujo del funcionamiento de una máquina CNC



Fuente: *Diagrama de flujo fresadora CNC*

1.2 Impresión 3D

En 1986, Charles (Chuck) Hull presenta la primera patente de una impresora 3D por medio de la tecnología de estereolitografía (SLA) diseñada por él mismo en 1983. Al obtener la patente, pasa a cofundar 3D Systems Corporation, que es una de las más grandes organizaciones que hoy en día operan en el mundo de la impresión 3D. Varios años más tarde, entre 1989 y 1990, S. Scott Crump, fundador a su vez de Stratasys, desarrolló la técnica de Fused Deposition Modeling (FDM), que consistía en la creación de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas de material fundido que posteriormente solidificaba en la forma deseada (Valderrama Gamez, 2020).

Figura 1-3. Charles “Chuck” W. Hull inventor de la Estereolitografía



Fuente: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102825479-breve-historia-de-la-impresion-3d>

En 1990, el sector comenzó a dividirse en dos áreas específicas. La primera consideraba la gama alta de impresión 3D, que sirvió para la producción de piezas complejas en aplicaciones que incluyeron las áreas de medicina, la aeroespacial, joyería, entre otras. Luego estaba el diseño de piezas a bajo costo en el mercado, que terminó en una guerra de precios entre muchos fabricantes de impresoras 3D, destacando mejoras en velocidad, precisión y materiales. En 2007, 3D Systems puso en venta la primera Impresora 3D cuyo precio fue inferior a \$ 10.000, y comenzó el desarrollo de impresoras comerciales (Valderrama Gamez, 2020).

Figura 1-4 Máquina SLA-1 inventada por Charles “Chuck” Hull en 1987 y actualmente



Fuente: www.3dprint.com

El 2013 Fue un año de crecimiento significativo y consolidación para la impresión 3D. Los materiales para impresión 3D fueron muy limitados durante los primeros días de la tecnología. Hoy en día existe una variedad de diferentes tipos de materiales disponible para su elección (Valderrama Gamez, 2020).

1.2.1 Funcionamiento de la impresora 3D

Toda máquina impresora 3D posee la misma arquitectura estructural basada en el principio básico de una fresadora CNC, lo que significa que contiene un cabezal robótico que se moviliza en torno a los 3 ejes (X, Y y Z) mediante el lenguaje de programación que consta de los códigos G y M, para así fundir e inyectar un material específico en el área donde se quiere imprimir la pieza (Castro Cervantes & Contreras Hernández, 2017).

A diferencia de una máquina fresadora CNC, la cual opta por usar una tecnología sustractiva en donde se va desprendiendo material para obtener el objeto deseado, la impresión 3D se basa en la tecnología aditiva la cual permite elaborar un objeto mediante la integración de material por capas o punto a punto (Castro Cervantes & Contreras Hernández, 2017).

La primera forma de crear un tridimensional objeto capa por capa usando ayuda por computadora diseño (CAD) fue por medio de un prototipo rápido, desarrollado en la década de 1980 para crear modelos. La fabricación aditiva permite una producción rápida y

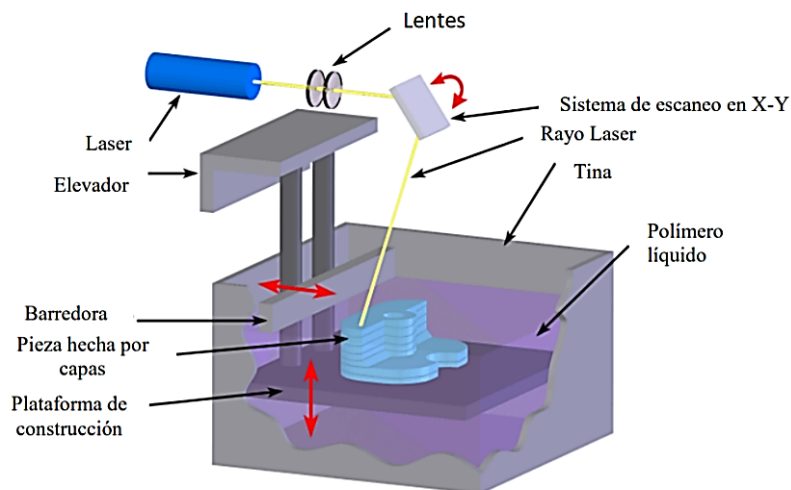
rentable, reduce uso de material y recuento de piezas, y acorta ciclos de diseño (Castro Cervantes & Contreras Hernández, 2017).

1.2.2 Clasificación de las impresoras 3D

Pese a la gran diversidad de tipos de impresión 3D existentes, todas las impresoras comparten una característica común: el objeto se imprime capa a capa, empezando por la inferior y acabando en la superior, siguiendo el modelo del archivo CAD previamente creado en la computadora (Castro Cervantes & Contreras Hernández, 2017) (Leon Medina & Torres Diaz, 2013). Los tipos de impresión más comunes son los siguientes:

Estereolitografía: Es uno de los primeros métodos de impresión 3D, el cual consiste en un láser ultravioleta que es inyectado a una resina sensible a la luz contenida en un cubo. El láser, capa a capa va solidificando la resina hasta que el objeto obtenga de forma aditiva la forma prediseñada. En la figura 1-5 se puede apreciar los diferentes componentes de una impresora por Estereolitografía (SLA)

Figura 1-5 Los diferentes componentes de una impresora por Estereolitografía (SLA)

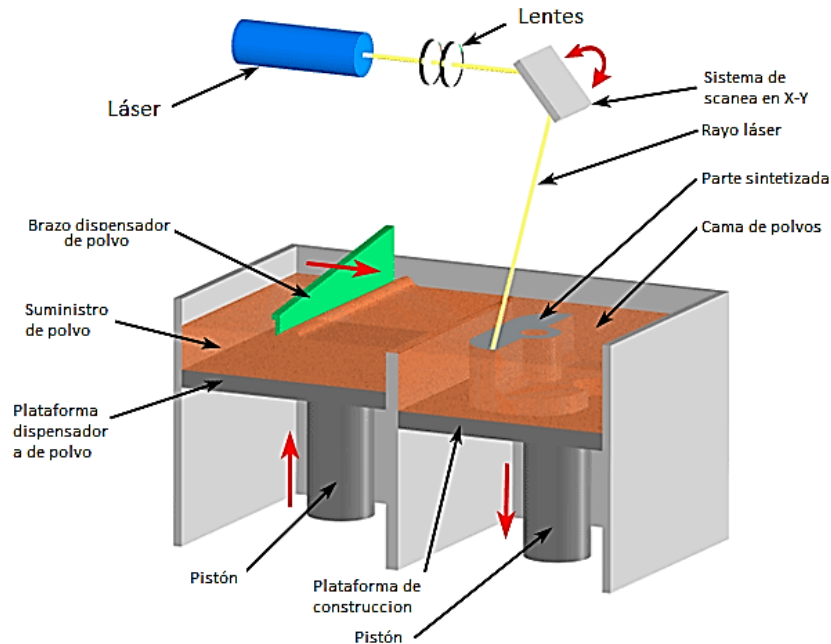


Fuente: <http://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>

Impresión por láser: Este método consiste en la compactación del material con el que se quiere imprimir la pieza que se encontrará pulverizado a una temperatura cerca a la

fundición a través de la aplicación de un láser. En la figura 1-6 se puede apreciar los diferentes componentes de una impresora por de Sintetizado Selectivo por Laser (SLS)

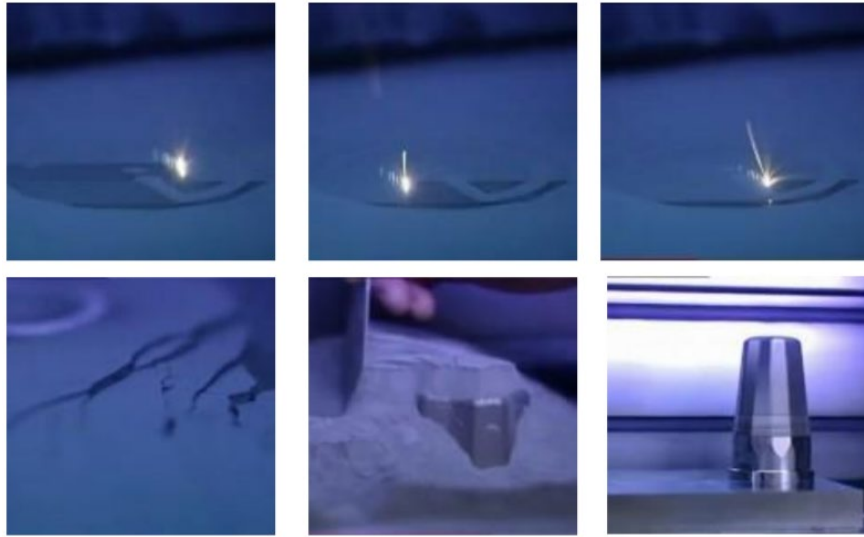
Figura 1-6 Los diferentes componentes de una impresora de Sinterizado Selectivo por Laser (SLS)



Fuente: <http://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>

Impresión por inyección: Similar a la tecnología de impresión por láser, la diferencia está basada en que, en vez de emplear un láser, la pieza estará en las mismas condiciones que en la tecnología por SLS, es decir, en polvo y a una temperatura cercana a la fundición, esta tecnología permite imprimir en color, ya que el aglomerante utilizado puede tener un color u otro. En la figura 1-7 se puede apreciar el proceso de sinterización selectiva por láser.

Impresión por deposición de material fundido: La impresión por deposición fundida es una de las más usadas hoy en día y consiste en que el material deberá ser extruido en hilos minúsculos para poder solidificarse nada más al caer en la superficie. El extrusor se irá moviendo para que el material sólido vaya tomando la forma de cada capa.

Figura 1-7 Proceso de Sinterización Selectiva por Láser

Fuente: <http://www.youtube.com/watch?v=xVNKAYt7LZM>

1.2.3 Modelado por deposición de hilo fundido (FDM).

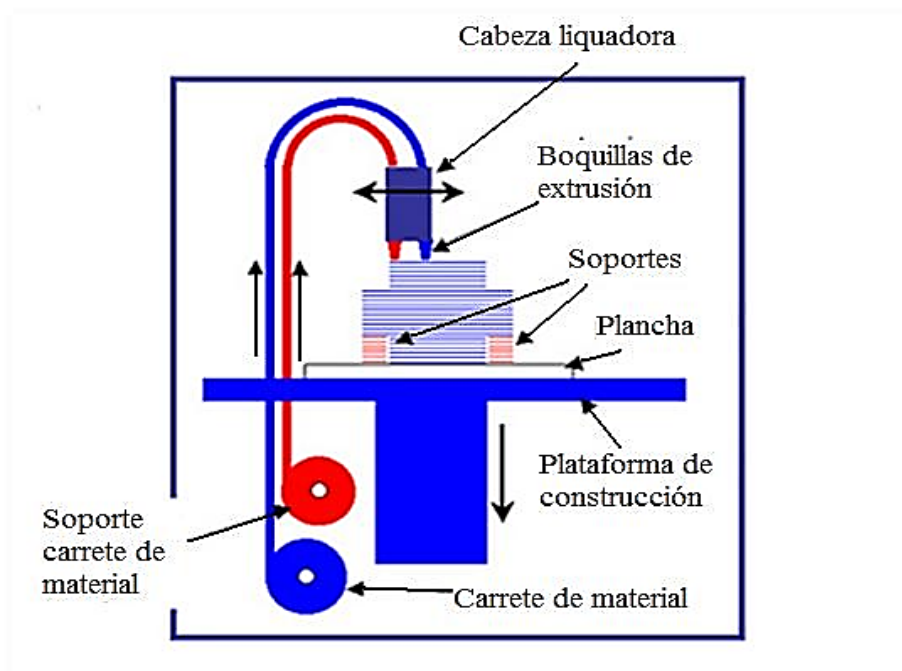
Fusion Deposited Modelling (FDM). Es una tecnología aditiva la cual se va a construir punto a punto el diseño preliminar en los diferentes ejes X-Y de una forma horizontal y el eje Z posteriormente obteniendo el objeto tridimensional (IZA ALMACHI, 20016).

El funcionamiento de esta tecnología es mediante un filamento de plástico que se encuentra en un carrete que abastece el material hacia una boquilla de extrusión. En donde la boquilla se encuentra alimentado por este filamento con un tamaño considerado de 1.25 mm, siendo esta calentada con una temperatura entre 0.5 a 1 °C por debajo del punto de fusión del filamento. El extrusor o boquilla se encuentra montada sobre un eje mecánico que le permite movimientos en sentido horizontal y vertical (IZA ALMACHI, 20016).

La boquilla se va a desplazar sobre la plancha o soporte de acuerdo a la geometría adecuada, depositando una fina capa de plástico extruida para formar la capa del objeto. El plástico se endurece inmediatamente a paso que se va a realizando el trabajo adhiriéndose a la capa que previamente fue hecha. Se encuentra ubicado el sistema dentro de una cámara la cual conserva la temperatura por debajo del punto de fusión del plástico (IZA ALMACHI, 20016) (Kun, 2016).

El cabezal va a extruir el plástico por capas hasta que se encuentre completo el prototipo. De la misma forma para sustentar las piezas en las zonas en voladizo, se implementa la extracción de un segundo material como soporte que se elimina fácilmente posteriormente a la finalización de la pieza. Permittiéndonos obtener prototipos funcionales por medio de materiales termoplásticos, dirigidos para ensayos y montajes incluso con materiales con una resistencia a altas temperaturas (200 °C) (IZA ALMACHI, 20016). En la figura 1-8 se pueden observar los diferentes componentes de un sistema de extrusión por FDM

Figura 1-8 Esquema Sistema FDM.



Fuente: Laboratory of Information Processing Science.

1.3 Materiales

A la hora de imprimir en 3d, se debe tener en cuenta todas las ventajas y desventajas que ofrecen los materiales que se usan, sin olvidar las técnicas de impresión que hay que aplicar a cada material. Además de los tipos más comunes, como son el filamento PLA y ABS el cual es un material de resistencia adecuada. De la misma forma se han introducido materiales como el policarbonato, mezclas PC-ABS y polifenilsulfonas, permitiendo

augmentar la capacidad del método en cuanto a la resistencia y el rango de temperatura (IZA ALMACHI, 20016).

Comparación entre materiales.

En la siguiente tabla se pueden observar las características que tienen los diferentes materiales. Permitiendo identificar las tolerancias exactas, las pruebas exigentes y los entornos rigurosos. Según la idea principal “Los prototipos, herramientas y accesorios FDM aguantan el uso constante de la producción más rigurosa y se comportan bien en las aplicaciones más exigentes como los prototipos HVAC y las carreras automovilísticas”. En la tabla 1-2 se pueden apreciar las características principales de todos los tipos de materiales con los cuales se puede hacer impresión en 3D y así poder hacer una buena elección del material más óptimo y rentable.

Los sistemas HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), están relacionados con los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado (IZA ALMACHI, 20016) (Leon Medina & Torres Diaz, 2013).

