

**Diseño e Implementación de un Sistema de Control CNC Compatible e Intercambiable para Impresión 3D, Corte y Fresado de materiales blandos en aplicaciones didácticas**

Alexis Steven Valderrama Gámez

Universidad Santo Tomás Tunja  
Facultad de Ingeniería Electrónica

**Diseño e Implementación de un Sistema de Control CNC Compatible e Intercambiable para Impresión 3D, Corte y Fresado de materiales blandos en aplicaciones didácticas** ii

Alexis Steven Valderrama Gámez  
2020

Universidad Santo Tomás Tunja  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
Tesis para graduación de Ingeniero Electrónico

*Las Ideas expuestas en este libro son responsabilidad del autor.*

*Nota de Aceptación:*

---

---

---

---

---

---

*Firma del presidente del Jurado*

---

*Firma del Jurado*

---

*Firma del Jurado*

## **Dedicatoria**

v

Dedico esta tesis a todas esas personas que confiaron en mis capacidades, a mis padres, hermanos y amigos y docentes, también la dedico a todas aquellas personas que durante este proceso universitario me ayudaron a conseguirlo, gracias porque realmente no estaría aquí, si no hubiera sido por ustedes, porque me hicieron aprender que, en la batalla de la vida, pelear solo contra el mundo es perder la guerra, y en lugar de luchar solo, es mejor pelear en equipo y ayudarnos mutuamente.

## Agradecimientos

vi

Agradezco en primer lugar a Dios por ayudarme a culminar esta etapa, a mi madre hermosa del alma por siempre estar ahí incondicionalmente levantándose temprano para prepararme el desayuno, el almuerzo, la cena; por estar ahí dándome consejos para no dejarme caer y seguir incesante en el camino de la vida. También doy gracias a mi padre y mis hermanos por siempre estar ahí apoyándome y motivándome cuando no llegaba bien a casa.

Por último, pero no menos importante, doy gracias a los docentes que me acompañaron en toda esta etapa académica de Ingeniería Electrónica, como es el caso del ingeniero Carlos Cardona, mi tutor. Al ingeniero Germán Gutiérrez que también fue mi tutor le doy muchas gracias por permitirme hacer parte del semillero de investigación GIDINT y trabajar en este hermoso proyecto de la impresora 3D y el área afín del CNC,

Gracias también a José, laboratorista de ingeniería mecánica por brindarme los espacios de trabajo, las herramientas necesarias y su mano de obra tan valiosa que también me aportó en la construcción de este proyecto, también gracias por su gran disposición a ayudarme y enseñarme a mantener un buen ambiente de trabajo, siempre fue tolerante y paciente conmigo y eso es de gran mérito.

Agradezco a todas esas personas, estudiantes de ingeniería mecánica por ayudarme a realizar este proyecto, todos sus aportes fueron de extrema ayuda. Muchísimas Gracias a todos.

# 1. Tabla de contenido

vii

2.	INTRODUCCION.....	7
3.	JUSTIFICACIÓN.....	12
4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
5.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	20
6.	OBJETIVOS.....	23
6.1	Objetivo General.....	23
6.2	Objetivos Específicos.....	23
7.	MARCO REFERENCIAL.....	24
8.	MARCO HISTÓRICO.....	26
8.1	Impresión 3D.....	26
8.2	Fresado y corte láser de materiales blandos.....	28
9.	DISEÑO SISTEMA DE CONTROL MODULAR.....	30
9.1	PARAMETROS DE DISEÑO.....	30
9.2	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS.....	33
9.2.1	Motor paso a paso.....	33
9.2.2	Drivers para motores.....	35
9.2.3	Driver A4988.....	35
9.2.4	Drivers DM542A.....	36
9.2.5	Arduino Mega y Shield RAMPS 1.4.....	38
9.2.6	Extrusor para impresión 3D.....	40
9.2.7	Grabado Láser.....	42
9.2.8	Herramienta de fresado (Spindle).....	43
10.	SOFTWARE DE CONTROL Marlin 1.x.....	45
10.1	Como funciona Marlin.....	46
11.	IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL MODULAR.....	47
11.1	Gabinete.....	49
11.2	Sistema Subyacente.....	50
11.3	Implementación de drivers DM542A.....	51
11.4	Fuentes de alimentación.....	53
11.4.1	Fuentes para drivers y motores.....	53
11.4.2	Fuente para RAMPS y ventiladores.....	54
11.4.3	Adecuación de la fuente de 12V al chasis.....	57
11.4.4	Conexión de las fuentes.....	64
11.4.5	Adecuación de las fuentes de 36 V al chasis.....	64
11.5	Conexión y tipo de acoples para motores.....	65
11.6	Conexión y tipo de acoples para fines de curso, resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y conexión pwm de láser.....	69
11.7	Acople conexión serial del computador o microprocesador al sistema de control modular.....	72
12.	MODIFICACION DEL SOFTWARE MARLIN PARA EL SISTEMA DE CONTROL MODULAR.....	73
12.1	Baudrate.....	73
12.2	Motherboard.....	73
12.3	Ajuste PID para nozzle.....	76
12.4	Cálculos para pasar pasos por mm.....	76

12.5	Poleas y correas .....	77viii
12.6	Husillo .....	78
12.7	Extrusor.....	79
12.8	Ingreso de los datos a Marlin .....	79
12.9	Velocidad de avance .....	80
12.10	Aceleración.....	81
12.11	Jerk.....	81
12.12	Fines de curso .....	82
12.13	Inversión de fines de curso máximos y mínimos .....	83
12.14	Inversión de la dirección del motor z fines de curso .....	83
12.15	Control para láser.....	84
13.	RESULTADOS .....	86
13.1	Resultados Impresión 3D .....	86
13.2	Resultados Fresado CNC .....	88
13.3	Resultados Grabado Láser CNC.....	91
14.	OTROS APORTES DERIVADOS DEL PROYECTO .....	96
14.1	Diseño asistido por computador (CAD) y Fabricación asistida por computador (CAM) del tren de aterrizaje del dron DJI f550 de la facultad de ingeniería Electrónica USTA Tunja. 96	
15.	CONCLUSIONES.....	107
16.	RECOMENDACIONES.....	110
17.	Bibliografía .....	111
18.	ANEXOS .....	113

Tabla 3.1 Promedio grupal por periodo académico, Dibujo 1. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017). .....15

Tabla 3.2 Promedio grupal por periodo académico, cálculo Integral. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017).....15

Tabla 3.3 Promedio grupal por periodo académico. Lógica de Programación para ingeniería mecánica. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017).....15

Tabla 9.1 Evaluación de necesidades y requerimientos de diseño. Fuente: Autor. ....31

Tabla 9.2 Características eléctricas motor NEMA 23. Fuente: (Stepperonline, s.f.).....34

Tabla 9.3 Especificaciones físicas motor NEMA 23. Fuente: (Stepperonline, s.f.). ....34

Tabla 9.4 Tazas máximas de desempeño driver A4988. Fuente: (Allegro, s.f.). ....36

Tabla 9.5 Especificaciones eléctricas driver DM542A. Fuente: (Longsmotor, s.f.). ....38