Tabla 1-2 Características principales de los tipos de materiales para impresión 3D

Característica	Económico	Resistencia a la tracción	Excelente resistencia a la fatiga y químicamente resistente	Certificado FST (llama, humo,...)	Máxima resistencia al calor y productos químicos
Tipo de soporte	Soluble	Rompible Soluble	Soluble	Rompible	Rompible
Tensión de rotura (ASTM, D-638)	36 Mpa	68 Mpa	48,26 Mpa	115,1 Mpa	55 Mpa
Límite de tensión a rotura	4%	4,8%	30%	5,9%	3%
Tensión a la flexión	61 Mpa	104 Mpa	68,95 Mpa	115,1 Mpa	110 Mpa
Impacto IZOD, sin muesca	139 J/m	53 J/m	200 J/m	106 J/m	58,73 J/m
Deflexión Térmica	96 °C	138 °C	75 °C	153 °C	189 °C
Clasificación Retardante de llama	HB 2.5 mm	HB	—	V-O 0,118/in; 3,0 mm	V-O 0,126/in; 3,0 mm
Colores disponibles	Blanco Natural Negro, Gris, Azul, Rojo	Blanco	Negro	Tostado Negro	Tostado

Fuente: T-UTC-000085

1.3.1 Acrylonitrilo butadieno styreno (ABS).

El ABS, es un material termoplástico que permite por medio de las aleaciones químicas del material el cual posee unas importantes propiedades mecánicas.

Además, se puede dar diferentes usos entre ellos se tienen prototipos duraderos y funcionales, protecciones de equipos, accesorios para vehículos, estuches o carcasas electrónicas, accesorios electrónicos, estuches para transporte, juguetes y artículos deportivos (IZA ALMACHI, 20016) (Galantucci et al., 2015).

Algunas de las características de este material son:

- Material termoplástico para usos técnicos.
- La resistencia es alta frente a deformaciones o impacto.
- La resistencia del material ante la deformación bajo condiciones mecánicas es muy buena.
- Se puede manipular fácilmente para post procesos como pegado.
-

Figura 1-9 Objeto moldeado en ABS.



Fuente: <https://www.impresoras3d.com/el-material-de-impresion-abs-y-sus-caracteristicas/>

Ventajas.

- El material ABS soporta altas temperaturas las cuales van desde los 85 °C hasta los 200 °C.

- La precisión de las piezas refleja fielmente el diseño de la pieza real, tanto en tolerancia de forma como en dimensiones. Los campos de tolerancia máxima van desde 0.1 mm en 400 mm de longitud.
- Las piezas son más livianas que a ejemplo de otras tecnologías como la Estereolitografía.
- No sufre deformación, es estable dimensionalmente y con buenas características mecánicas, realizando ensayos funcionales, montajes, etc.
- La velocidad de elaboración relativa al diseño y bajo coste, permite hacer pequeñas series.

Limitaciones.

- Acabado superficial no demasiado bueno, con aspecto granulado.
- Necesita soportes, dependiendo del diseño.
- Presenta escasa consistencia vertical.
- La exactitud se encuentra restringida debido al tamaño del filamento a utilizar.
- La velocidad de generación no es elevada. Ya que en la elaboración de piezas grandes y gruesas el proceso es lento.

Para el proyecto se decidió hacer uso del material ABS ya que este se puede mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar etc. con extrema facilidad, y el acabado sigue siendo bueno. Además, es extremadamente resistente y posee un poco de flexibilidad. Todo esto hace que sea el material perfecto para aplicaciones de modelado de piezas en 3D.

1.4 Sistema de control

Básicamente, existen dos tipos de sistemas de control de motores que se pueden utilizar para el posicionamiento preciso de elementos mecánicos.

1.4.1 Control de lazo abierto:

Los motores paso a paso giran una fracción de revolución al momento de aplicarles un pulso de voltaje, este giro realizado pasa de una posición a otra de manera rápida, lo cual

lo hace perfecto para aplicaciones a pequeña escala como lo son las impresoras (Gujjarro Hernández, 2015).

La limitación fundamental de los motores paso a paso surge cuando se utilizan con un sistema de control de “bucle abierto”, esto es debido a que si la carga en el eje del motor es mayor que el par generado por la entrada de energía eléctrica a los devanados del motor, entonces el motor no se indexará de una posición a otra de una manera predecible, ocasionando que se pierda la característica de posicionamiento absoluto del motor, por lo tanto, los motores paso a paso de bucle abierto solo se utilizan en situaciones en las que la carga siempre está bien definida en la figura 1-10 se observa la configuración de un sistema de control de lazo abierto (López et al., 2014).

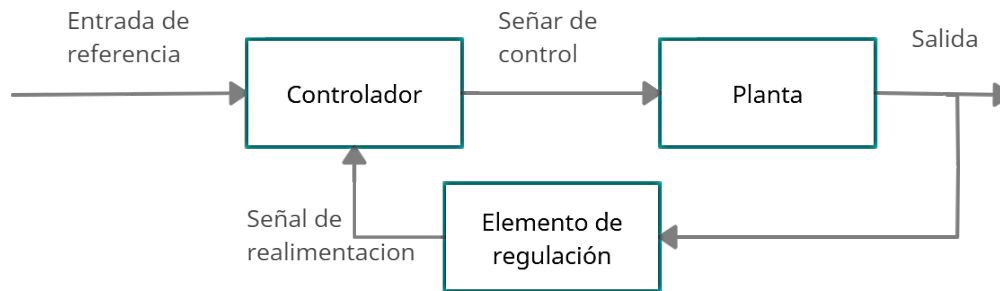
Figura 1-10 Sistema de control de lazo abierto



Fuente: Imagen propia

1.4.2 Control de bucle cerrado

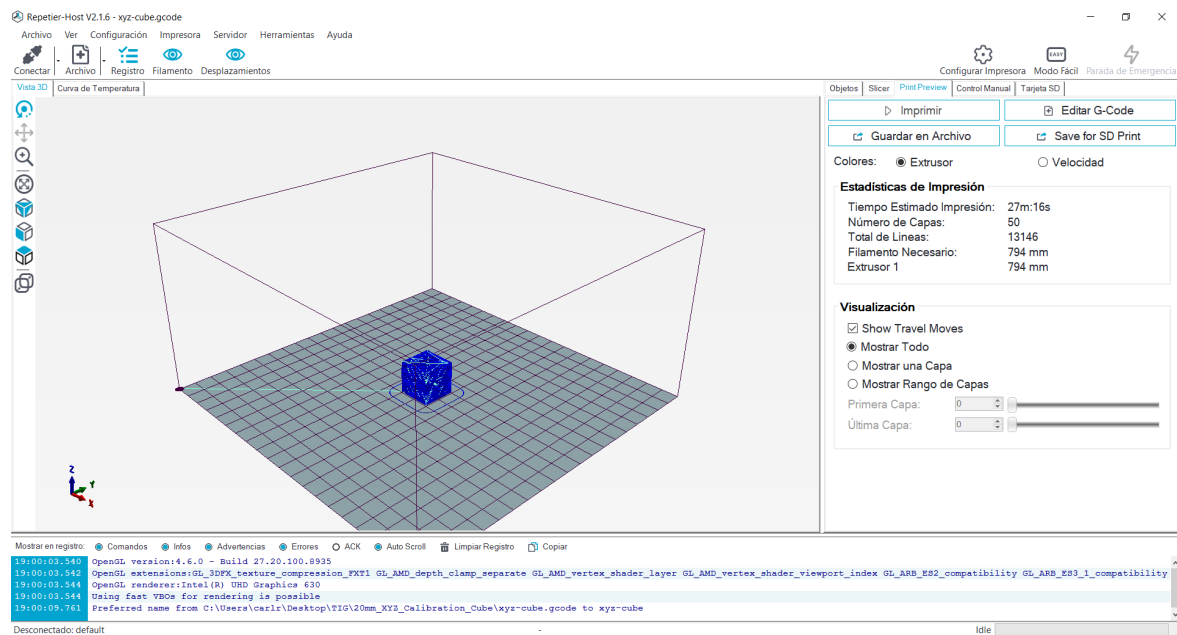
Por otro lado, varios sistemas de servomotor tienen servodrives que no proporcionan control de bucle de posición cerrado. En su lugar, su propósito es proporcionar un control de bucle de velocidad cerrado. En estos sistemas, el servodrive proporciona una salida proporcional a la diferencia entre la velocidad real del motor y una señal de voltaje especificada (el punto de ajuste o la velocidad de referencia). En servoaccionamientos como este, la retroalimentación de velocidad puede obtenerse diferenciando la señal de retroalimentación de posición (que se logra fácilmente tanto en servoaccionamientos analógicos como digitales) o de un elemento adicional conocido como tacogenerador. Un tacogenerador es una máquina de CC que se monta en el mismo eje que el motor principal y proporciona un voltaje de salida proporcional a la velocidad de rotación del eje en la figura 1-10 se observa la configuración de un sistema de control de lazo cerrado (Alwafi Ridho Subarkah, 2018).

Figura 1-11 Sistema de control de lazo cerrado

Fuente: Imagen propia

1.5 Programa para la comunicación

Para lograr una comunicación entre las máquinas CNC existen varios programas que nos pueden servir como interfaz. En el caso de la impresora 3D se puede utilizar programas como el Repetier o el Cura los cuales son programas que aceptan los archivos STL, para después transformarlos en el lenguaje de código G y M el cual es el que permite recibir las órdenes para el correcto funcionamiento en la figura 1-12 se observa la estructura del software Repetier-host.

Figura 1-12 Software Repetier-host

Fuente: Imagen propia

1.5.1 Cura

El software cura nos permite mostrar en pantalla las piezas en 2D y en 3D, y directamente nos muestra de igual manera el resultado del laminado el cual queremos lograr y nos da una idea de lo que va a producir y la manera en que lo hará. Dicho software contiene una interfaz gráfica sencilla que permite mejorar el movimiento de la aguja del extrusor por el interior de las piezas cuando no se encuentra imprimiendo y así podemos evitar algún hilo que no se desea, además, posee la capacidad de generar laminas a gran velocidad en comparación con otros programas (IZA ALMACHI, 20016).

Una de las grandes ventajas que nos brinda Cura es su espacio de trabajo en la que representa el volumen tridimensional de la impresión, el cual cuenta con una variedad de configuraciones en sus límites de espacio de la impresora de tal forma que debemos tener en cuenta al momento de realizar el dimensionamiento de la figura (IZA ALMACHI, 20016).

1.5.2 Repetier-Host

El repetier-host es un programa que nos permite la comunicación del diseño por medio del formato STL y la impresora 3D, en donde en el mismo programa podemos configurar las temperaturas y los movimientos, así mismo nos permite observar el modelado de las piezas en un área de trabajo previo a la impresión (IZA ALMACHI, 20016).

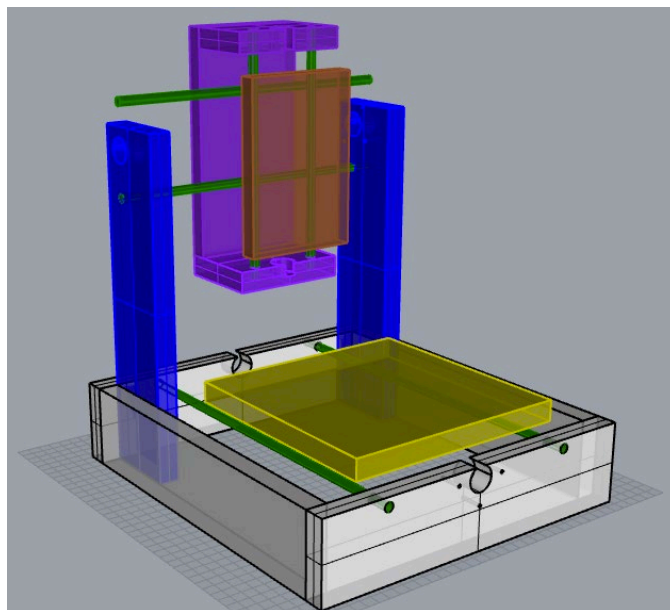
Entre las configuraciones a establecer en el programa podemos encontrar los cambios de posición, y pequeños cambios de las propias piezas, dentro del mismo software podemos encontrar programas como Cura, Slicer y Skeinforce, los cuales son los encargados de seccionar las piezas en la altura de la capa, rellenos, perímetros, etc. Se puede observar la impresión de la pieza a tiempo real e ir configurando la fabricación por medio del código G en sus coordenadas, velocidades y cantidad de plástico a extruir (IZA ALMACHI, 20016).

2. Metodología

2.1 Diseño y construcción de un prototipo de máquina CNC

En esta fase se realizaron los modelos CAD correspondientes a la estructura de la máquina CNC por medio del software SolidWorks, la cual cuenta con unas dimensiones de 70cm de largo, 45cm de ancho y 45cm de alto. La estructura es en acero inoxidable calibre 14 (1.90mm) y dispone de 2 varillas en acero plata con un diámetro de 12mm para soportar los pilares laterales producidos en acrílico con un espesor de 10mm ubicado en el eje Z; En la estructura se encuentra ubicada la base, las torres laterales, los actuadores que se encargan del movimiento en los ejes X, Y y Z, y el correspondiente extrusor o fresadora.

Figura 2-1 Estructura base de la máquina en SolidWorks



Fuente: Imagen propia

2.1.1 Metodología del diseño

Para el ensamble y el diseño de las partes mecánicas del prototipo CNC utilizamos la metodología ascendente, la cual nos indica comenzar con la descripción de cada uno de los elementos con sus características y funciones para poder desarrollar sin dificultad el correcto ensamble de las piezas que conforman la máquina. Teniendo todo un ensamble de partes mecánicas procedemos a realizar un análisis tanto de partes individuales como de todo el conjunto de elementos que conforman la máquina de tal manera que podamos verificar que tenga la capacidad de soportar el peso de los diferentes componentes y los esfuerzos a los que es sometida al momento de mecanizar una pieza.

2.1.2 Adaptación del diseño CAD

El diseño de los dibujos de cada una de las piezas que conforman la máquina compacta fue realizado con base a la estructura física de una CNC estándar, teniendo en cuenta la facilidad con la que cuenta el equipo para realizar trabajos ligeros de manera eficiente debido a su sistema de desplazamiento. Se quiso replicar a menor escala con el objetivo de obtener una máquina compacta capaz de fabricar prototipos de piezas a una velocidad estándar contando con la ventaja de ser compacta y multifuncional.

El software en el que se realizaron los diseños de los dibujos es SolidWorks 2016, diseñando parte por parte para luego unir todo mediante la función de ensamble con la que cuenta dicho software, con la ventaja de poder simular el movimiento y verificar la funcionalidad de las piezas antes de ser fabricada.

Una de las primeras piezas que se dibujaron fue la base en la que se fija el material a mecanizar, luego se dibujaron las piezas laterales, las cuales tienen como función sostener y formar parte del carro. Al finalizar cada una de las partes que conforman el carro, pasamos a diseñar el puente de desplazamiento y las piezas que se encargan del desplazamiento de la máquina, el cual se encarga de los movimientos en los ejes Y, X y Z.

2.1.3 Ordenar Materiales

El material de preferencia para la construcción de la maquina es el Acero inoxidable calibre 14 (1.90mm), el cual tiene un costo promedio en el mercado y mecanizable, resiste a la corrosión y por su dureza hacen parte de las características principales por las cuales se consideró como el más óptimo ya que permitirá soportar los de más materiales de manera firme y permite que los motores actúen de manera natural haciendo una máquina ligera para su transportación y al mismo tiempo contar con una dureza aceptable para cualquier imprevisto.

Siendo la mayor parte de los materiales a ordenar de acero inoxidable, las guías donde corren los ejes de acero y la tornillería de acero inoxidable, haciendo uso también de componentes mecánicos como baleros y chumaceras para el correcto desplazamiento de los ejes y las flechas. Las piezas laterales de soporte fueron fabricadas en acrílico para economizar ya que es un material de bajo costos en el mercado y cumplen su función de soportar el puente de desplazamiento.

2.1.4 Fabricación

Ya teniendo todos los materiales para fabricar, se contempló comenzar con los cortes aproximados para cada una de las piezas a su medida para hacer más fácil el proceso de maquinado. Las partes de menor escala fueron fabricadas utilizando fresadoras y torno convencionales, sin embargo, para las piezas más grandes y complejas como la base y soportes hubo la necesidad de utilizar maquinaria CNC, en nuestro caso, se fabricaron con una cortadora de plasma CNC.

Las chumaceras son las bases que se utilizan para cada uno de los rodamientos o balineras, en este caso se aplicaron estos sistemas mecánicos para el montaje de un husillo el cual se utiliza para los movimientos en los ejes X, Y y Z.

Adaptando estos diseños en el sistema de la máquina CNC, se obtuvo como resultado las bases laterales, las cuales permiten sostener el sistema de movimiento lineal para los ejes Y y Z. Las bases que soportan la estructura completa fueron realizadas mediante manufactura en maquinaria CNC. Estos soportes son capaces de aguantar el peso total de toda la máquina, además se realizó la correspondiente verificación de las dimensiones requeridas, esto para tener la seguridad de que la manufactura estuviese hecha de manera

adecuada con el fin de que al momento de realizar el ensamblaje de los elementos puedan empalmar en donde se quería previamente.

2.1.5 Ensamble

Una vez hecho la verificación de las dimensiones correspondientes se procede a realizar el ensamble de cada uno de los elementos de la máquina, el proceso de ensamble consiste en verificar físicamente que cada uno de los elementos logren encajar adecuadamente.

Al momento del ensamble, se tiene en cuenta el proceso de pruebas mecánicas, verificando que las piezas se desplazaran de manera adecuada y no hubiera algún tipo de obstrucción o defecto en los elementos mecánicos, debido a que todos estos componentes requieren de una alineación precisas de las guías donde corren los ejes, en el momento en el que el proceso de alineación haya algún defecto puede llegar a producir desgastes excesivos en el material y posteriormente llegar a tener problemas en los ejes o en otro mecanismo de movimiento.

2.2 Adaptación de un sistema FDM extraíble a la máquina CNC.

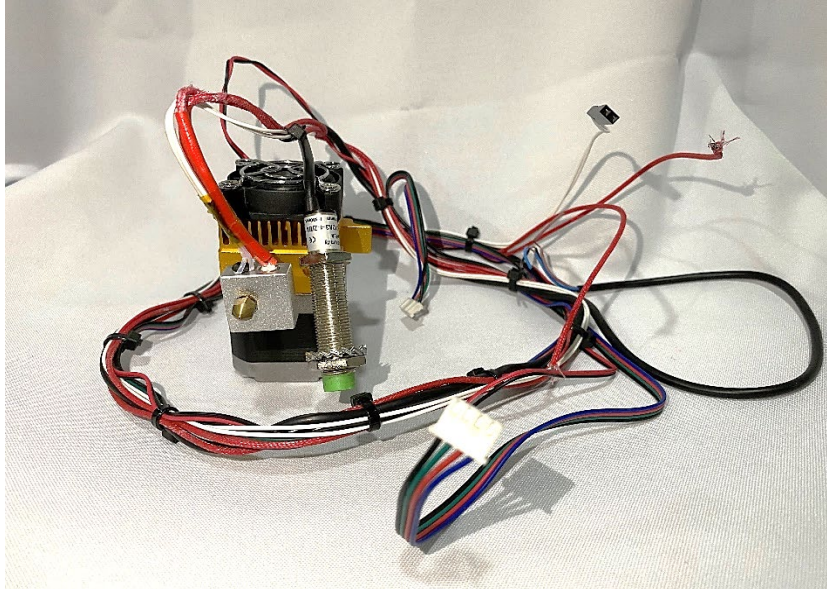
Para la adaptación del extrusor se implementó un carro que permitirá fijar la herramienta que se utilizará para la fabricación de piezas en 3 dimensiones. Este portaherramientas permitirá ajustar firmemente diversas herramientas como una fresadora o un extrusor con sistema FDM. El motor paso a paso será el encargado de girar el tornillo milimétrico para mover al portaherramientas dependiendo del trabajo a ejecutar. Se implementó un sensor inductivo para controlar la temperatura del extrusor.

2.2.1 Extrusor

El extrusor es un instrumento que permite la extracción del hilo filamento ABS para poder fundir y crear las capas que forman la pieza a mecanizar. El extrusor maneja altas temperaturas ya que depende de las características de los materiales que se usen, la temperatura se va adecuando por tal motivo se encuentra integrado un sistema de

refrigeración junto de un motor de paso para el manejo del filamento (Alvarez C. et al., 2016).

Figura 2-2 Extrusor



Fuente: Imagen propia

Según el manual de uso del software CURA, es recomendable considerar las siguientes temperaturas tanto en el extrusor como en la base y así mismo una velocidad ya establecida, como se muestra en la tabla 2-1:

Tabla 2-1 Temperaturas recomendables para el extrusor y la cama

Elementos de máquina 3D	Velocidad	Material	
		PLA	ABS
Extrusor	28 mm/s	190-210°	220-240°
Cama o plancha (Bed)	-	0-30°	80-110°

Fuente: <https://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>

2.2.2 Motor paso a paso para filamento.

Para accionar el extrusor se requiere de este motor el cual se encarga de empujar el filamento de ABS, desde la bobina hacia la boquilla para ser depositado el material de impresión en la plancha o base de la máquina. Este motor es controlado por la placa de control emitiendo señales que son recibidas por el motor para girar en pequeños pasos para obtener la cantidad necesaria del material (Amanullah et al., 2017).

2.2.3 Plancha de calentamiento

La plancha de calentamiento, la cual permite variar la superficie la temperatura para la adherencia del filamento extruido. La temperatura dependiendo del material que se lo vaya utilizar va a ser su variación. Hay que considerar que si se está trabajando con el material ABS la temperatura recomendable de la plancha ha de ser de 80°C - 110°C, pero se recomienda que se lo caliente previamente a 30 °C ya que adquiere mayor templeza (Bordignon et al., 2018).

Figura 2-3 Plancha de calentamiento



Fuente: Imagen propia

2.3 Acople del sistema electrónico para el control de los motores paso a paso

Una vez terminado el ensamble de la estructura física con todos sus elementos de soporte, se pasó a conectar la estructura eléctrica con sus debidos actuadores, acoplando los motores a pasos dentro del gabinete de control junto con su respectiva fuente de poder y tarjeta de comunicación entre el controlador y el computador (Valderrama Gamez, 2020).

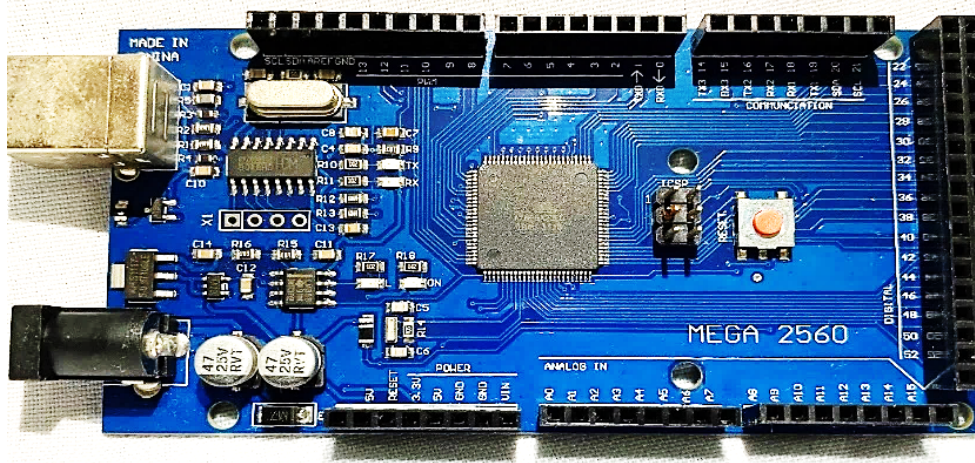
2.3.1 Controlador principal

Para nuestro prototipo de maquina CNC con acoplamiento FDM, se decidió que el sistema electrónico seria controlado por la plataforma Arduino basado en software y hardware libre, gracias a su flexibilidad para la programación e integración de componentes, se optó por elegir la tarjeta controladora Arduino Mega 2560 R3 para su implementación en la máquinas, la cual es programada para la lectura de los códigos G, el manejo de la comunicación entre el computador, la recepción de las señales de los sensores y la emisión de las señales de actuación.

2.3.2 Tarjeta Arduino

La tarjeta Arduino Mega basada en el microcontrolador ATMEGA 2560 trabaja como cerebro del sistema manejándolo a través de las entradas y salidas analógicas y digitales, una velocidad de procesamiento para el trabajo en tiempo real, buena confiabilidad en comunicación vía USB, entre otras características las cuales pueden ser observadas en el anexo, a partir de ello se implementan de acuerdo a las configuraciones dadas en arduino.cc42. El modelo de la tarjeta, que permite manejar las entradas/salidas tanto análogas como digitales, se muestra en la figura (Maydana & Mamani, 2019).

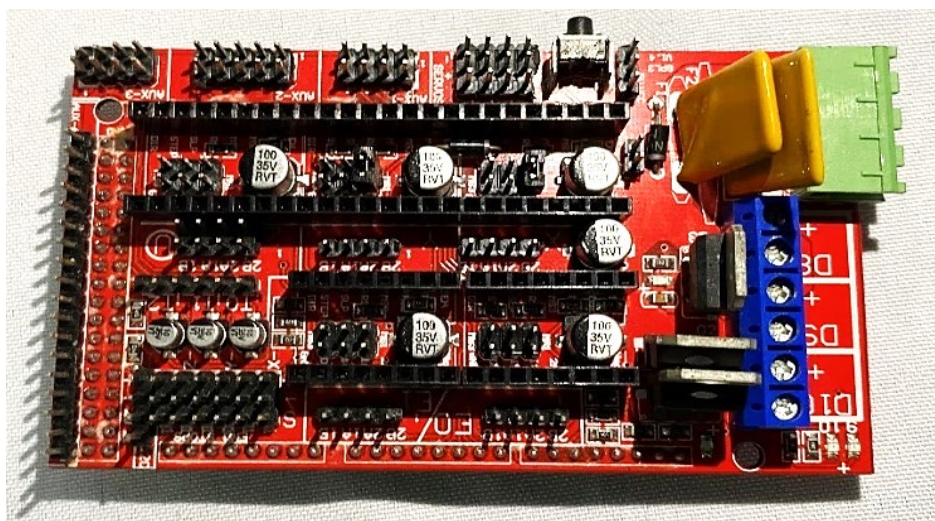
La Comunicación entre la tarjeta Arduino y el computador o entre tarjetas, es implementada por comunicación serie UART TTL a través de los pines (RX) y (TX) del micro-controlador ATMEGA. Y mediante un chip Atmega 16U2 integrado a la placa, se convierte la comunicación Serie en USB. La programación de la tarjeta controladora requiere instalar en el computador el software Arduino y seleccionar el puerto COM virtual de comunicación que permite el enlace con el computador (Maydana & Mamani, 2019).

Figura 2-4 Arduino Mega 2560

Fuente: Imagen propia

2.3.3 Shield Ramps 1.4

La placa RAMPS 1.4 traduce las ordenes digitales de nuestro ordenador en ordenes por pasos, a través de los drivers para los motores paso a paso, contiene diversas entradas para finales de carrera, así como conectores para entrada corriente, decidimos utilizarla junto con la tarjeta Arduino Mega 2560 para poder controlar los ejes de una manera más eficiente (Maydana & Mamani, 2019).

Figura 2-5 Shiel Ramps 1.4

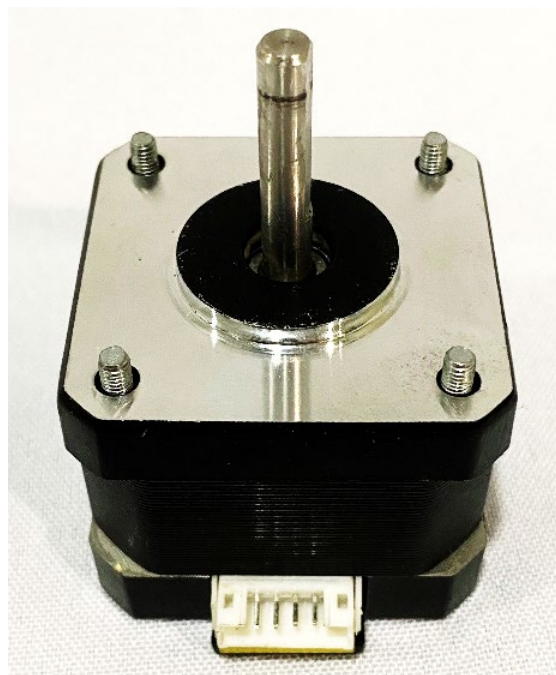
Fuente: Imagen propia

2.3.4 Motor paso a paso

Debido a la exigencia de una máquina de impresión a gran escala con respecto a sus movimientos, se requiere de una estructura rígida y motores eléctricos con la suficiente potencia y precisión. Por lo que se recomienda seleccionar motores paso a paso NEMA 17 los cuales tienen un alto torque lo que conlleva a tener la suficiente fuerza para mover cada riel a través de las guías lineales de acero sin la necesidad de perder pasos (Maydana & Mamani, 2019).

Cabe resaltar que estos motores paso a paso convierten una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados dependiendo de sus entradas de control. Además de que se caracterizan por el hecho de poder realizar movimientos muy precisos permitiendo moverlos un paso a la vez por cada pulso que se les aplique. Para más información con respecto a las características del motor podemos apreciar el anexo (Maydana & Mamani, 2019).

Figura 2-6 Motor paso a paso Nema 17

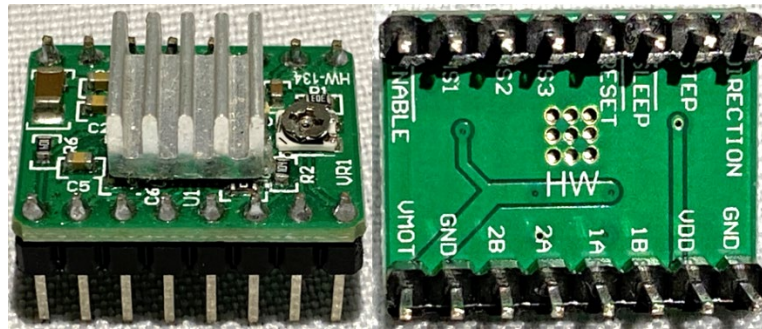


Fuente: Imagen propia

2.3.5 Drivers para motores

Para poder tener un buen control de los motores NEMA 17 es necesario escoger los drivers que mejor se acoplen a su funcionamiento en cuando a su corriente, resolución de micro pasos y sobre todo que sean de buena calidad para un buen uso a largo plazo. Se tomó la decisión de hacer uso de los drivers A4988 que se observan en la figura 2-7 ya que son una referencia comercial de bajo costo los cuales son muy usados en el área de la impresión 3D y maquinas CNC domesticas (Maydana & Mamani, 2019).