Tabla 9.6 Características Spindle ER11. Fuente: (Vistrónica, s.f.). ....45

Figura 2.1 Tipos, tecnologías y materiales que se pueden aplicar en la impresión. Fuente: (Centro de análisis y prospectiva gabinete técnico guardia civil, 2016).....	8
Figura 2.2 Prótesis en 3D hechas por Fabrilab. Fuente: (Dinero, 2018).....	9
Figura 2.3 Mecanismo de modelado por deposición fundida. Fuente: (Tran, Nguyen, & Nguyen, 2017).....	10
Figura 3.1 Análisis gráfico de los resultados del cuestionario-encuesta. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017).....	16
Figura 8.1 Evolución de la impresión 3D. Fuente: (3DHUB, s.f.).....	28
Figura 9.1 Estructura CNC de los laboratorios de Ingeniería Mecánica a la que se le aplicó el control. Fuente: Autor.....	32
Figura 9.2 Motor paso a paso NEMA 23 modelo 23HS9430B. Fuente: Autor.....	34
Figura 9.3 Driver a4988 vista posterior. Fuente: Autor.....	36
Figura 9.4 Driver industrial DM542A. Fuente: Autor.....	37
Figura 9.5 Diagrama de conexión de los dispositivos de la impresora 3D por FDM. Fuente: (Shahid, Khan, & Khan, 2019).....	39
Figura 9.6 Arduino Mega 2560. Fuente: (Arduino, s.f.).....	40
Figura 9.7 Ilustración de un extrusor. Fuente: (toninadal.frax3dr, s.f.).....	40
Figura 9.8 Extrusor Mk8. Fuente: (toninadal.frax3dr, s.f.).....	41
Figura 9.9 Laser Driver Opt-Lasers. Fuente: (Opt Lasers, s.f.).....	42
Figura 9.10 Datos técnicos OPT lasers. Fuente: (Opt Lasers, s.f.).....	43
Figura 9.11 Spindle ER11 500W. Fuente: (Amazon, s.f.).....	44
Figura 11.1 Esquema del acoples y extensiones del sistema de control modular principal y su sistema subyacente. Fuente: Autor.....	48
Figura 11.2 Diagrama de conexión de los dispositivos de la impresora 3D por FDM. Fuente: Autor.....	49
Figura 11.3 Vista frontal y lateral del chasis donde irán almacenados todos los componentes. Fuente: Autor.....	50
Figura 11.4 Sistema subyacente de acoples. Fuente: Autor.....	51
Figura 11.5 Conexión del driver DM542A a la RAMPS. Fuente: Autor.....	51
Figura 11.6 Configuración escogida de los drivers DM542A. Fuente Autor.....	52
Figura 11.7 Fuente de alimentación de 360W. Fuente: Autor.....	53
Figura 11.8 Simulación del circuito de bypass con un transistor PNP. Fuente: Autor.....	55
Figura 11.9 Diseño PCB regulador con bypass transistorizado. Fuente: Autor.....	56
Figura 11.10 PCB del bypass transistorizado. Fuente: Autor.....	56
Figura 11.11 Diseño del soporte en bruto para fuente de alimentación de 12V. Fuente: Autor.....	58
Figura 11.12 Definición de los puntos de fuerza (flecha azul), puntos de contacto y zonas de material. Fuente: Autor.....	59
Figura 11.13 Resultado de la Optimización Topológica para el soporte de la fuente de 12V. Fuente: Autor.....	60
Figura 11.14 Malla solida del soporte listo para imprimir en 3D. Fuente: Autor.....	61
Figura 11.15 Vista previa del modelo en el slicer antes de imprimirlo en 3D. Fuente: Autor.....	61
Figura 11.16 Vista isométrica de los Soportes impresos en 3D para la fuente de poder de 12V. Fuente: Autor.....	62

Figura 11.17 Vista lateral de los soportes impresos en 3D para la fuente de poder de 12V.	xi
Fuente: Autor.	62
Figura 11.18 Fuente de 12 V instalada en el sistema de control modular con optimización topológica en los soportes. Fuente: Autor.	63
Figura 11.19 Diseño CAD /Realidad Soporte de fácil acople para fuente de 360 W. Fuente: Autor.	64
Figura 11.20 Fabricación de soportes de fácil acople para fuentes de 360 W unidos al chasis. Fuente: Autor.	65
Figura 11.21 Conectores Gx16 – 4 para motores paso a paso. Fuente: Autor.	66
Figura 11.22 Acoples de motores paso a paso colocados en el chasis. Fuente: Autor.	66
Figura 11.23 Extensiones para los motores. Fuente: Autor.	67
Figura 11.24 American Wire Gauge Standard. Fuente: (pepegreen, s.f.).	68
Figura 11.25 Conexión de bobinas de motor paso a paso NEMA 23 a acoples y extensiones de cable. Fuente: Autor.	69
Figura 11.26 Fines de curso del sistema de control modular. Fuente: Autor.	70
Figura 11.27 Diseño de placa para acoples de fines de curso resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y salida pwm para láser. Fuente: Autor.	70
Figura 11.28 Acoples fines de curso, resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y conexión pwm de láser acoplados al chasis. Fuente: Autor.	71
Figura 11.29 Esquema de conexión de acoples para la resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y conexión pwm para láser. Fuente: Autor.	71
Figura 11.30 Acople de comunicación serial del sistema de control modular al computador. Fuente: Autor.	72
Figura 12.1 Instrucción 1 para escoger la motherboard. Fuente: Autor.	73
Figura 12.2 Instrucción 2 para escoger la motherboard. Fuente: Autor.	74
Figura 12.3 Instrucción 3 para escoger la motherboard. Fuente: Autor.	75
Figura 12.4 Definición de la motherboard RAMPS a usar en el fichero. Fuente: Autor.	75
Figura 12.5 Definición del número de extrusores y diámetro de la boquilla. Fuente: Autor.	76
Figura 12.6 Variables PID configuradas. Fuente: Autor.	76
Figura 12.7 Polea y correa. Fuente: Autor.	77
Figura 12.8 Husillo. Fuente: Autor.	78
Figura 12.9 Definición pasos por milímetro por defecto. Fuente: Autor.	80
Figura 12.10 Valores máximos de velocidad de avance por defecto. Fuente: Autor.	80
Figura 12.11 Valores máximos de aceleración por defecto. Fuente: Autor.	81
Figura 12.12 Gráfica explicativa de jerk, aceleración. Fuente: (newport, s.f.).	82
Figura 12.13 Parámetros de JERK. Fuente: Autor.	82
Figura 12.14 Definición parámetros de pullups. Fuente: Autor.	83
Figura 12.15 Inversión fines de curso máximos y mínimos. Fuente: Autor.	83
Figura 12.16 Inversión de la dirección del motor z fines de curso. Fuente: Autor.	84
Figura 12.17 Conexión del láser. Fuente: (Opt Lasers, s.f.).	84
Figura 12.18 Conexión PWM del láser de CO2. Fuente: Autor.	85
Figura 13.1 Interfaz de cura con el archivo STL dispuesto a filetear. Fuente: Autor.	86
Figura 13.2 Generación del código G. Fuente: Autor.	87
Figura 13.3 Interfaz de impresión de Pronterface. Fuente: Autor.	87
Figura 13.4 Figura impresa en 3D con la controladora diseñada por el autor. Fuente: Autor.	88
Figura 13.5 Coordenadas en NC Viewer para realizar un cuadrado. Fuente: Autor.	89

Figura 13.6 Realizando Geometria cuadrada. Fuente: Autor. ....	89xii
Figura 13.7 G Code geometría hexagonal cargado en pronterface. Fuente: Autor. ....	90
Figura 13.8 Prueba de Refrentado y de geometria Hexagonal. Fuente: Autor. ....	91
Figura 13.9 Interfaz PID2CADCAM. Fuente: Autor. ....	91
Figura 13.10 Contornos de la figura software PID2CADCAM. Fuente: Autor. ....	92
Figura 13.11 Código G figura para test grabado láser. Fuente: Autor. ....	93
Figura 13.12 Código G figura para test grabado láser en pronterface. Fuente: Autor. ....	94
Figura 13.13 Controladora relizando corte láser. Fuente: Autor. ....	94
Figura 13.14 Prueba grabado láser en carton. Fuente: Autor. ....	95
Figura 13.15 Pruebas grabado láser en papel. Fuente: Autor. ....	95
Figura 13.16 Pruebas grabado láser en madera. Fuente: Autor. ....	96
Figura 14.1 Dron de la facultad antes de los soportes. Fuente: Autor. ....	97
Figura 14.2 Pequeña placa del chasis del dron. Fuente: Autor. ....	98
Figura 14.3 Diseño del soporte fijo Version 1. Fuente: Autor. ....	99
Figura 14.4 Fabricación del soporte fijo Version 1. Fuente: Autor. ....	100
Figura 14.5 Fabricación del soporte fijo Version 2. Fuente: Autor. ....	100
Figura 14.6 Soporte plegable para cada una de los puntos de apoyo del dron Version 1. Fuente: Autor. ....	101
Figura 14.7 Toma de medidas al controlador. Fuente: Autor. ....	102
Figura 14.8 Toma de medidas de la distancia del soporte al controlador. Fuente: Autor. ....	102
Figura 14.9 Diseño final de cada una de los soportes plegables para el dron. Fuente: Autor. ....	103
Figura 14.10 Imprimiendo el soporte fijo Version Final. Fuente: Autor. ....	104
Figura 14.11 Imprimiendo el soporte plegable para cada uno de los puntos de apoyo del dron Version Final. Fuente: Autor. ....	104
Figura 14.12 Fabricación del soporte fijo Version Final. Fuente: Autor. ....	105
Figura 14.13 Soporte plegable del dron Version Final. Fuente: Autor. ....	105
Figura 14.14 Tren de aterrizaje desplegado y plegado del dron. Fuente: Autor. ....	106