Figura 2-7 Driver A4988



Fuente: Imagen propia

2.3.6 Calibración driver A4988

Para configurar y calibrar los drivers A4988 se tiene que tener en cuenta su estructura interna, el cual incorpora unos pines (ms1, ms2 y ms3) que el driver utiliza para configurar la resolución de los pasos en que se mueve el motor. Al trabajar con micro pasos tuvimos que conectar estos pines como nos explica el fabricante en la tabla 2-2, puenteadolos entre sí.

Tabla 2-2 Conexión de pines

MS1	MS2	MS3	MICROPASOS	Modo de excitación del motor.
L	L	L	Paso completo	Fase 2
H	L	L	Paso medio	Fase 1-2
L	H	L	Un cuarto de paso	Fase W1-2
H	H	L	Un octavo de paso	Fase 2W1-2
H	H	H	Un dieciseisavo de paso	Fase 4W1-2

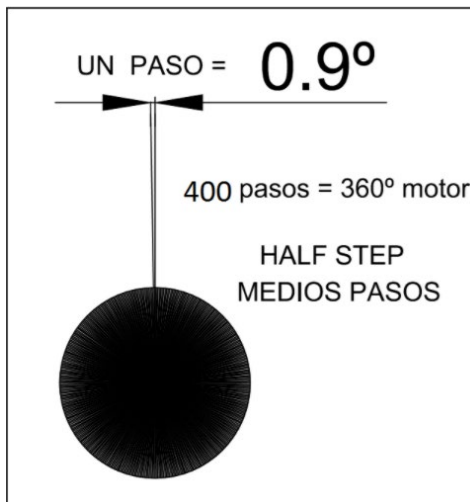
Fuente: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/descripcion-del-driver-a4988>

VENTAJAS DE LOS MICROPASOS: El motor gira más continuo y suave cuantos más pequeños son los pasos, además se minimiza mucho el ruido.

DESVENTAJAS DE LOS MICROPASOS: Pierden una gran cantidad de par motor

Los motores Nema normalmente vienen físicamente dotados de un paso de 1.8°, esto quiere decir que para dar una vuelta completa (360°) necesitamos entregar 200 pulsos desde nuestro control. Al utilizar medios pasos, el ángulo de cada paso se reduce a la mitad, 0.9° es decir, para dar una vuelta completa (360°) necesitamos entregar 400 pulsos desde nuestro control.

Figura 2-8 Medios pasos de un motor



Fuente: http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm

2.3.7 Ajuste el voltaje de referencia del driver

Para que los motores no pierdan pasos ni se puedan quemar por un exceso de corriente, es óptimo ajustar el voltaje de referencia del driver, y para hallar este valor se necesita conocer 2 datos que son la corriente máxima del motor que vamos a utilizar (ejemplo: 1 amperio) y el valor de las resistencias de sensibilidad del driver (ejemplo 0.1 ohmio) y aplicamos la siguiente ecuación que ayuda a calcular el valor:

$$\text{Corriente máxima} = \text{voltaje de referencia} / (8 * \text{resistencia de sensibilidad}). \quad (2.1)$$

Por lo tanto:

$$V_{ref} = I_{max} * (8 * r_s) \quad (2.2)$$

$$V_{ref} = 1 * (8 * 0.1) \quad (2.3)$$

$$V_{ref}=0.8 \quad (2.4)$$

Al trabajar en medios pasos tenemos que limitar esta tensión al 70%, que es lo máximo que va a entregar el driver.

$$0.8 - 70\% = 0.56 \quad (2.5)$$

Con la ayuda de un polímetro en corriente continua, se tiene que medir la tensión que hay entre GND y el potenciómetro de ajuste, y girar este hasta conseguir el voltaje que ha dado el resultado de la operación

2.3.8 Alimentación

Se utilizó una fuente De Alimentación 12 V 10 A Dual para la alimentación de energía eléctrica de todo el sistema para el correcto funcionamiento de los dispositivos y componentes electrónicos.

Figura 2-9 Fuente de alimentación



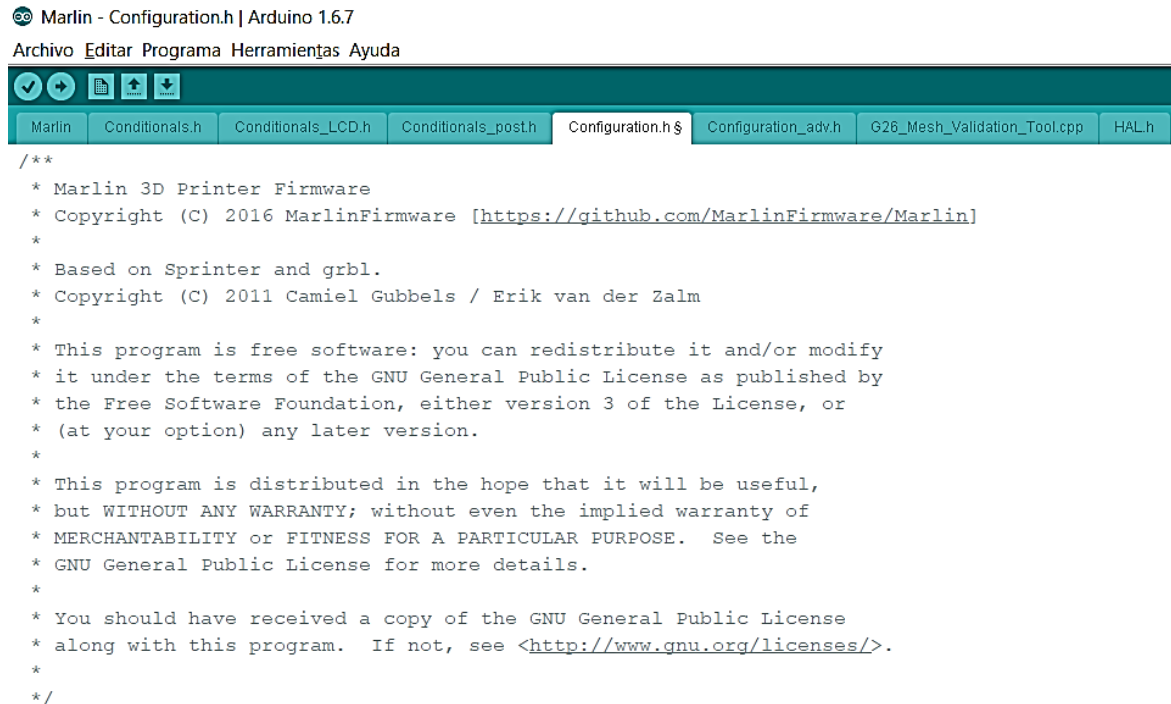
Fuente: Imagen propia

2.3.9 Software de control Marlin 1.x

Marlin es un código abierto para la impresión en 3D para prototipados rápidos, funciona al igual que Sprinter y GRBL, y hoy en día es uno de los firmwares más usados para la tecnología 3D, el cual se ejecuta en la placa principal de la impresora 3D, trabajando en

tiempo real todas sus actividades, de tal manera que coordina los calentadores, los motores paso a paso, los sensores, las luces, la pantalla LCD, los botones y todo lo relacionado con el proceso de impresión. (Leon Medina & Torres Diaz, 2013).

Figura 2-10 Firmware Marlin 1.x



```
/**
 * Marlin 3D Printer Firmware
 * Copyright (C) 2016 MarlinFirmware [https://github.com/MarlinFirmware/Marlin]
 *
 * Based on Sprinter and grbl.
 * Copyright (C) 2011 Camiel Gubbels / Erik van der Zalm
 *
 * This program is free software: you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
 * (at your option) any later version.
 *
 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
 */
```

Fuente: Imagen propia

2.3.10 Configuración del firmware Marlin 1.x

Para poder quemar el firmware en la placa Arduino Mega 2560, usamos el software Arduino IDE, instalamos el software, abrimos el archivo Marlin.ino, y luego seleccionamos la pestaña configuration.h, en esta parte encontramos todas las configuraciones a realizar para aplicar cambios y poner en marcha nuestra máquina.

Dentro de las primeras variables a configurar se encuentra el parámetro “BAUDRATE que es la velocidad a la cual se va comunicar la tarjeta con el software host, en nuestro caso estamos usando 250000 ya que es la que mejor funciona en la mayoría de los casos, sin embargo, hay otras velocidades más bajas si hay pérdida de información o se puede aumentar para acelerar la transferencia de archivos SD.

Figura 2-11 Proceso de selección de velocidad en la comunicación del firmware Marlin

```
Marlin - Configuration.h | Arduino 1.6.7
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Marlin Conditionals.h Conditionals_LCD.h Conditionals_post.h Configuration.h § Configuration_adv.h G26_Mesh_Validation_Tool.cpp
*
* :[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]
* /
#define SERIAL_PORT 0

/**
 * This setting determines the communication speed of the printer.
 *
 * 250000 works in most cases, but you might try a lower speed if
 * you commonly experience drop-outs during host printing.
 * You may try up to 1000000 to speed up SD file transfer.
 *
 * :[2400, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 250000, 500000, 1000000]
 * /
#define BAUDRATE 250000

// Enable the Bluetooth serial interface on AT90USB devices
// #define BLUETOOTH

// The following define selects which electronics board you have.
// Please choose the name from boards.h that matches your setup
#ifndef MOTHERBOARD
  #define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB
#endif
```

Fuente: Imagen propia

Luego se procede a elegir la placa con la que se desea controlar la impresora 3D. En este caso, como la placa que usamos es una Arduino MEGA, se selecciona ramps 1.4 y un extrusor simple. Además, permite seleccionar diferentes sensores de temperatura, en este caso se elige para el sensor 0 la opción -1 (#define TEMP_SENSOR_0 -1), ya que solo se usa un sensor ubicado en el extrusor a base de una termocupla tipo K y el amplificador de instrumentación AD595.

Figura 2-12 Parámetros del firmware para controlar temperatura del extrusor.

```

Marlin - Configuration.h | Arduino 1.6.7
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Marlin Conditionals.h Conditionals_LCD.h Conditionals_post.h Configuration.h$ Configuration_adv.h G28_Mesh_Validation_Tool.cpp HAL.h I2CPositionEncoder.cpp I2CPositionEncoder.h

#define TEMP_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds)
#define TEMP_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- temperatures considered "close" to the target one
#define TEMP_WINDOW 1 // (degC) Window around target to start the residency timer x degC early.

// Bed temperature must be close to target for this long before M190 returns success
#define TEMP_BED_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds)
#define TEMP_BED_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- temperatures considered "close" to the target one
#define TEMP_BED_WINDOW 1 // (degC) Window around target to start the residency timer x degC early.

// The minimal temperature defines the temperature below which the heater will not be enabled It is used
// to check that the wiring to the thermistor is not broken.
// Otherwise this would lead to the heater being powered on all the time.
#define HEATER_0_MINTEMP 5
#define HEATER_1_MINTEMP 5
#define HEATER_2_MINTEMP 5
#define HEATER_3_MINTEMP 5
#define HEATER_4_MINTEMP 5
#define BED_MINTEMP 5

// When temperature exceeds max temp, your heater will be switched off.
// This feature exists to protect your hotend from overheating accidentally, but *NOT* from thermistor short/failure!
// You should use MINTEMP for thermistor short/failure protection.
#define HEATER_0_MAXTEMP 275
#define HEATER_1_MAXTEMP 275
#define HEATER_2_MAXTEMP 275
#define HEATER_3_MAXTEMP 275
#define HEATER_4_MAXTEMP 275
#define BED_MAXTEMP 150

```

Fuente: Imagen propia

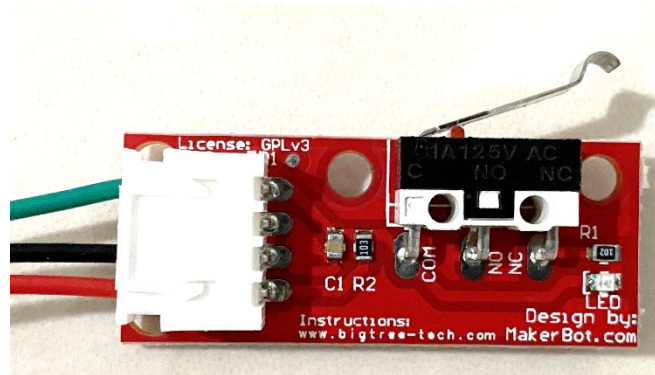
Con esto, se puede configurar una serie de parámetros relacionados con el control de temperatura, por ejemplo, poder establecer la temperatura por debajo de la que el calefactor no se habilitará y permite verificar que el cableado de la termocupla no está roto o también poder establecer la temperatura máxima de trabajo, la cual al ser detectada apaga el sistema calefactor.

Además, Marlin posee un control PID de temperatura excelente, el cual permite controlar la temperatura de la mejor manera de acuerdo a la lectura analógica recibida desde el transductor AD595 implementado en el extrusor y con unos parámetros configurables como lo son la temperatura máxima y un rango funcional en donde el sistema llega a apagarse si la temperatura ronda por un valor cercano al set-point establecido en el código, las ganancias del control PID k_p , k_i , k_d , se sintonizan de forma experimental con un procedimiento puesto a prueba y ajustando las configuraciones del extrusor en cuestión de su posicionamiento. Teniendo en cuenta estas pruebas, se utilizan los siguiente:

$$K_p = 22.2 \quad (2.6)$$

$$K_i = 1.08 \quad (2.7)$$

Figura 2-14 Final de carrera



Fuente: Imagen propia

Para la nivelación de la plancha, se ajusta de manera manual por medio del giro de los tornillos de la misma plancha.

Para una correcta calibración, en el código Marlin existe una variable que permite calibrar la máquina correctamente en sus desplazamientos, teniendo en cuenta el conocimiento de la relación de pasos previamente calculados y la distancia a recorrer es `#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT`, el cual es un arreglo separado por comas de los valores correspondientes a los pasos del motor/mm de los ejes X, Y, Z y el extrusor.

Se aprecia los valores finales establecidos para la máquina, estos fueron determinados en principio de forma teórica y después mejorados con pruebas prácticas, como se describe en el siguiente ejemplo:

Cálculo de parámetros en el eje X

De acuerdo a la ecuación, y con 400 pasos por vuelta de cada motor debido a que fueron configurados como medios pasos a través del CI L297, así para una vuelta:

$$\Delta Px = 0.2n = 0.2 * 400 = 80mm \quad (2.9)$$

Los pasos por mm son:

$$Pasos / mm = 400pasos / 80mm = 5pasos / mm \quad (2.10)$$

Figura 2-15 Configuración de los pasos por mm en cada eje, máxima velocidad y máxima aceleración en el movimiento.

```

Marlin - Configuration.h | Arduino 1.6.7
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

/**
 * With this option each E stepper can have its own factors for the
 * following movement settings. If fewer factors are given than the
 * total number of extruders, the last value applies to the rest.
 */
//#define DISTINCT_E_FACTORS

/**
 * Default Axis Steps Per Unit (steps/mm)
 * Override with M92
 *
 *                               X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4]]]]
 */
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80, 80, 400, 100 }

/**
 * Default Max Feed Rate (mm/s)
 * Override with M203
 *
 *                               X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4]]]]
 */
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 300, 300, 5, 25 }

/**
 * Default Max Acceleration (change/s) change = mm/s
 * (Maximum start speed for accelerated moves)
 * Override with M201
 *
 *                               X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4]]]]
 */
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 400, 400, 100, 400 }

```

Fuente: Imagen propia

2.4.2 Ajustes del eje Z

El eje Z en la impresora es el encargado de los movimientos de las herramientas o bien sea del propio extrusor, y su ajuste sirve para que al desplazarse no se produzcan variaciones de altura entre la punta de la herramienta y la cama. Para su calibración, primero se comprueba que la altura en ambos lados sea la misma, midiendo con un calibre desde un punto de la guía del eje z a un punto fijo de la estructura base.