## GLOSARIO

**A4988:** Es un driver para controlar motores paso a paso.

**AC:** Corriente alterna.

**Bipolar:** El motor bipolar se denomina así porque al momento de energizar las bobinas del estator se generan simultáneamente dos polos magnéticos, uno norte y uno sur.

**CAD:** En idioma inglés, son las siglas de: Computer-Aided Design (CAD): diseño asistido por computadora (DAC).

**CAM:** Computer-Aided Manufacturing (CAM). Fabricación asistida por computadora (FAC).

**CNC:** Control Numérico Computarizado. es un sistema de automatización de máquinas herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o palancas.

**Corte por plasma:** El fundamento del corte por plasma se basa en elevar la temperatura del material a cortar de una forma muy localizada y por encima de los 20 000 °C, llevando el gas utilizado hasta el cuarto estado de la materia, el plasma.

**Discos de carburo:** Son discos de corte que tienen un compuesto de carbono y otro elemento químico, generalmente metálico.

**Dm542a:** Driver industrial para controlar motores paso a paso.

**Driver:** Controlador de señales de un motor.

**EAGLE:** EAGLE es un programa de diseño de diagramas y PCBs con auto enrutador

**Electromecánico:** Es la combinación de las ciencias del electromagnetismo de la ingeniería eléctrica y la ciencia de la mecánica.

**Extrusor:** El extrusor es la parte de la impresora 3D que va tirando, arrastrando, cogiendo, el filamento o material de impresión 3d que se esté usando, para luego fundirlo y depositarlo en la superficie de impresión en 3D a través del hotend.

**FDM:** Modelado por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling), es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos.

**Fabrilab:** Empresa Colombiana de impresión 3D para fabricación de prótesis para niños.

**Frecuencia:** La frecuencia es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

**Fresadora:** Una fresadora es una máquina herramienta para realizar trabajos mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una herramienta rotativa de varios filos de corte denominada fresa.

**Gabinete:** Por sus sinónimos. Panel, caja o chasis. Es una caja metálica donde se almacenan dispositivos.

**GRBL:** Software gratuito, de código abierto y alto rendimiento para controlar el movimiento de las máquinas que se mueven, que hacen las cosas o que hacen que las cosas se muevan, y se ejecutarán en un Arduino directo. Si el movimiento de los fabricantes fuera una industria, Grbl sería el estándar de la industria.

La mayoría de las impresoras 3D de código abierto tienen Grbl en sus corazones. Se ha adaptado para su uso en cientos de proyectos que incluyen cortadores láser, escritores manuales automáticos, perforadores de agujeros, pintores de grafiti y máquinas de dibujo extrañas. Debido a su rendimiento, simplicidad y requisitos de hardware frugales, Grbl se ha convertido en un pequeño fenómeno de código abierto.

**Hotend:** El Hotend, es la parte final del extrusor, la cual va a fundir el filamento y lo va a depositar sobre la superficie de impresión.

**Impresora 3D:** Es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D, creando piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por computador.

**Láser:** (del acrónimo inglés LASER, light amplification by stimulated emission of radiation); amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente tanto espacial como temporalmente.

**Manufactura:** Proceso de fabricación a mano con o sin la ayuda de herramientas.

**Microprocesador:** Procesador de muy pequeñas dimensiones en el que todos los elementos están agrupados en un solo circuito integrado.

**NEMA:** National Electrical Manufacturers Association. Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos

**Opensource:** Que es de código abierto. El código abierto es un modelo de desarrollo de software basado en la colaboración abierta. Se enfoca más en los beneficios prácticos (acceso al código fuente) que en cuestiones éticas o de libertad que tanto se destacan en el software libre.

**Proteus:** Proteus Design Suite es software de automatización de diseño electrónico, desarrollado por Labcenter Electronics Ltd., que consta de los dos programas principales: Ares e Isis.

**Prototipo:** Primer ejemplar que se fabrica de una figura, un invento u otra cosa, y que sirve de modelo para fabricar otras iguales, o molde original con el que se fabrica.

**RAMPS:** El nombre RAMPS viene dado por sus siglas Reprap Arduino Mega Pololu Shield. Son unos shields para Arduino MEGA diseñadas para controlar motores paso a paso, generalmente NEMA, utilizando drivers POLOLU A4988 o DVR8825.

**Shield:** Las shields son placas de circuitos modulares que se montan unas encima de otras para dar funcionalidad extra a un Arduino. Esta Shields son apilables.

**Sinterizado:** Es un proceso de fabricación de piezas sólidas moldeadas, consiste en compactar a alta presión varios polvos metálicos y / o cerámicas mezcladas homogéneamente y, una vez compactadas, realizar un tratamiento térmico, a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, obteniéndose una pieza.

**SLS:** (en inglés, Selective Laser sintering, o SLS) es una técnica de adición de prototipado rápido en el cual se deposita una capa de polvo, de unas décimas de milímetro, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser de alta potencia (por ejemplo, de CO<sub>2</sub>) sinteriza el polvo en los puntos seleccionados (causando que las partículas se fusionen y solidifiquen).

**Software:** Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.

**Torsión:** Es la sollicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo o prisma mecánico, como pueden ser ejes o, en general, elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos, aunque es posible encontrarla en situaciones diversas.

**Undos3d:** Empresa de impresión 3D colombiana.

## RESUMEN

En el presente trabajo, Tesis de grado titulada “Diseño e Implementación de un Sistema de Control CNC Compatible e Intercambiable para Impresión 3D, Corte y Fresado de materiales blandos en aplicaciones didácticas”, se diseñó e implementó un sistema de control modular para una impresora 3d de gran escala que tiene la capacidad de usar otro tipo de herramientas como una cortadora laser y un spindle para fresado para realizar manufactura sustractiva. El proyecto está conformado por una revisión del estado del arte de la impresión 3D, el problema planteado, la justificación y los resultados que están divididos por capítulos donde se plantea la problemática fundamental, el marco teórico y referencial, objetivos, contenido, conclusiones y bibliografía.

Se trata de un proyecto que pretende dar solución a un problema en específico convirtiéndose en un elemento educacional y didáctico de gran valor para el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas USTA Tunja, pero que también ha sido una herramienta de aprendizaje por parte del autor, ya que resolver el problema y entregar un producto funcional requiere de un esfuerzo, basado en la innovación para llevar las ideas a la realidad. Y para realizar esta tesis se han usado disciplinas como la Ingeniería mecánica, Ingeniería electrónica, diseño de producto, diseño CAD y Diseño CAM, manufactura aditiva como la impresión 3D y sustractiva como el corte láser o fresado CNC; convirtiéndose así en un trabajo multidisciplinar que junta distintos conocimientos para crear este proyecto que une los tres tipos de manufactura en una sola. El proyecto se basa en los valores de la eficiencia, y usabilidad del producto que

responde a unas necesidades claras de un usuario y que al final se traduce de una producción bajo costo funcional a largo plazo.

## 2. INTRODUCCION

El aprendizaje de control numérico para los estudiantes de ingeniería mecánica es fundamental para su crecimiento profesional, el hecho de crear un diseño CAD es satisfactorio, pero llevarlo a la vida real es algo gratificante. Crear prototipos abre la posibilidad a mejorar el diseño y entender como este funciona realmente. Este proyecto “Diseño e Implementación de un Sistema de Control CNC Compatible e Intercambiable para Impresión 3D, Corte y Fresado de materiales blandos en aplicaciones didácticas”, contiene parte electrónica y la parte mecánica puesto que es un proyecto interdisciplinario que además de programar y usar tarjetas electrónicas es necesario conocer las necesidades del usuario para realizar un producto funcional lo cual requiere conocimientos en mecánica. Este proyecto se enfocará única y exclusivamente en realizar una controladora electrónica de fácil acoplamiento para una impresora 3D, una máquina de grabado láser y fresado CNC, de propósito general. Por otro lado, esta controladora se construirá en los laboratorios de ingeniería mecánica de la USTA Tunja.

Existe una gran diversidad de métodos disponibles para la impresión 3D, corte, y Fresado de materiales blandos. Sus principales diferencias se encuentran en la forma en la que se usan las diferentes herramientas para realizar distintos de procesos de manufactura aditiva y sustractiva. Algunos métodos como el modelado por deposición fundida (FDM) o el sinterizado selectivo por láser (SLS) utilizan fundido o ablandamiento del material para producir las capas, mientras que otros depositan materiales líquidos que son tratados con diferentes tecnologías. En la siguiente tabla se resumen las principales tecnologías disponibles:

TIPO	TECNOLOGÍAS	MATERIALES
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (PLA, ABS), metales eutécticos, materiales comestibles
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación de metal
Granulado	Sinterizado de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación de metal
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles

Figura 2.1 Tipos, tecnologías y materiales que se pueden aplicar en la impresión. Fuente:

(Centro de análisis y prospectiva gabinete técnico guardia civil, 2016).

Este crecimiento ha permitido que a nivel mundial se inicie una difusión masiva sobre la manufactura aditiva, los principales países de primer mundo se mostraron interesados en invertir en esta línea de investigación, por ejemplo:

- El gobierno chino anunció que invertirá \$6.5 millones de dólares en investigación de impresión 3D (Suárez, 2015).
- La Casa Blanca en los Estados Unidos Americanos hace el anuncio de que se invertirán \$30 millones de dólares para crear el Instituto de Innovación Nacional en Manufactura Aditiva (NAMII, por sus siglas en inglés) (Suárez, 2015).
- El gobierno de Reino Unido invertirá \$14.5 millones de libras esterlinas en proyectos de impresión 3D.

También existen prototipos para cualquier tipo de industria. En Colombia son conocidas experiencias como la de Fabrilab, que fabrica prótesis de mano, brazos piernas o productos para personas con discapacidad visual, de los cuales una parte son donados a niños de escasos recursos. Desde la industria, se encuentran casos como el de Concreto, que desarrolló una impresora 3D de concreto con la tecnología de Siemens para acelerar el tiempo en el que se construyen viviendas de interés social.



Figura 2.2 Prótesis en 3D hechas por Fabrilab. Fuente: (Dinero, 2018).

Estas situaciones muestran un bosquejo de cuán avanzada está esta tecnología y cuánto podría aportar a diversidad de sectores. En Colombia hay muchas compañías en crecimiento de la mano de la impresión 3D.

Precisamente esta tecnología es la base de la empresa Undos3D, ubicada en el norte de Cali. Desde el 2013 ofrecen desde ahí diseño e impresión 3D tanto a empresas como a

personas naturales y en particular, con médicos y casas médicas para la elaboración de biomodelos para planeación quirúrgica.

Por otra parte, Lissy Rodríguez, directora de protolab3d.co, que se ubica en la ciudad de Bogotá Colombia, cuenta que cada vez más aumenta el interés por usar esta tecnología. En esa compañía los pedidos se hacen desde un formulario en internet. Si no se tiene el diseño 3D, se puede cotizar el modelado y un aproximado del servicio porque se debe realizar una simulación en el software de impresión. Esta herramienta da un aproximado de tiempo y gramos, con base a esa información se define el precio (Dinero, 2018).

Lo que se desea realizar con este proyecto es crear una controladora CNC estandarizada para una impresora que utilizará la tecnología de FDM la cual es descrita por el siguiente diagrama

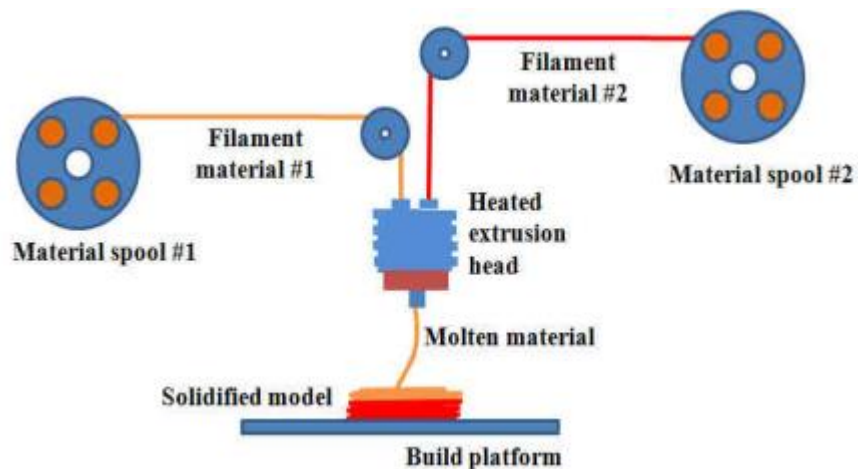


Figura 2.3 Mecanismo de modelado por deposición fundida. Fuente: (Tran, Nguyen, & Nguyen, 2017).

En el campo de la fabricación moderna, asistida por ordenador los sistemas de diseño (CAD), fabricación asistida por ordenador (CAM), la programación y el control numérico

por computadora (CNC) son ampliamente aplicados en los procesos de manufactura sustractiva y aditiva. La estrategia tradicional, inicia a partir del modelo CAD 3D, después la programación CAM para tener un código G para luego hacer el mecanizado o realizar manufactura aditiva, como es el caso de la impresión 3D (Tran, Nguyen, & Nguyen, 2017). El mismo concepto se puede aplicar a la manufactura sustractiva donde cambiando el tipo de herramienta y haciendo modificaciones al software se pueden crear piezas a partir del devaste o sustracción de material, como por ejemplo una fresadora o cortadora de materiales blandos.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Una impresora 3D de uso didáctico, es una herramienta importante de aprendizaje para procesos de fabricación, en muchos casos superior a herramientas comerciales debido a que el usuario puede manipularla con un riesgo menor para él y la máquina. Puede constituirse como una primera aproximación a procesos de fabricación, que genere una experiencia y habilidad que al final genere el aprendizaje y las competencias para la operación de máquinas de tipo industrial.

Contar con una controladora intercambiable facilita la operación (el usuario solo se familiariza con un tipo de controlador, conectores, energización) y facilita el mantenimiento y reparación porque se estandarizan los componentes. Al presentarse una falla, puede intercambiarse el controlador, mientras se desarrolla la reparación, o se puede contar con repuestos estandarizados.

Además, en una estructura mecánica robusta, un controlador flexible, permitiría la realización no solo del proceso de impresión 3D, o impresión 3d con otros materiales, como la arcilla, sino que también la utilización de otras herramientas de fabricación como: corte por láser, grabado, fresado de materiales blandos, entre otros.