2.4.3 Ajustes del eje X

Inicialmente para el movimiento en el eje x se realiza teniendo en cuenta el volumen de impresión y el tamaño máximo del eje para la pieza estándar, el desplazamiento en el eje x es de 1.8 grados de paso, a estos motores se sujeta un piñón de 8 dientes de paso, la altura de los dientes es de 1.27mm, y el diámetro de la circunferencia exterior es de 12.91mm, para determinar el desplazamiento por paso con estas características.

Para la calibración del eje x, se uso del software Repetier-host, instruyendo a la impresora mover el eje X 50mm y pusimos otra marca en el punto donde debía terminar el eje X. Haciendo pruebas hasta que la impresora se moviera exactamente los 50mm, midiendo con un metro para asegurar la correcta medición.

2.4.4 Ajuste del eje Y

El eje Z se calcula con una regla, localizando el eje X, Y y Z y colocando una regla paralela a la cama de impresión. De igual manera que en el eje X, se introduce un valor para que se mueva, y se pone una marca donde debía termina el eje Y, usando la regla paralela, se pudo determinar la distancia real recorrida. Usando la misma ecuación se calculó el nuevo valor de M92 para luego ser introducido en el código G.

2.5 Diseño de un entorno gráfico para la manipulación de la máquina

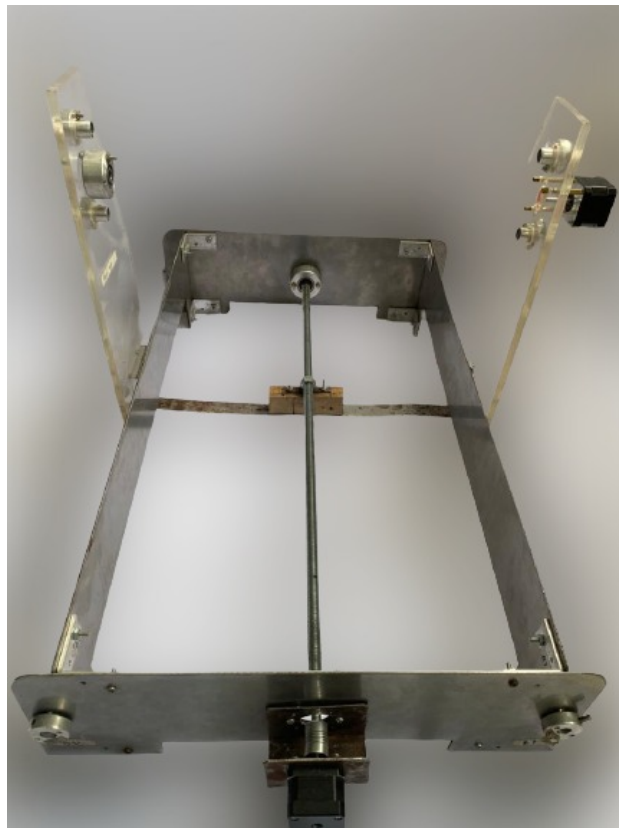
Se implementó un código en Python que permite tener un entorno grafico básico en donde se puede hacer la selección de que maquina se desea manejar, si se quiere que funcione como CNC, o como impresora 3D. El cual se deja en la sección de anexos.

3. Resultados

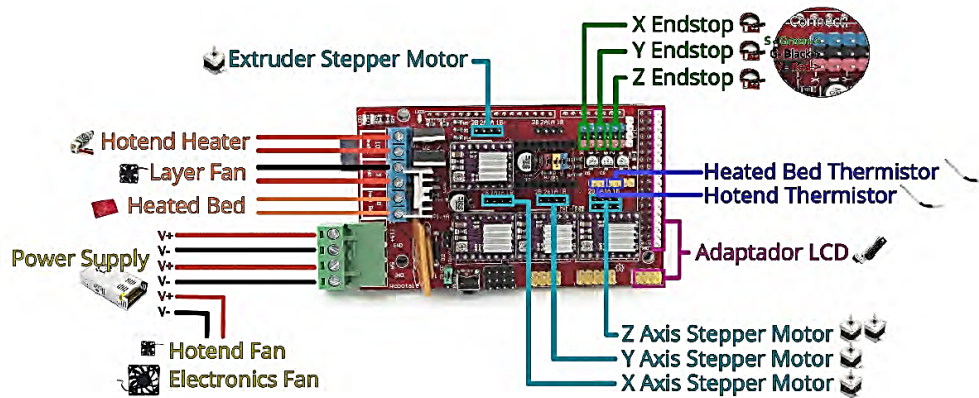
3.1 Estructura base con acople FDM

Haciendo el debido seguimiento en la metodología, se realiza la estructura base de la maquina con sus debidas configuraciones y ajustes para una base estable que pueda soportar el carro que llevara las maquinas herramientas y el correspondiente acople FDM.

Figura 3-1 Estructura base



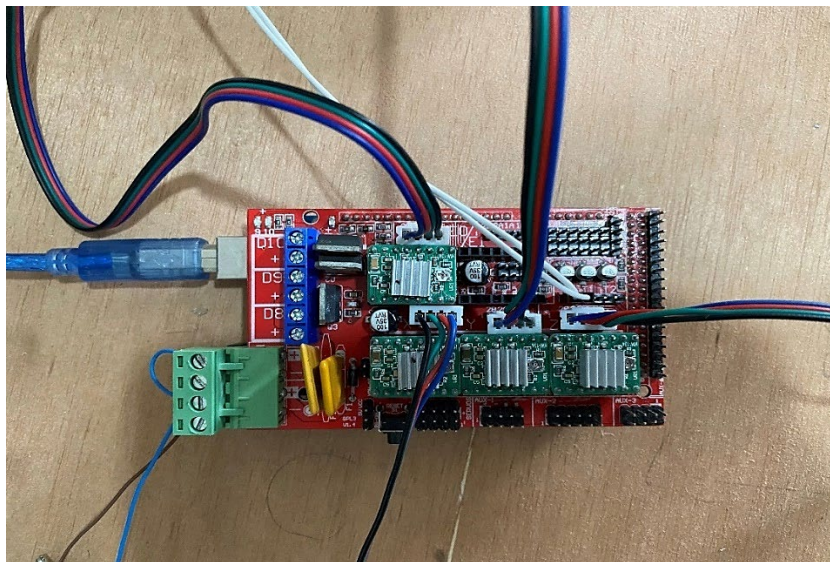
Fuente: Imagen propia

Figura 3-3 Estructura Shield Ramps 1.4

Fuente: <https://www.hta3d.com/es/blog/Como-Conectar-RAMPS1.4>

3.3 Diseño eléctrico

Para el diseño eléctrico se tiene en cuenta cada una de las conexiones apropiada para el cableado de la maquina en donde se utiliza un panel de control que hace una distribución de las señales de control, asegurándose que quede todo bien conectado y no haya fallas ni sobre calentamientos no deseados.

Figura 3-4 Estructura del diseño eléctrico conectado.

Fuente: Imagen propia

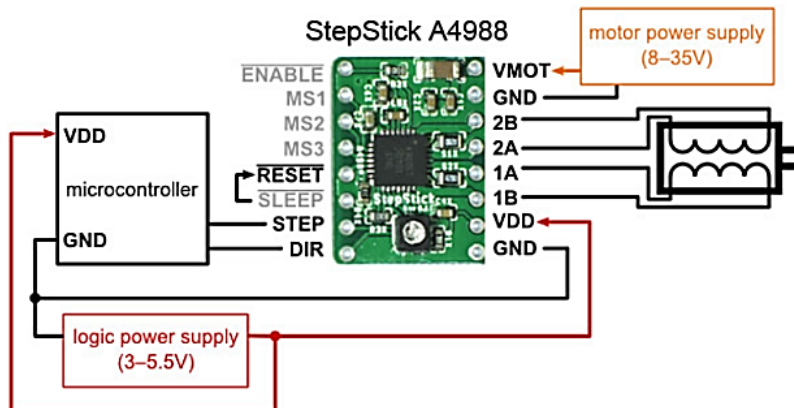
3.3.1 Conexión entre Arduino Mega 2560 y controladores de motores paso a paso

En esta sección, se utiliza el controlador A4988, en el cual, la entrada ENABLE activa o desactiva el mismo, cuando se envía un cero lógico se activan las salidas mientras que con la señal en uno lógico se desactiva.

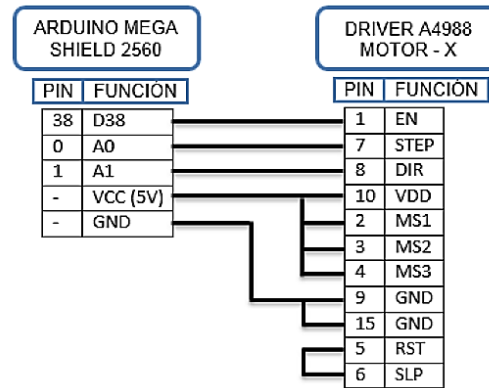
Para enviar la señal de movimiento al motor, se necesita enviar pulsos a la entrada STEP de la tarjeta y para controlar la dirección se realiza a través de la entrada DIR. En la figura 3-5 podemos apreciar estructura general del driver A4988.

Como se analizó en la metodología, la configuración de micro pasos se realiza en las entradas MS1, MS2, MS3, teniendo una resolución de 1/16 de paso, pues estas 3 entradas se mantienen en alto, en las siguientes figuras, podemos apreciar el diagrama de conexiones realizadas de cada uno de los drivers en X, Y, Z y el extrusor que se

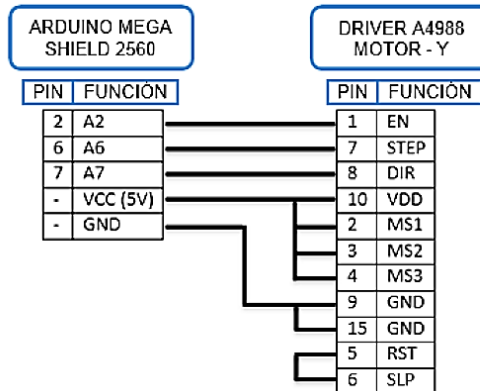
Figura 3-5 Estructura general del driver A4988



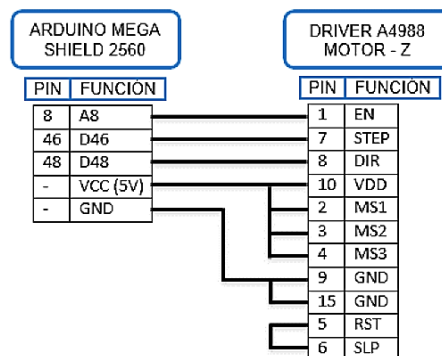
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=699yHfXEo2o>

Figura 3-6 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Eje x)

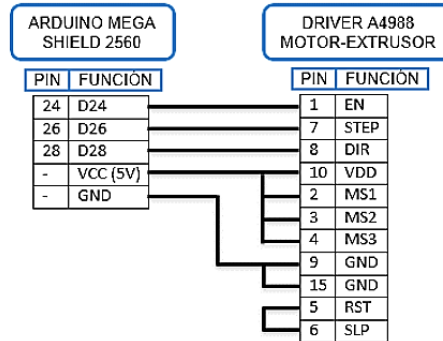
Fuente: Imagen propia

Figura 3-7 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Eje y)

Fuente: Imagen propia

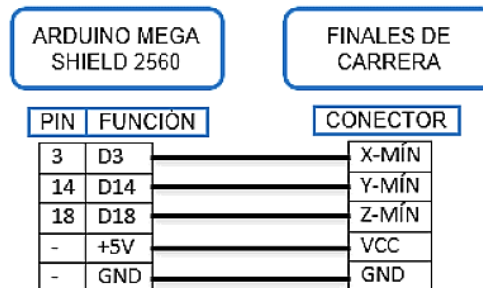
Figura 3-8 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Eje z)

Fuente: Imagen propia

Figura 3-9 Conexión Arduino Mega y driver A4988 (Extrusor)

Fuente: Imagen propia

De igual manera, los finales de carrera envían una señal en alto a las entradas digitales de la placa controladora cuando cada uno de los ejes llegue a su posición Home. Por lo que en la figura 3-10, podemos apreciar las conexiones entre la placa Arduino Mega y los finales de carrera.

Figura 3-10 Conexión Arduino Mega y Finales de carrera X, Y, Z

Fuente: Imagen propia

3.4 Sistema de control

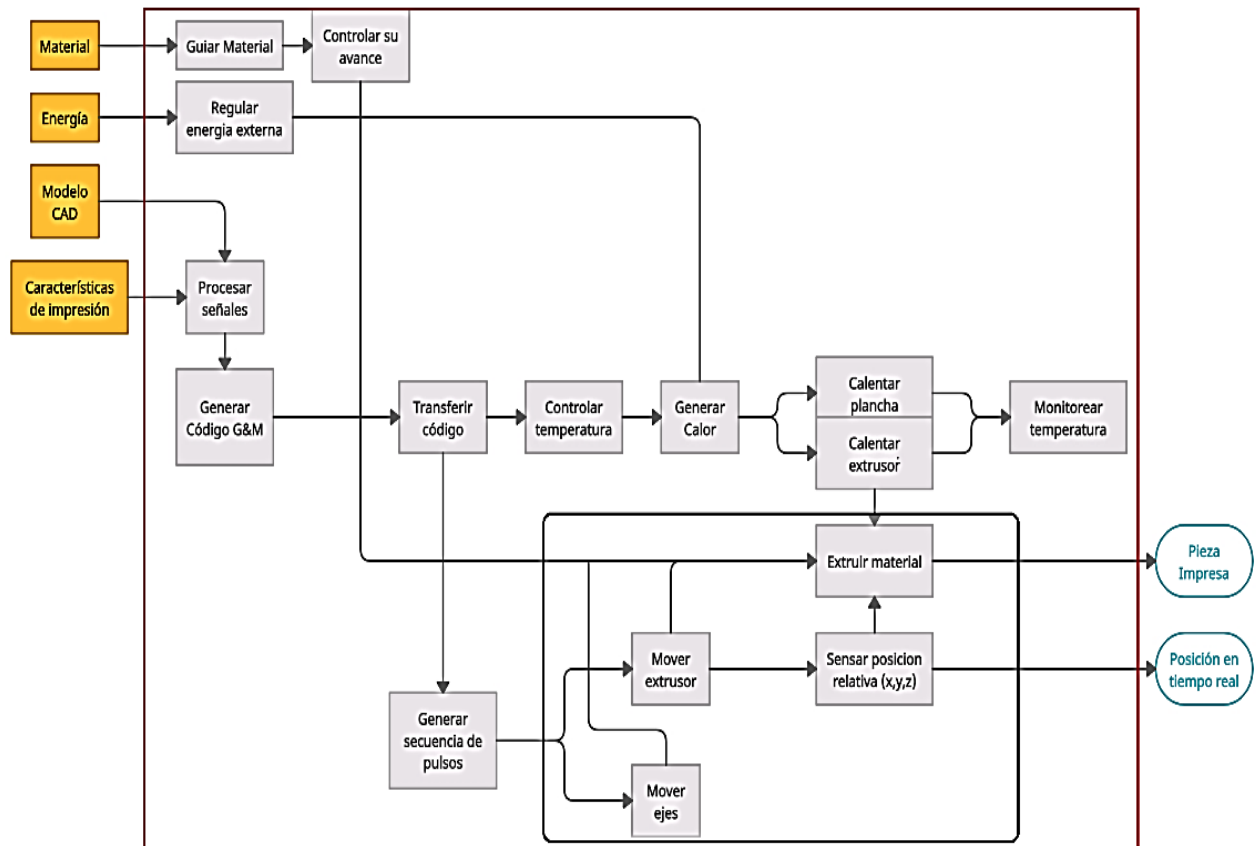
Para tener un buen control de los motores, se utilizó un sistema de control en lazo cerrado, este sistema de control de posición recibe como entrada la energía que proviene del computador y de la fuente externa, la secuencia de pulsos generada por el controlador de la impresora a partir del código-G&M el cual contiene la información de la pieza a imprimir, por lo tanto, el proceso de impresión genera el movimiento de los motores, haciendo que las entradas sean procesadas por los distintos elementos del sistema y así poder generar una posición actual del extrusor y la plancha de calentamiento.