El impacto económico se vería reflejado en la disminución de costos de manufactura puesto que la controladora se podrá acoplar y desacoplar fácilmente para realizar testeos en futuras estructuras de control numérico, acelerando de una manera significativa el aprendizaje CNC para los estudiantes de ingeniería mecánica de la universidad Santo Tomás.

A continuación, se mencionan las materias de ingeniería mecánica de los estudiantes de Ingeniería mecánica a los cuales les servirá el proyecto donde se hace uso de la impresión

3D como medio educativo. La siguiente información ha sido recuperada de la revista Ingeniería, “Impresión 3D como Herramienta Didáctica para la Enseñanza de Algunos Conceptos de Ingeniería y Diseño” y ha sido realizado por algunos docentes de ingeniería mecánica de la universidad santo Tomás Tunja.

### **Dibujo 1: geometría descriptiva**

Esta asignatura es de segundo semestre del programa de ingeniería mecánica y contaba para el semestre 2017-1 con 30 estudiantes. Se enseñan temas geometría descriptiva, donde se orienta a los estudiantes cómo representar objetos del espacio tridimensional en superficies bidimensionales haciendo uso de técnicas geométricas.

### **Cálculo Integral: sumas de Riemann y la definición de integral**

Se realizaron modelos en 3D de las sumas de Riemann y se llevaron al aula de clase, donde en lugar de realizar una explicación previa del tema, se entrega el material y se pide a los estudiantes que calculen el área de cada uno de los rectángulos y la suma de estas para los diferentes casos; posteriormente, concluir que sucede con el área individual de cada rectángulo y realizar una comparación entre el área calculada por los estudiantes en cada caso con el área real para, al final, construir la definición del tema.

### **Lógica de Programación para Ingeniería Mecánica: introducción a la algoritmia y nociones de control numérico.**

Esta asignatura hace parte del programa de ingeniería mecánica en su segundo semestre; el objetivo de este contenido es desarrollar la capacidad de usar instrucciones ordenadas para obtener resultados deseados. Se fabrico una pieza en la impresora para sostener un plumón simple que permitió convertir una impresora 3D en un plotter 2D.

Se evaluó la experiencia y para validar los resultados de la propuesta, se realizó una comparación entre los resultados académicos de los contenidos tratados previos a la inclusión de las herramientas didácticas (2016-2), contra los resultados aplicados con la impresión 3D de (2017-1 y 2017-2). Por otra parte, se aplicó un cuestionario-encuesta a los estudiantes que cursaron las asignaturas de Cálculo Integral, Lógica de Programación para Ingeniería Mecánica y Dibujo 1, para medir el grado de aceptación y el impacto de la impresión 3D y el prototipado rápido en el ámbito académico.

El grupo objetivo de los estudios fueron los estudiantes de segundo semestre de la Facultad de Ingeniería Mecánica matriculados en las tres asignaturas: 11 estudiantes de Lógica de Programación, catorce de Dibujo I y 26 de Cálculo Integral, para un total de 51 en el periodo 2017-1. Para el semestre 2017-2 se evaluaron 27 estudiantes de Lógica de Programación, 33 de Dibujo I y 33 de Cálculo Integral, para un total de 93 inscritos. Se diseñó un cuestionario estructurado en diez ítems, con el fin de conocer la percepción y apreciación sobre esta herramienta didáctica.

Esta encuesta fue aplicada en junio de 2017 y en noviembre de 2017, Las preguntas de la encuesta fueron cerradas y se contestaba marcando “sí” o “no”, donde lo esencial era indagar sobre el impacto que había tenido la impresión 3D en el uso académico.

Los resultados fueron los siguientes para Dibujo 1: geometría descriptiva

	2016-2	2017-1	2017-2
Número de estudiantes	30	14	33

Promedio grupal a segundo corte	3.2	3.5	3.8
---------------------------------	-----	-----	-----

Tabla 3.1 Promedio grupal por periodo académico, Dibujo 1. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017).

Los resultados fueron los siguientes para Cálculo Integral: sumas de Riemann y la definición de integral.

	2016-2	2017-1	2017-2
Número de estudiantes	28	26	33
Promedio grupal a segundo corte	3.3	3.4	3.8

Tabla 3.2 Promedio grupal por periodo académico, cálculo Integral. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017).

Los resultados fueron los siguientes para Lógica de Programación para Ingeniería Mecánica: introducción a la algoritmia y nociones de control numérico

	2016-2	2017-1	2017-2
Número de estudiantes	29	26	27
Promedio grupal a segundo corte	3.2	3.8	34.3

Tabla 3.3 Promedio grupal por periodo académico. Lógica de Programación para ingeniería mecánica. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017).

Del cuestionario-encuesta el resultado obtenido de las diez preguntas se compilo en la siguiente figura, donde se puede ver de eje vertical las respuestas dadas en porcentaje y en eje horizontal las diez preguntas del cuestionario.

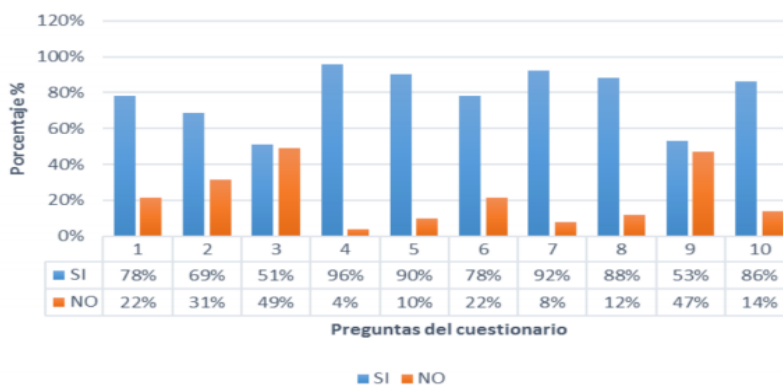


Figura 3.1 Análisis gráfico de los resultados del cuestionario-encuesta. Fuente: (Rúa, Jiménez, Gutiérrez, & Villamizar, 2017).

Los resultados son más que evidentes, el uso de la impresión 3D ha impactado de gran manera el aprendizaje lo los estudiantes de ingeniería mecánica y muestra la pertinencia de este proyecto Edwin Blasnilo Rúa R, Fernando Jiménez D, German Andrés Gutiérrez A & Nelson Iván Villamizar (2017).

La producción de este proyecto no significa un impacto negativo contra el medio ambiente ya que los cortes de aluminio y caucho con discos de carburo y el uso de estaño para uniones de cables no generarían grandes cantidades de gases y elementos tóxicos que puedan generar tal impacto a corto plazo.

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La impresión 3D, el fresado y corte de materiales blandos son técnicas de manufactura que permiten la fabricación personalizada de objetos con geometría compleja. Sin embargo, en los entornos domésticos y académicos, la impresión 3D, el fresado CNC y el corte de plasma se ha limitado a pequeños artículos personales, accesorios y prototipos. Existe una gran dificultad en la fabricación de piezas grandes porque las impresoras 3D, las fresadoras CNC y las cortadoras con plasma del tamaño suficiente son muy caras, por lo que las empresas que se dedican a la manufactura de estas máquinas cobran tarifas que pocos académicos podrían pagar, como es el caso de la COLIDO MEGA de 1005 x 1005 x 1005 mm de tamaño de construcción que cuesta alrededor de 91.381.500 COP (3Dprinting, s.f.) o la Moebyus M3, impresora 3D de gran escala que cuesta 56.483.007 COP, con una área de construcción de 1000 x 1000 x 1000 mm (machines, s.f.), esto solo por mencionar las impresoras 3d, puesto que los ruteadores CNC y cortadoras plasma de pequeñas escala son aún más caras.

El proyecto de la construcción de una impresora 3D planteado por la Facultad de ingeniería mecánica de la USTA Tunja se divide en dos subproyectos: Realización de la estructura de impresión 3D y realización de la controladora electrónica para controlar la estructura con ayuda de motores, driver, tarjetas electrónicas sensores, entre otros. En este caso el proyecto se dedicará a realizar exclusivamente la parte electrónica para controlar la estructura.