Teniendo en cuenta este sistema, se aprecia la descomposición funcional de todo el proceso de impresión, incluyendo el sistema de control de posición para poder obtener las otras funciones de la maquina siguiendo el proceso adecuado.

En la figura 3-11 se puede apreciar un diagrama del proceso de control en el que se analiza todas sus funciones de manera apropiada apreciando sus respectivas entradas y la relación entre ellas generando las salidas.

A partir del proceso de impresión es posible enfocarse en cada una de las funciones del sistema, lo cual facilita la generacion de conceptos que den solucion a dichos problemas que puedan llegarse a presentar con respecto al posicionamiento y a errores de calentamiento en el sistema.

Figura 3-11 Proceso de impresión con su sistema de control



Fuente: Imagen propia

3.4.1 Control a lazo cerrado

Para controlar el desplazamiento y la velocidad de los motores, se envían pulsos a diferentes frecuencias a la tarjeta con pasos medios, dichos pulsos se envían mediante señales PWM a frecuencias que varían dependiendo de la velocidad que se requiera. Para poder obtener las frecuencias deseadas para la operación de los motores, se realiza la siguiente ecuación

$$\text{Frecuencia del motor} = \text{Velocidad Angular} \times \text{Pasos por Revolución} \quad (3.1)$$

Donde:

$$\text{La velocidad angular (rps)} = \text{Velocidad deseada para el motor} \quad (3.2)$$

$$\text{Pasos por revolución} = \text{Numero de pasos que necesita el motor para dar una vuelta} \quad (3.3)$$

En nuestro caso, los pasos por revolución se adquieren mediante las características de los motores NEMA 17, el cual tiene una resolución de 1.8 grados, por lo tanto:

$$\text{Pasos de revolución} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \quad (3.4)$$

Por lo que el motor trabaja a 200° a paso completo. Pero al trabajar a micro pasos, se adquiere de la siguiente ecuación:

$$\text{Pasos de revolución} \left(\frac{1}{16} \text{ de pasos} \right) = \frac{360^\circ}{1.8^\circ \div 16} = 3200 \quad (3.5)$$

Al implementar un sistema de control en lazo cerrado y realizar la misma prueba de movimiento en el que se lleva el extrusor y la plataforma de impresión de las coordenadas: $X = 0.00\text{mm}, Y = 0.00\text{mm}, Z = 340\text{mm}$ a las coordenadas $X = 10.00\text{mm}, Y = 0.00\text{mm}, Z = 340\text{mm}$, se obtienen los datos de la figura 3-11 obtenidos por un monitor serial en Arduino, en los cuales se observa una reducción en el error el cual se encuentra dentro de un rango de pulsos de error netamente tolerables ($-10 < \text{error} < 10$)

Para este nuevo desplazamiento se aprecia un error final de 0.05mm en el movimiento de X, -0.05 en Y y 0.01984 para la posición final de Z

Por otro lado, la señal de control para activar la resistencia del extrusor proviene del pin digital D10 de la placa, la resistencia de dicho extrusor es de 4.8Ω , la cual se alimenta con 12 V, se utiliza la misma ecuación previa para obtener su corriente:

$$I = \frac{12V}{4.8\Omega} = 2.5A \quad (3.8)$$

Dicha corriente está dentro del rango que soporta la tarjeta de control Shield Ramp 1.4 y se puede trabajar de la manera más óptima sin inconvenientes de sobre calentamiento.

3.4.3 Sistema de control de posicionamiento

Para la adquisición de la posición deseada, la placa de control Shield RAMPS 1.4 permite ubicar cinco controladores, tres para los motores que se encargan de los movimientos de los ejes y 2 más para los motores que se encarguen de la plataforma del extrusor.

Por lo general, los motores NEMA 17 como ya se había especificado previamente son motores de 200 pasos, es decir que el controlador envía 200 pasos para hacer el giro a 360° , como resultado da un movimiento de 1.8° , pero en el proyecto se trabajaron a micros pasos con una resolución de 1/16, los motores deben enviar 3200 pulsos para poder hacer un giro de 0.1125°

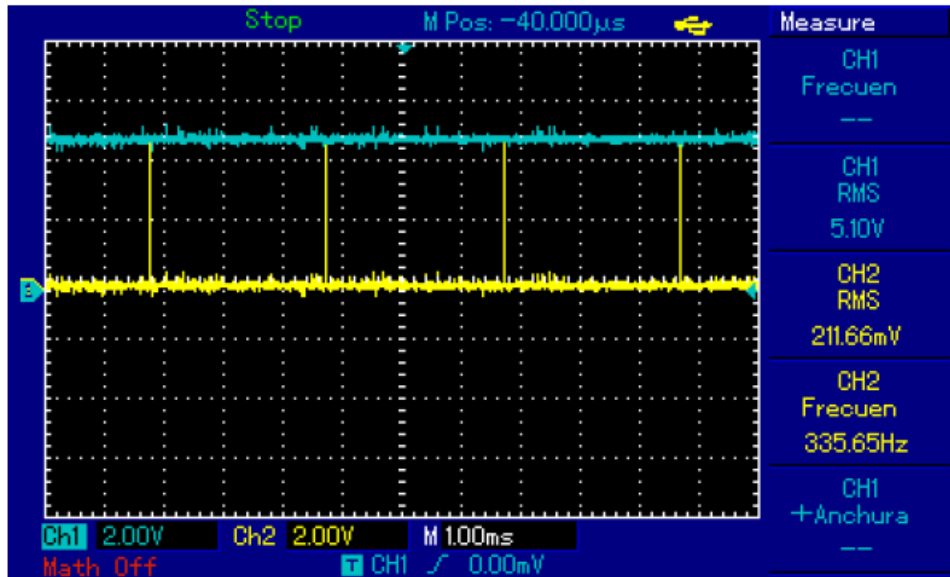
Por lo tanto, el sistema de control está configurado con una resolución de 80 pasos/mm para los ejes X, Y, y para el eje z a 252 pasos/mm para que el movimiento sea de 1 milímetro, cada driver envía 80 y/o 252 micro pulsos en la dirección que se desee.

Sin embargo, cuando se estableció este parámetro y se midió en la realidad con un calibrador digital, se encontró una desviación de 990 micras lo que permitió corregir el valor a 5.05 pasos/mm como ideal. En la línea `#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE` se consignan los valores de las velocidades máximas de desplazamiento en los ejes en mm/s

Se realizan pruebas en el osciloscopio para poder apreciar el comportamiento de las señales STEP y DIR de la placa de control y haciendo uso de los sensores de posicionamiento y finales de carrera, en las cuales se enviaron movimientos de 50mm en el eje X a diferentes velocidades. Se utilizó el control manual del software Repetier Host para variar las velocidades predeterminadas.

Se realizaron tres pruebas de movimiento en el que la velocidad fue variada al mínimo (25%), a un valor medio (150%) y al máximo (300%) que permite el control manual, para poder obtener la frecuencia con la que se envían los pulsos del controlador

Figura 3-13 Señales STEP y DIR para el movimiento del motor X



Fuente: Imagen propia

Con estas pruebas se puede apreciar que las señales adquiridas se desplazan con movimientos positivos correspondientes a la velocidad de un nivel Alto de la señal DIR, mientras que un movimiento negativo marca un nivel Bajo.

Para cada movimiento se calcula su velocidad en mm/s y esta se multiplica por la resolución de la impresora de 80 pasos/mm y así poder calcular las frecuencias a la que la placa de control envía los pulsos para diferentes velocidades

Tabla 3-1 Frecuencias del controlador para diferentes velocidades.

Velocidad (mm/min)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia Calculada (Hz)	Frecuencia MEDIDA (Hz)
250	4.17	334.2	334.82
1500	25	2000	2020
3000	50	4000	4020

Fuente: Imagen propia

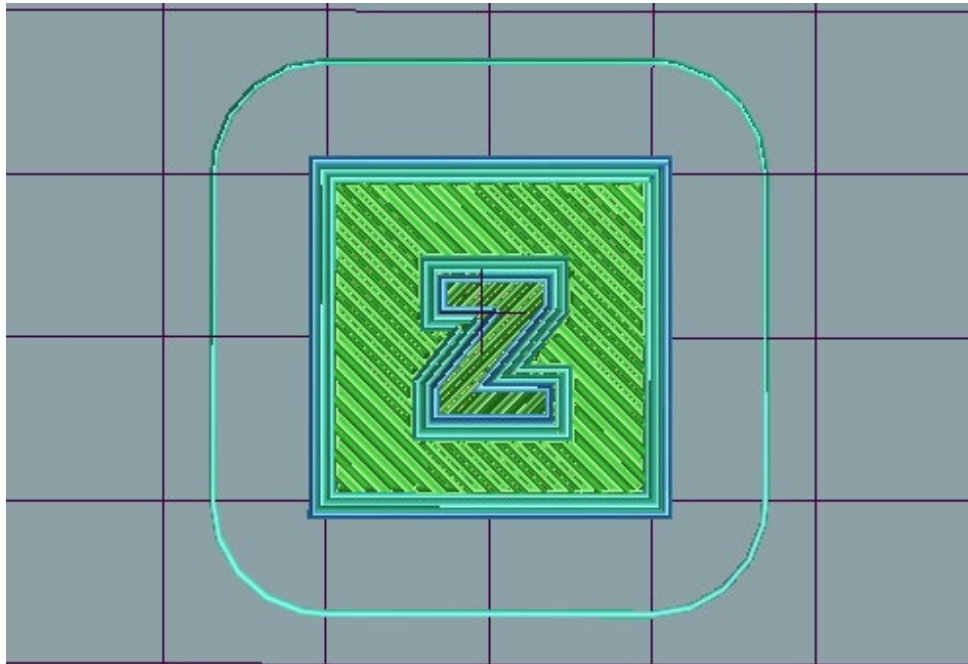
Al adquirir las frecuencias ideales, se procede a obtener la posición actual, para esto se diseña un circuito que permite aislar los controladores de la maquina con el propósito de cambiar las dos posiciones, el cual recibe todas las señales provenientes de la placa de control, excepto las señales de mando STEP, DIR, y otros pines que se conectan a las bobinas de los actuadores y a sus correspondientes drivers.

Los pulsos generados por la RAMPS se analizan con interrupciones usando el software Arduino, uno para cada controlador. Haciendo que se activen por el flanco de bajada del pin STEP, en cada ciclo se contabiliza la cantidad de pasos enviados y la dirección adquirida.

3.5 Pruebas y ajustes

Para poder realizar el análisis del correcto funcionamiento de la máquina, se procede a simular la impresión una figura de calibración para los ejes X, Y con unas dimensiones de 20mm.

Figura 3-14 Figura para calibración



Fuente: Imagen propia

Se realiza la simulación de impresión de 4 modelos de prueba para poder determinar las variaciones en cada uno de los ejes (X-Y).

La toma de muestras de los 4 modelos simulados se detalla en la tabla 3-2:

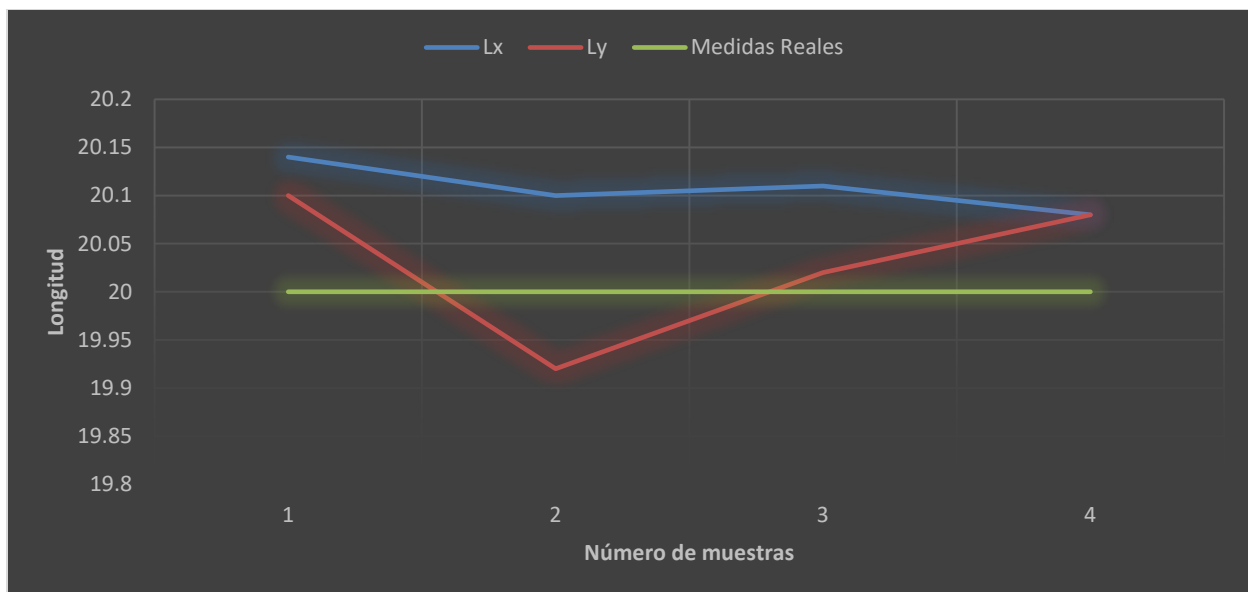
Tabla 3-2 Muestras de modelo de calibración.

N° de Muestras	Medidas tomadas en mm			
	Lx	Ly	Ax	Ay
1	20,12	20,10	19,98	20,11
2	19,88	19,92	19,90	20,04
3	19,90	20,02	19,96	19,92
4	20,08	20,08	20,05	20,11
Promedio	20,00	20,03	19,97	20,05
Medidas Reales	20,00	20,00	20,00	20,00
Resolución	0,10	0,11	0,16	0,14

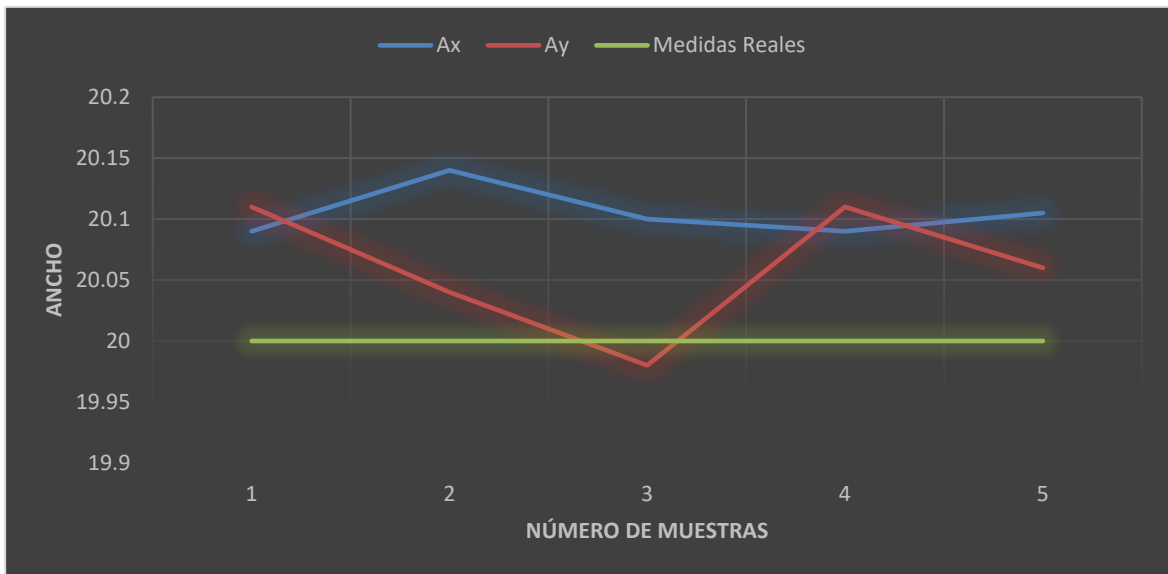
Dónde: Longitud X (Lx), Longitud Y (Ly), Ancho X (Ax), Ancho Y (Ay).

Fuente: Tabla propia

Figura 3-15 Longitud de diseño vs Longitud obtenida



Fuente: Imagen propia

Figura 3-16 Ancho de diseño vs Ancho obtenido

Fuente: Imagen propia

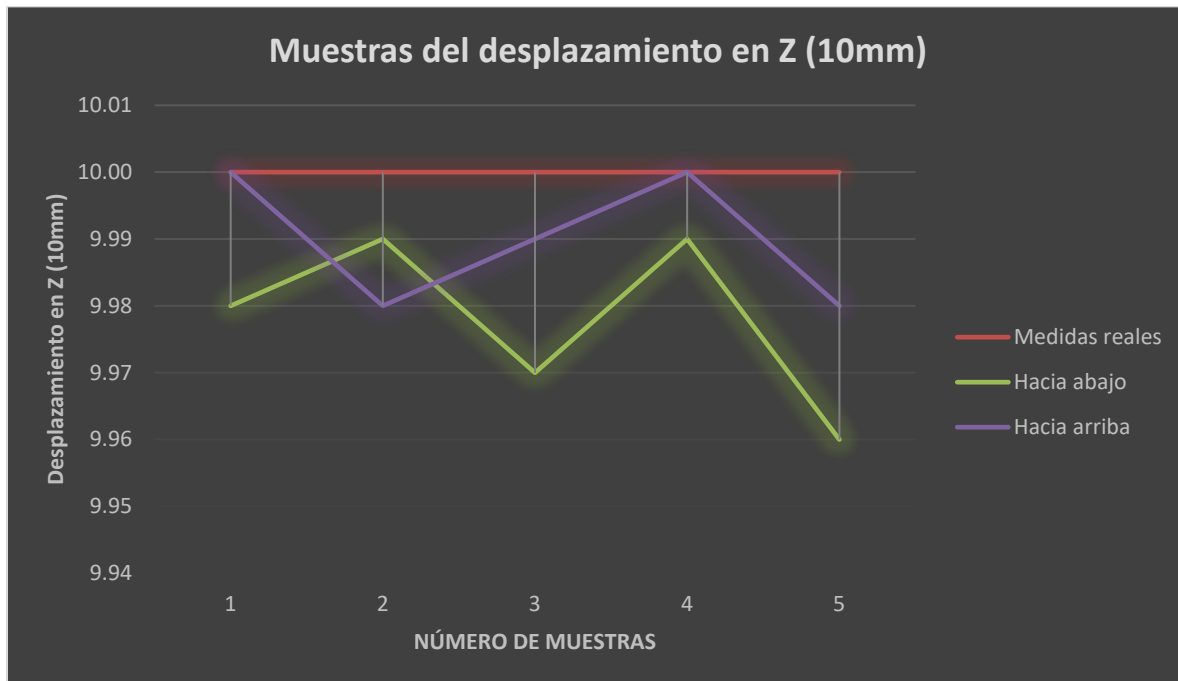
De las figuras 3.16 y 3.17 se concluye que las medidas de error de resolución tanto en el eje X como en el eje Y se encuentra dentro de un rango aceptable (0,1075mm y 0,105mm) para la máquina.

Para lograr obtener una buena resolución en el eje Z, se generan desplazamientos verticales, en diferentes rangos. Como se puede apreciar en las figuras 3.18 y 3.19, se realizan 5 muestras de desplazamientos para obtener la resolución promedio en el eje Z.

Tabla 3-3 Muestras del desplazamiento en Z (10mm)

N° de Muestras	Trayecto	Hacia abajo	Hacia arriba
	Medidas reales	Medidas Obtenidas	
1	10,00	9,98	10,00
2	10,00	9,99	10,00
3	10,00	9,97	9,99
4	10,00	9,99	9,99
5	10,00	9,96	9,98
Promedio		9,98	9,99
Resolución		0.02	0.01

Fuente: Tabla propia

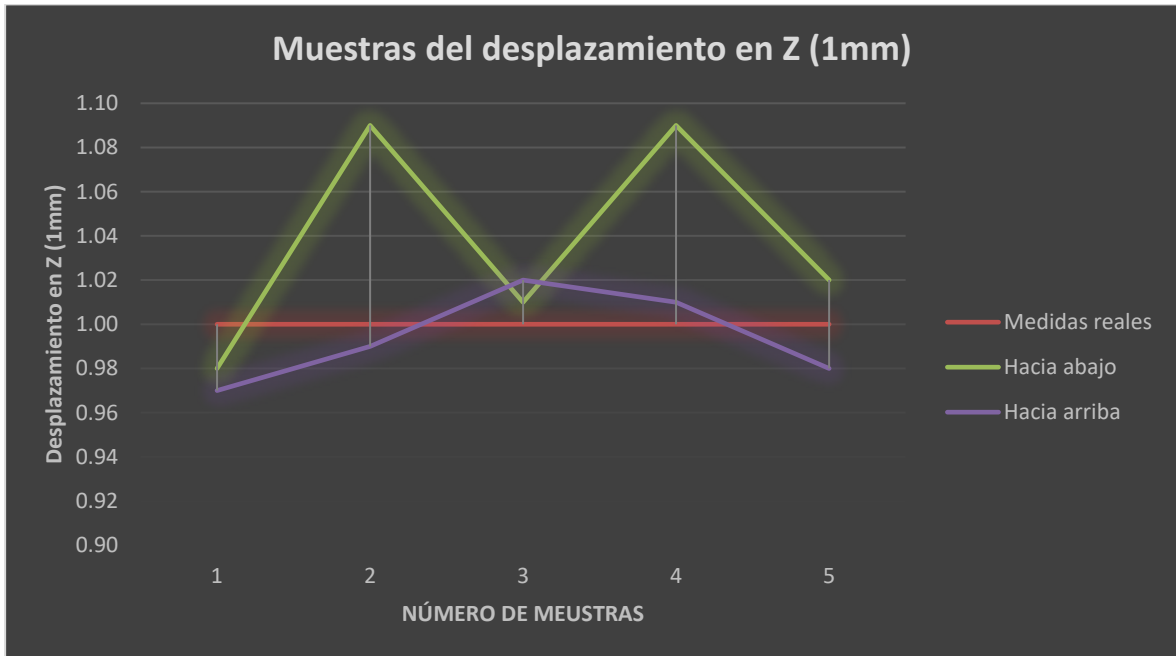
Figura 3-17 Movimiento Teórico vs Movimiento Obtenido (10mm)

Fuente: Imagen propia

Tabla 3-4 Muestras del desplazamiento en Z (1mm)

N° de Muestras	Trayecto	Medidas Obtenidas	
N° de Muestras	Medidas reales	Hacia abajo	Hacia arriba
1	1,00	0,98	0,97
2	1,00	1,09	0,99
3	1,00	1,01	1,02
4	1,00	1,09	1,01
5	1,00	1,02	0,98
Promedio		1,04	0,99
Resolución		0.04	0.01

Fuente: Tabla propia

Figura 3-18 Movimiento Teórico vs Movimiento Obtenido (1mm)

Fuente: Imagen propia

Como se puede apreciar en las figuras 3.18 y 3.19, al comparar las medidas obtenidas con las reales, existe una variación mínima, por lo que se concluye que la resolución de la máquina está calibrada dentro de los parámetros de diseño más óptimos, ya que para los desplazamientos de 1mm y 10mm existe un error máximo de 0.04mm.

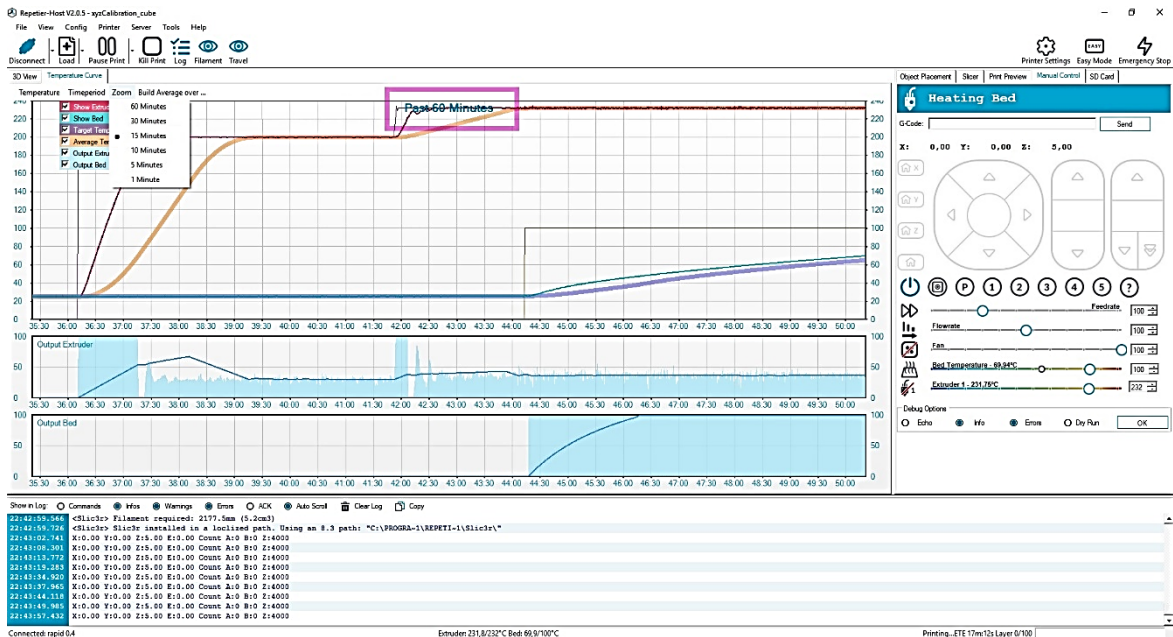
3.5.1 Pruebas de temperatura

Una vez que se ha configurado los parámetros necesarios para controlar la máquina, se procede a realizar el encendido de la máquina para hacer las medidas correspondientes de la temperatura del extrusor y de la plancha de calentamiento.

Mientras ambas partes se calientan, en la figura 3-20 se puede ver el aumento de temperatura de las dos secciones. Esto ha permitido conocer y estudiar los procesos para realizar el calentamiento de la máquina.

Se comprobó que el calentamiento de la extrusora y la base llevada a cabo en un corto parte del tiempo apropiada para el momento de la impresión. En la imagen 3-17 se puede ver el aumento de la temperatura de la extrusora a medida que pasa el tiempo.

Figura 3-19 Curva de temperatura del extrusor y la plancha de calentamiento.



Fuente: Imagen propia

A pesar de las pruebas realizadas, se presentó un problema de calentamiento, en el cual, en el momento en el que el extrusor sobrepasa la temperatura de los 45° se somete a un error debido a las características del motor del extrusor impidiendo el incremento de la temperatura, afectando el proceso de impresión, debido a esto, se hizo la respectiva investigación encontrando problemas en el termostato del extrusor y conexión con la plancha de calentamiento. Se implemento el debido cambio de termostato del extrusor, sin embargo, continua el problema de calentamiento.

Por lo cual, se plantea generar las diferentes opiniones en la sección de recomendaciones para un próximo proyecto del prototipado de la maquina en el cual se pueda llegar a solucionar este problema y continuar con el proceso de impresión.

3.6 Interfaz para el usuario

La interfaz del usuario se realizo para que el usuario pueda elegir la funcionalidad de la maquina en donde puede ingresar a una serie de opciones, las cuales lo redireccionará a unos códigos en Arduino compilándolos y abriendo el software de la impresora 3D o CNC respectivamente.

Figura 3-20 Interfaz de usuario máquina CNC



Fuente: Imagen propia

4. Conclusiones y recomendaciones

La idea principal de este proyecto es llevar a cabo un prototipo de maquina CNC con acoplamiento FDM para la fabricación de piezas en 3D y habiendo obtenido todos los resultados esperados se puede llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

4.1 Conclusiones

Para comenzar con las conclusiones, primero debemos partir de la revisión bibliográfica en la cual como proyecto se optó por trabajar con la técnica de prototipado rápido de modelado por deposición fundida FDM, se concluye que es una de las técnicas más usadas y corresponde a uno de los procesos con más ventajas para la fabricación de prototipos de piezas en 3D, y fue directamente esencial para las pruebas funciones, piezas de alta precisión y con propiedades mecánicas ideales para su implementación.

El sistema de diseño e implementación de la maquina corresponde a un sistema de posicionamiento correspondiente a un sistema macacino de tres grados de libertad, con una precisión que puede ser ajustada a los criterios de diseño ya pre diseñados en cuando a posicionamientos en 3D, y su capacidad de extrusión de material para la impresión en 3D por medio de la técnica FDM.

Se diseñó e implemento una herramienta de extrusión de plástico ABS que cumple con los requerimientos del proceso FDM con lo referente a temperatura de extrusión, velocidad de deposición de material, acoplamiento con la estructura en general y aislamiento térmico.

La selección de componentes electrónicos y su implementación hizo posible el control del prototipo, en sus componentes de actuación, de sensores y control. Respondiendo adecuadamente a las señales enviadas por un computador para el comando de la impresión.

El diseño del prototipo y su implementación se convierten en un punto de partida para la construcción de un equipo de aplicación industrial que considere mejoras tanto del sistema mecánico como del sistema de control, además se convierte en referencia para el diseño de otros sistemas de posicionamiento o técnicas de impresión optadas por otros compañeros de la Facultad de Ingeniería Mecánica Electrónica Y Biomédica de la Universidad Antonio Nariño.