Por lo tanto, el trabajo que corresponde a la implementación de un sistema de control electrónico para la impresora 3D también podría ser capaz de ser compatible e

intercambiable con las otras impresoras 3D del laboratorio de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás, permita el uso de otras herramientas de fabricación para manufactura sustractiva como un ruteador CNC o una cortadora.

Como herramienta didáctica es muy útil y dado que es para su uso por estudiantes y docentes de la facultad de ingeniería mecánica de la USTA Tunja, con apenas un conocimiento básico de electrónica, debe facilitarse la operación y mantenimiento de los sistemas electrónicos.

Otro aspecto importante es que las demás impresoras desarrolladas cuentan con un controlador específico y fijo que solo permite un proceso de manufactura, y aunque tiene el potencial de desarrollar otros procesos como corte en 2D, grabado, fresado de materiales blandos, el controlador debe configurarse en cada caso, lo que hace que sea una tarea especializada, compleja y dispendiosa. En este proyecto se busca desarrollar una controladora que pueda realizar las tres tareas: Impresión 3D, fresado y corte de materiales blandos.

Además, cuando se averían las máquinas, se inhabilita la operación de las mismas durante un tiempo prolongado dado la dificultad de generar su reparación por trámites administrativos. Por ende, la propuesta de realizar un sistema modular permitiría que, si un driver se daña o algún otro componente se averíe, este se pueda cambiar fácilmente por uno nuevo sin que tenga que cambiarse todo el sistema. Con lo anterior se puede realizar una analogía, para dar a entender la necesidad en el ámbito académico: Un proceso industrial que funciona con PLCs modulares resulta en que un módulo se ha dañado. En principio solo se debería cambiar el módulo averiado para que el proceso continúe y no se

produzcan pérdidas de producción, que se traduciría en grandes pérdidas de dinero para una empresa.

Además, se ha identificado que el microcontrolador Arduino ubicado cerca al proceso de fabricación presenta sensibilidad al ruido electromagnético que producen los actuadores, motores, máquinas de soldadura y plasma. Un controlador incorporado a la máquina, es susceptible de fallas por estas causas. Por lo tanto, se plantea un sistema de control modular externo a la máquina, que evitaría este problema.

Por otro lado, en los laboratorios de la facultad de ingeniería mecánica existe un nuevo centro de mecanizado, pero esta máquina de manufactura de tipo industrial al ser usadas por estudiantes con baja experiencia pueden generar daños o riesgos para el operario y la máquina, por eso necesitan de una herramienta modular de bajo costo que permita hacer pruebas, donde los daños a una estructura no signifiquen costos millonarios, como sí ocurriría con máquinas CNC industriales que necesitan de un especial cuidado y mucho conocimiento.

El proyecto tiene una delimitación en cuanto a las capacidades que puede cumplir la controladora para la realización de manufactura sustractiva, ya que la realización de corte por plasma en un ambiente de manufactura que puede generar un arco eléctrico que interfiere en las señales de comunicación del sistema de control, por eso si no se puede realizar el corte con plasma se brinda la opción de realizar el corte por láser.

Debido a lo anterior, ¿Cómo se puede hacer una controladora intercambiable para una impresora 3D, fresadora CNC y cortadora de materiales blandos, que además de ello sea

una herramienta didáctica que permita realizar prototipos a gran escala y de bajo costo que satisfaga las necesidades académicas de ingeniería?

## **5. DISEÑO METODOLÓGICO**

Para la realización del proyecto general de investigación, se ha utilizado una metodología de diseño concurrente, con el objetivo de generar una herramienta de aprendizaje didáctico para futuros ingenieros mecánicos, ya que el aprendizaje por control numérico y los modernos sistemas de fabricación son fundamentales para su capacitación. La principal innovación será programar el sistema de control modular con ayuda del software Marlin para poder realizar 3 tipos de manufactura: Imprimir en 3D, Cortar por láser y realizar Fresado. A este sistema de control que llevará todas las partes electrónicas en su interior con ayuda de un gabinete acondicionado se denominará: Sistema de Control Modular (SCM). Este sistema de control modular ofrece una gran ventaja a diferencia de otros sistemas de bajo costo al utilizar componentes de hardware y software libre en combinación con drivers robustos de tipo industrial. Si un componente se avería se puede reemplazar fácilmente reduciendo los costos, a diferencia de la mayoría de opciones comerciales en las cuales el controlador es fijo, porque los drivers y demás sistemas están soldados a la placa o por otra parte, son modulares, pero existen restricciones de licencia, de actualizaciones y de simulación con opciones de pago para utilizarlos en ambientes reales en el software de control.

FASE 1 (2018):

- Verificación por vigilancia tecnológica, para identificar tendencias y vacíos de las diferentes tecnologías de fabricación híbrida disponibles para impresión 3D, fresado y corte en plasma o láser de gran escala ya que como se menciona en una parte de la justificación, el corte por plasma genera un arco eléctrico que puede interferir con los sistemas de comunicación ocasionando mal funcionamiento de los sistemas de control. Es por eso que como alternativa se propone que si en dado caso no se pueda realizar corte por plasma pues se pueda realizar el corte por láser.
- Revisión del estado de la técnica para determinar cuáles son los dispositivos necesarios que irán en el chasis de la controladora
- Generación y análisis de las propuestas de implementación del software de control para imprimir en 3D realizar fresado y cortar por plasma o por láser.
- Comprar los materiales electrónicos de los sistemas de control para seguir la fase 2. Esta etapa es de suma importancia porque es la que más tiempo conlleva, desde que se empieza a realizar las cotizaciones pasando por el financiamiento para la compra de materiales hasta el envío y recepción de los mismos.

#### FASE 2 (2019):

- Ensamble de sistemas electrónicos y de control dentro del sistema modular de control.
- Implementación de los sistemas de control de movimiento.
- Configuración de los sistemas de software, y comunicación para el sistema de control modular.

- Introducir todos los componentes dentro de un chasis acondicionado con un sistema de acoples y ventilación, que tendrá la posibilidad de conectarse con otras máquinas denominado “sistema de control modular”
- Crear un sistema de acoples subyacente del sistema de control modular con el fin de crear una conexión entre la estructura mecánica y el sistema de control modular por medio de extensiones de cables de acople.
- Acondicionar el software de Marlin 1.X para el sistema de control modular de acuerdo a las necesidades de impresión 3D, Fresado y corte.
- Realización de pruebas y calibración.
- Generación de artículos de investigación, ponencias y documentos de socialización de resultados.
- Generación de informes de investigación.

## 6. OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control modular y flexible para una herramienta didáctica de prototipado, que permita 3 procesos de manufactura: Impresión 3D, corte láser, y Fresado de materiales blandos, para su utilización en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás.

### 6.2 Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades planteadas por los usuarios de la máquina y traducirlas en requerimientos técnicos para el desarrollo del sistema de control de la misma.
- Diseñar el módulo de control para realizar manufactura de Impresión 3D, fresado CNC y corte láser de materiales blandos.
- Implementar los sistemas electrónicos en el módulo, con el fin de satisfacer las necesidades de diseño mecánico.
- Programar el software del sistema de control para que se permitan los 3 procesos de manufactura: Impresión 3D, fresado CNC y corte láser de materiales blandos.
- Realizar pruebas de funcionamiento con una estructura mecánica proporcionada por el laboratorio de ingeniería mecánica.
- Generar la documentación, manual de operación y mantenimiento del sistema modular.

## 7. MARCO REFERENCIAL

En el proceso de investigación de referentes nacionales e internacionales hay varios autores y empresas que han hecho proyectos parecidos a éste para satisfacer necesidades de un entorno académico o para satisfacer necesidades de un cliente a nivel empresarial a partir de este tipo de máquinas.