El sistema desarrollado responde a los requerimientos planteados de impresión en 3D y con la comprensión y apropiación de tecnología relacionada con este tipo de procesos, permite abordar temáticas relacionadas como el control numérico computarizado para el desarrollo de otras necesidades en fabricación digital, es el caso del corte de láminas, mecanizado de piezas, soldadura, entre otros.

4.2 Recomendaciones

Para la construcción de este proyecto se recomienda el uso de máquinas de corte por láser, para obtener mayor precisión en la construcción de su estructura con el fin de mejorar los niveles de tolerancias en construcción.

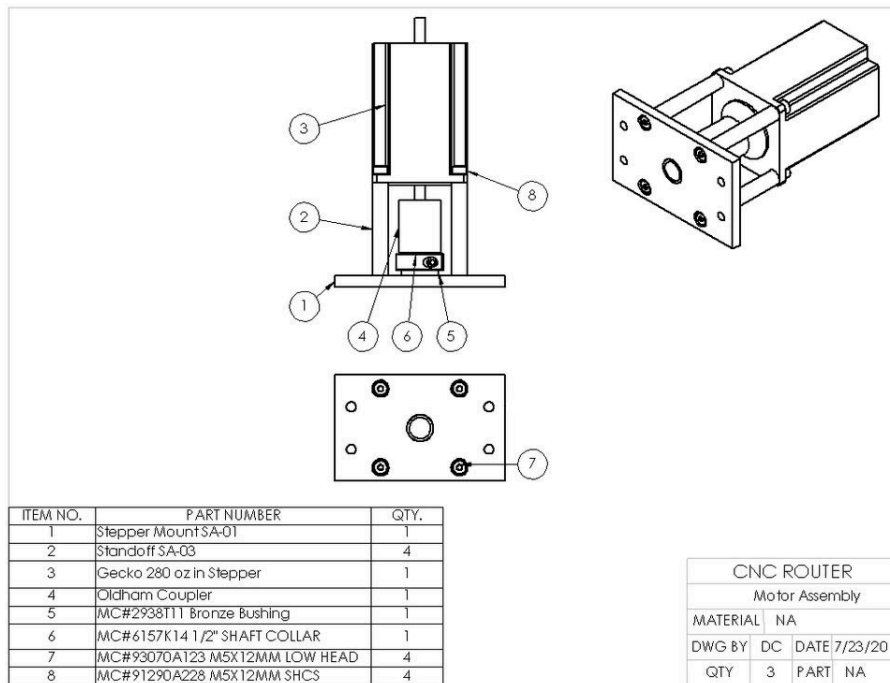
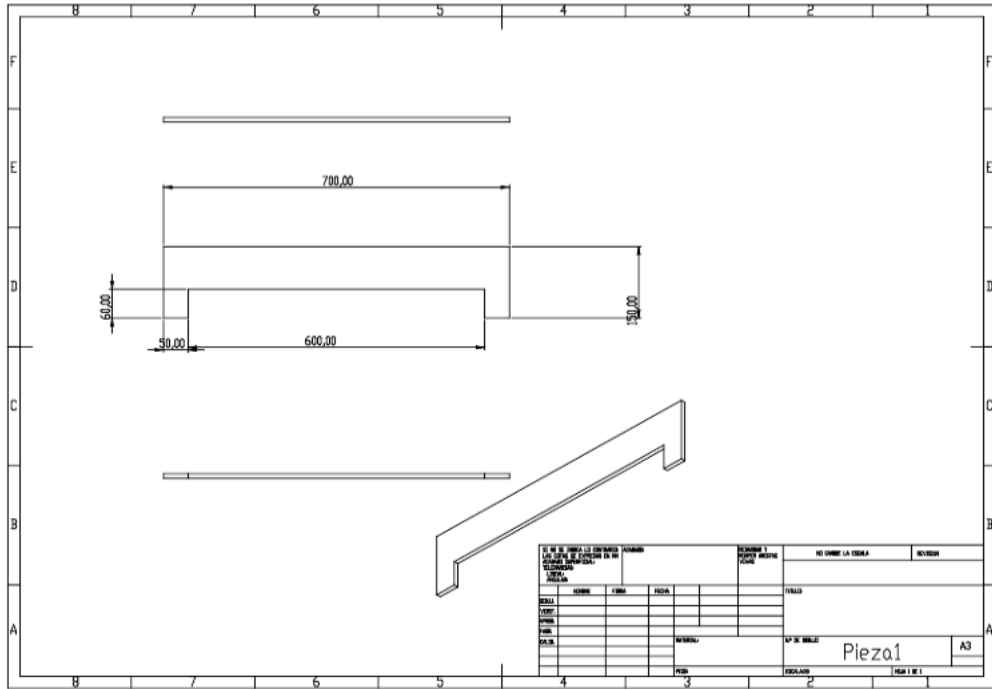
Para imprimir se debe monitorear la temperatura de todo el sistema de calentamiento, desde los motores paso a paso con sus respectivos drivers, como del extrusor y la plancha de calentamiento, para así configurar la máxima corriente permisible ya que a la hora de imprimir, la temperatura debe estar rondando la temperatura óptima de fundición del polímero (230°C) la cual se debe corroborar para que en el momento en que se alcance se dé la orden de impresión.

Algunos problemas de dirección de los ejes pueden estar relacionados con los sensores finales de carrera, su correcto funcionamiento de 5v en estado activo, conectados correctamente en la tarjeta controladora.

El sistema de control de posición se puede mejorar y volverse mas robusto si se realiza una modificación del Firmware que controla la impresora, o si este se desarrolla desde cero, lo que significaría el uso a un solo controlador y se tendría un sistema mas compacto.

Posibles trabajos futuros a desarrollar en la impresora están relacionados con la optimización del proceso de impresión, la implementación del sistema de posicionamiento en otro proceso de fabricación digital, la integración de una interfaz para imprimir desde internet, entre otros.

A. Anexo: Planos de la Máquina



B. Anexo: Código fresadora

```
#if (ARDUINO < 100)
#include <WProgram.h>
#else
#include <Arduino.h>
#endif
#include <Wire.h>
#include "configMe.h"
#include "processGcode.h"
#include "tempCntrl.h"
#include "mmi.h"
#ifdef TEMP_DS18B20_PIN
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#endif
#ifdef _MMI_ENABLED_
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#endif // _MMI_ENABLED_
#ifdef _TEMP_CONTROL_ENABLED_
#include <thermistor.h>
#include <lm75.h>
#endif // _TEMP_CONTROL_ENABLED_
// Variable and object declarations
// -----
```

```
#ifdef _TEMP_CONTROL_ENABLED_
    tempCntrl    myTempControl(FAN_PIN, 0b1001000);
#endif // _TEMP_CONTROL_ENABLED_

#ifdef TEMP_DS18B20_PIN
    OneWire oneWire(TEMP_DS18B20_PIN);
    DallasTemperature sensors(&oneWire);
#endif

#ifdef _MMI_ENABLED_
    LiquidCrystal_I2C lcd(0x38);    // Set the LCD I2C address
    mmi            myMMI;
#endif // _MMI_ENABLED_

stepperCntrl    machController; // machine controller

// Initialize the system and electronics
// -----

void setup()
{
    delay(1000);

    // Initialise all the electronics

    Serial.begin(19200);
    Serial.println("start");

    if (POWER_OFF_PIN!=0){
        pinMode (POWER_OFF_PIN, OUTPUT);
    }

    if (POWER_OFF_PIN!=0){
        digitalWrite(POWER_OFF_PIN,HIGH);
    }
}
```



```
#ifdef _TEMP_CONTROL_ENABLED_
    myTempControl.init();
#endif // _TEMP_CONTROL_ENABLED_

#ifdef _TEMP_CONTROL_ENABLED_
    initGcodeProcessor( &machController, &myTempControl );
#else
    #ifdef TEMP_DS18B20_PIN
        initGcodeProcessor( &machController, sensors );
    #else
        initGcodeProcessor( &machController );
    #endif
#endif

machController.init ();

// Parser initialization

pinMode ( MOTOR_PIN, OUTPUT );

#ifdef MOTOR_PWM
    pinMode (MOTOR_PWM, OUTPUT);
#endif

#ifdef _MMI_ENABLED_
    // initialize the lcd
    lcd.begin(16,2);

    // initialize the LCD backlight pin
    pinMode ( LCD_BL_PIN, OUTPUT );
    digitalWrite ( LCD_BL_PIN, HIGH );

    // initialize the MMI, with or without thermal control
#endif

#ifdef _TEMP_CONTROL_ENABLED_
```

```
myMMI.init ( &lcd, &myTempControl, &machController );

#else

myMMI.init ( &lcd, &machController );

#endif // _TEMP_CONTROL_ENABLED_

#endif // _MMI_ENABLED_

#ifdef TEMP_DS18B20_PIN

sensors.begin();

#endif

}

// Main application control thread

// -----

void loop()

{

static int counter = 0;

if ( counter == 0 )

{

counter=10000;

#ifdef _TEMP_CONTROL_ENABLED_

myTempControl.controlTemp();

#endif // _TEMP_CONTROL_ENABLED_

#ifdef _MMI_ENABLED_

myMMI.display ();

#endif // _MMI_ENABLED_

}
```

```
counter--;  
    processGcode ();
```

C. Anexo: Código interfaz gráfica

```
import subprocess  
  
from tkinter import filedialog  
  
from tkinter import *  
  
from PIL import ImageTk, Image  
  
def accion_uno ():  
    archivo_abierto = filedialog.askopenfilename(initialdir = "/",  
        subprocess.Popen(["C:\ProgramFiles\Repetier-Host\RepetierHost.exe"])  
  
def accion_dos ():  
    subprocess.Popen(["C:\Users\carlr\Desktop\TIG\CNC_V1.0.16\CNC"])  
  
def accion_tres ():  
    subprocess.Popen(["C:\Users\carlr\Desktop\TIG\Marlin-1.1.x (2)\Marlin-1.1.x\Marlin"])  
  
raiz = Tk()  
  
raiz.title("proyecto")  
  
raiz.resizable(0,0)  
  
raiz.iconbitmap("1logo.ico")  
  
raiz.geometry("720x500")
```

```
raiz.config( bg="69F16F")

titulo=Label(raiz,text="Interfaz gráfica")

titulo.place(x=340,y=50)

mifreem=Frame()

mifreem.pack(side="bottom")

mifreem.config(bg="69F1AD")

mifreem.config(width="500", height="400")

mifreem.config(bd=10)

mifreem.config(relief="sunke")

mifreem.config(cursor="plus")

boton=Button(mifreem,text="Repetier-Host",width=15,height=5,
command=accion_uno).place(x=95,y=100)

boton1=Button(mifreem,text="fresadora",width=15,height=5,
command=accion_dos).place(x=300,y=100)

boton2=Button(mifreem,text="Impresora3D",width=15,height=5,
command=accion_tres).place(x=200,y=250)

raiz.mainloop()
```

Bibliografía

- Alvarez C., K. L., Lagos C., R. F., & Aizpun, M. (2016). Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación*, 36(3), 110–116.
<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n3.56610>
- Alwafi Ridho Subarkah. (2018). DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO PARA LOS MOVIMIENTOS DEL EXTRUSOR Y LA PLATAFORMA DEL SISTEMA DE IMPRESIÓN UAO 3DP. *Nhk技研*, 151(2), 10–17.
- Amanullah, A. N. M., Murshiduzzaman, Saleh, T., & Khan, R. (2017). Design and Development of a Hybrid Machine Combining Rapid Prototyping and CNC Milling Operation. *Procedia Engineering*, 184, 163–170.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.081>
- Blasnilo, E. R., Jiménez, F. D., Andrés Gutiérrez, G. A., & Iván Villamizar, N. (2018). Printing as a Didactic Tool for Teaching some Engineering and Design Concepts. *Scielo.Org.Co*, 23(1), 70–83. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-750X2018000100070&script=sci_abstract&lng=en
- Bordignon, F., Iglesias, A. A., & Hahn, Á. (2018). *Diseño e impresión de objetos 3D*.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/69819>
- Castro Cervantes, J. Á., & Contreras Hernández, D. (2017). *Máquina Compacta Usando Tecnología CNC Para Impresión 3D y Manufactura*. 1–15.
[http://201.151.251.123/ftp/oficios17/academica/a/41.Maquina Compacta Usando Tecnología CNC para Impresion 3D y Manufactura.pdf](http://201.151.251.123/ftp/oficios17/academica/a/41.Maquina%20Compacta%20Usando%20Tecnologia%20CNC%20para%20Impresion%203D%20y%20Manufactura.pdf)
- Galantucci, L. M., Bodi, I., Kacani, J., & Lavecchia, F. (2015). Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modeling technique. *Procedia CIRP*, 28, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.014>
- Gómez, E., & Sola, C. (2013). *Aplicación del software NX para la construcción de piezas de máquinas con geometrías complejas en el TORNO CNC MODELO GSK980TD y la elaboración de la guía respectiva*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5800>

- Guijarro Hernández, J. (2015). *Desarrollo de un sistema de control de una impresora 3D*.
<http://uvadoc.uva.es:80/handle/10324/13275>
- IZA ALMACHI, alex santiago. (2016). "Implementación De Una Impresora 3D De Control Numérico Computarizado Cnc Para La Producción De Prototipos De Plástico Que Tecnificara El Laboratorio De Robótica De La Universidad Técnica De Cotopaxi Periodo 2016." *Proyecto de Investigación Presentado Previo a La Obtención Del Título de Ingeniero Electromecánico.*, 0(0), 1–34.
- Kun, K. (2016). Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. *Procedia Engineering*, 149(June), 203–211.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.657>
- Leon Medina, J. X., & Torres Diaz, E. (2013). DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. In *Universidade Federal do Triângulo Mineiro* (p. 205). /citations?view_op=view_citation&continue=/scholar%3Fhl%3Dpt-BR%26as_sdt%3D0,5%26scilib%3D1&citilm=1&citation_for_view=wS0xi2wAAAAJ:2osOgNQ5qMEC&hl=pt-BR&oi=p
- López, J., José, M., Morales, A., Director, C., Jesús, J., & Rodríguez, L. (2014). *Módulo De Entrenamiento Para El Control De Posición Y Velocidad De Servomotores Mediante Plc Con Interfaz Scada*.
[http://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13477/TFM José Antonio Morales Ceballos y Javier López Morales.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13477/TFM%20José%20Antonio%20Morales%20Ceballos%20y%20Javier%20López%20Morales.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Maydana, E., & Mamani, W. T. (2019). *Implementación De Una Impresora 3D Y Escaneo Tridimensional Para La Fabricación De Prótesis Para Animal Canino Con Problemas De Movilidad*. 330.
- Nandi, C., Caspi, A., Grossman, D., & Tatlock, Z. (2017). Programming language tools and techniques for 3D printing. *Leibniz International Proceedings in Informatics, LIPIcs*, 71(10), 1–10. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.SNAPL.2017.10>
- Valderrama Gamez, A. S. (2020). *Diseño e Implementación de un Sistema de Control CNC Compatible e Intercambiable para Impresión 3D, Corte y Fresado de materiales blandos en aplicaciones didácticas*. 125.
- Wan, J., Li, D., & Zhang, P. (2010). Key technology of embedded system implementation for software-based CNC system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 23(2), 217–224. <https://doi.org/10.3901/CJME.2010.02.217>