La frontera del conocimiento está en el ámbito de desarrollo de sistemas híbridos de manufactura de más de 4 ejes de libertad en forma de código abierto, pero en muchos artículos científicos se demuestran avances significativos. (Wei-chen, Ching-chih, & Shan-Chen, 2014), en su artículo realizaron un sistema híbrido de creación rápida de prototipos con el uso de modelos de deposición fusionada de bajo costo y cinco ejes para realizar mecanizado, en su estudio integraron estos dos procesos de fabricación para desarrollar un sistema híbrido usando las principales ventajas y desventajas de la impresión 3D y el fresado. El diseño propuesto permite la rotación del eje en la máquina de cinco ejes para cambiar entre mecanizado y FDM demostrando que el su sistema híbrido puede construir objetos FDM sin usar materiales de soporte y producir piezas FDM con metal incrustado para aumentar la rigidez con mejores acabados. También en la creación de sistemas de manufactura híbrida (A.N.M, Murshiduzzamana, & Raisuddin, 2017) diseñaron y crearon una máquina que combina el prototipado rápido y fresado CNC con el desafío de implementar un husillo de corte CNC y una extrusora de calor FDM superando desalineación en el cambio de herramienta con ayuda de sensores infrarrojos, logrando así el beneficio de disminuir los gastos de implementación de una máquina para cada tipo de manufactura.

En su artículo (Shahid, Khan, & Khan, 2019), propusieron una técnica para diseñar y desarrollar una impresora 3D CNC con, cortador de láser y Plotter 2D todo en una máquina. La especialidad de esa máquina es que el usuario no tendrá que cambiar de herramienta cada vez él / ella quiere realizar cualquier otra operación.

En China (Hsieh, 2018), construyó un Cortador láser de 500mw para reemplazar la boquilla y el extrusor de la impresora Prusa i3 de pequeña escala, para cortar papel, usando el microcontrolador Arduino Mega 2560, modificando el software OpenSource Marlin 1.x y adecuándolo a sus necesidades, para hacer las respectivas tareas de manufactura.

En el ámbito empresarial internacional existen impresoras 3D como la Snapmaker, la Atom 2.5 Ex o la Stepcraft 2 que pueden realizar trazado, fresado, corte de vinilo, impresión en 3D, corte con alambre caliente, quema de madera, grabado, grabado láser y sondeo 3D. Estas impresoras de pequeña escala, poseen un software privado que puede hacer todos estos tipos de manufactura tanto aditiva como sustractiva simplemente intercambiando la herramienta del cabezal de la estructura mecánica. (Edupan, 2019)

Por otro lado, referentes locales que hacen investigación de este tipo se encuentra la empresa MakeR que ofrecen distintos tipos de impresoras 3D de pequeña y gran escala con el fin de satisfacer necesidades de manufactura en el sector de la medicina, mecánica automotriz, entre otros. Tiene una línea de impresoras, como lo son: Tairona Prusa, Tairona XL, Tairona XL de Doble Extrusor y su línea de impresora de gran escala: Pegasus Xtreme de 60x60x60 cm. Ellos utilizan software open source Marlin 1.x y usan tarjetas electrónicas como Shileds Ramps y Arduino para realizar sus controladores (somosmakeR, s.f.).

Para finalizar, a nivel regional se han encontrado trabajos a nivel investigativo más enfocados al desarrollo de impresoras 3D, pero no a máquinas híbridas como es el caso de (León & Jersson, 2013) que diseñaron un prototipo de impresora 3D que aplica la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida.

## **8. MARCO HISTÓRICO**

### **8.1 Impresión 3D**

En mayo de 1980, el Dr. Kodama de Japón presentó la primera solicitud de patente para la tecnología Rapid Prototyping. Desafortunadamente, él no presentó la posterior especificación de patente completa antes del Plazo de un año después de la solicitud. Por lo tanto, en 1986, Charles (Chuck) Hull presentó la primera patente. Para aparatos de estereolitografía (SLA). Él era el primero en inventar la máquina SLA en 1983. Después de Obteniendo la patente, pasó a cofundar 3D. Systems Corporation, que es una de las más grandes organizaciones que operan en el mundo de la impresión 3D. hoy. A mediados de los años noventa, la impresión 3D. El sector comenzó a divergir en dos áreas específicas. En primer lugar, estaba la gama alta de impresión 3D, que vio la producción de piezas complejas. Estas aplicaciones incluyen la médica, aeroespacial, joyería y sectores del automóvil. Luego estaba el más bajo fin del mercado, que vio una guerra de precios entre muchos fabricantes de impresoras 3D, destacando mejoras en velocidad, precisión y materiales. En 2007, a 3D Systems se le ocurrió la primera Impresora 3D cuyo precio fue inferior a \$ 10,000. Se puso a la venta la primera impresora 3D comercial. En enero de 2009. Se basó en el RepRap. Concepto, y llegó en forma de kit. Makerbot Industries

también desarrolló impresoras comerciales en abril. del mismo año. 2013 vio la adquisición de Stratasys Makerbot. 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 hay una variedad de diferentes tipos de materiales. disponible para su elección. (Sameer & Edna, 2018). El primer paso en la impresión 3D es diseñar el modelo digital 3D utilizando un programa CAD o escaneo. El objeto con un escáner 3D. El modelo será luego "cortado" en capas y convertido en un archivo legible por impresora. El material de impresión se agrega una capa a la vez. Diferentes materiales son adecuados para diferentes tecnologías de impresión. Algunas impresoras 3D procesan materiales en polvo que utilizan una fuente de luz. para fusionar las capas del polvo juntos para hacer la forma deseada. Otros procesan resina polimérica. En las siguientes líneas de tiempo, se señalan algunos de los acontecimientos más destacados:

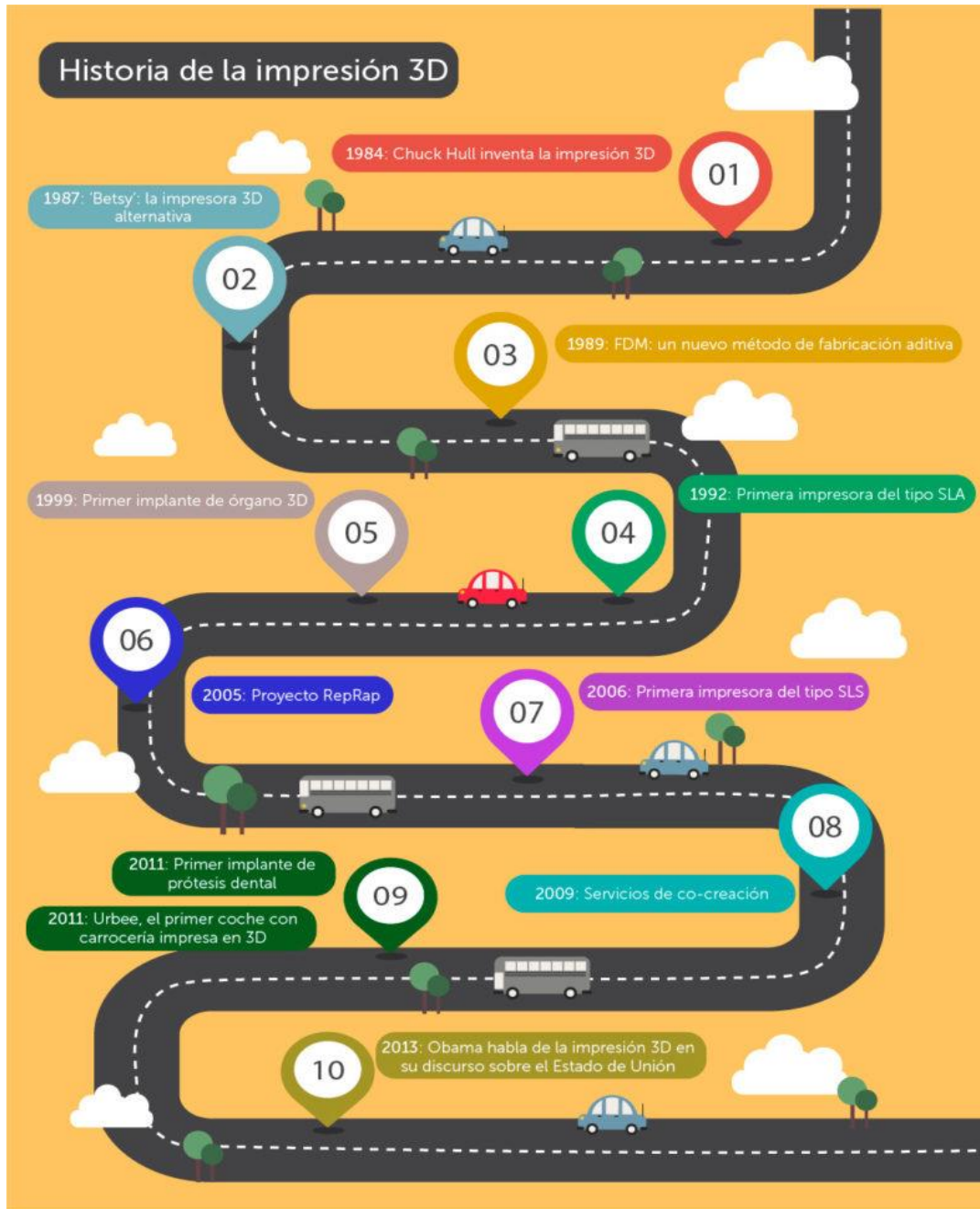


Figura 8.1 Evolución de la impresión 3D. Fuente: (3DHUB, s.f.).

## 8.2 Fresado y corte láser de materiales blandos

En el ámbito del fresado y corte de materiales blandos hay una creciente demanda de computadora numérica para aplicaciones de control (CNC) en industrias pequeñas,

instituciones educativas y los aficionados. Existen varios fabricantes comerciales de máquinas CNC como M / s Fanuc Ltd y M / s SINUMERIK pero no son asequibles por el usuario mencionado anteriormente comunidad. El alto costo de la máquina puede estar asociado a el uso de controladores integrados diseñados a medida y componentes de la máquina. En los últimos años ha habido un creciente interés por realizar una máquina de bajo costo.

Existe un software CNC de código abierto en línea, pero, la mayoría de estos no son fácilmente personalizables ya que el código fuente de este software es muy difícil de entender, y está desarrollado principalmente en Visual Basic o Java. La gran desventaja de la actual fuente abierta existente es la integración del hardware con el software, también los generadores de señales, circuitos de controladores y la configuración de la máquina. Y la disponibilidad de ciertos componentes está restringida a solo unos pocos países, lo que dificulta la importación. Además, abundante el software está diseñado solo para dimensiones específicas de la máquina haciendo que sea difícil adoptarlos para uso personal (Shivakumar, Sravan, & Selvajyothi, 2016).

Sin embargo, realizar una máquina para imprimir en 3D, realizar fresado y corte de materiales blandos es asequible gracias al software de código abierto de Marlín ya que con una serie de modificaciones y programación se podrá crear una controladora multifuncional para realizar estos tipos de manufactura sustractiva.

## **9. DISEÑO SISTEMA DE CONTROL MODULAR**

### **9.1 PARAMETROS DE DISEÑO**

Se utilizó la técnica “lluvia de ideas” para iniciar el proceso de diseño de la estructura del controlador. Se procedió a identificar las necesidades o requerimientos fundamentales del diseño las cuales fueron las siguientes: Costo, Flexibilidad, facilidad de instalación, operación y mantenimiento, fiabilidad, ergonomía y estética.

Se realizaron diseños preliminares, se registraron las ideas, se socializaron y clasificaron. Después de una discusión se postularon 3 bocetos más opcionados para la construcción del controlador.

El primero consistía en realizar instalar todo el hardware (tarjetas electrónicas, acoples, entre otros) sobre un tablero de aluminio acoplado a la estructura de la máquina, cumpliendo en mayor medida la reducción de costos.

El segundo consistía en alojar todos los componentes en un gabinete de aluminio usando cableado especial con tornillería y materiales industriales robustos, además de que tuviera la facilidad de evacuar el exceso de calor dentro del gabinete cerrado conservando la vida útil de los materiales. La única desventaja era su costo elevado y un diseño menos sustentable.

El tercer diseño que se propuso retomó ideas del segundo diseño, mejorando la flexibilidad del controlador al incorporar elementos de conexión estandarizados que permitan el intercambio de herramientas de fabricación para los distintos tipos de procesos de manufactura, o también el intercambio de toda la estructura mecánica por otras disponibles o en proceso de desarrollo. Se decidió usar una caja de aluminio galvanizado fuerte, con

un volumen adecuado para todo el hardware que se deseaba introducir con ayuda de un tablero de aluminio de facilita el ensamblaje con el gabinete, además de ello se deseaba poder realizar perforaciones para introducir algún tipo de acoples para que facilitara la ergonomía y facilidad de operación.

Para la selección del diseño definitivo, se realizó una matriz de evaluación donde se asignaron calificaciones a los requerimientos técnicos dependiendo de su cumplimiento e importancia para la ejecución y construcción de la estructura del controlador. La escala de evaluación fue de cero (0) a diez (10), donde diez es el valor máximo que se le puede dar al criterio y 0 el mínimo. Por último, se evaluaron cada uno de los diseños preliminares, como se muestra en la siguiente tabla.

<b>Evaluación de necesidades y requerimientos de diseño</b>									
<b>Diseño preliminar</b>	<b>Costo (20%)</b>	<b>flexibilidad (20%)</b>	<b>Instalación (15%)</b>	<b>Fiabilidad (10%)</b>	<b>Operación (15%)</b>	<b>Ergonomía (5%)</b>	<b>Estética (5%)</b>	<b>Mantenimiento (10%)</b>	<b>Total</b>
1	10	8	5	5	5	7	5	5	<b>6,7</b>
2	7	9	8	7	8	8	8	7	<b>7,8</b>
3	8	10	9	8	9	9	9	9	<b>8,9</b>

Tabla 9.1 Evaluación de necesidades y requerimientos de diseño. Fuente: Autor.

El diseño final escogido fue el tercero ya que cumplía en su mayoría de puntos con todos los parámetros mencionados al inicio en lo que se refiere a un costo bajo de implementación, flexibilidad suficiente, una fácil instalación, una gran fiabilidad una gran estética y fácil mantenimiento.

Para realizar el controlador y sus pruebas de funcionamiento, el laboratorio de mecánica cuenta con la siguiente estructura CNC.



Figura 9.1 Estructura CNC de los laboratorios de Ingeniería Mecánica a la que se le aplicó el control. Fuente: Autor.

Esta estructura cuenta con un área efectiva de trabajo de 20 x 30 x 20 cm y como se puede observar en la figura anterior es una estructura con perfiles de aluminio que tiene 3 motores, uno para cada eje X, Y, Z, se controla con un sistema electrónico RAMPS ensamblado en un tablero de madera que solo permite realizar impresión 3D. Para que esta estructura sea capaz de realizar los 3 tipos de manufactura es necesario que tenga un alto nivel de rigidez en la misma ya que si bien la impresión 3D y el corte o grabado láser no necesitan tales características de rigidez, para realizar el fresado CNC si es necesario porque el spindle, o cualquier herramienta de desbaste retiran grandes cantidades de material por segundo.

Los elementos seleccionados en el diseño definitivo para cada uno de los sistemas son los siguientes.

## **9.2 ANALISIS Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS**

### **9.2.1 Motor paso a paso.**

Mover una máquina de impresión a gran escala requiere de una estructura rígida y motores eléctricos con la suficiente potencia y precisión. Si además se desea realizar el proceso de manufactura de fresado de materiales blandos, es necesario incrementar la potencia de los motores ya que se desarrollan mayores fuerzas durante el proceso. Se seleccionaron motores paso a paso NEMA 23 a 1.8° los cuales tiene un alto torque de 425 Oz.in y tienen la suficiente fuerza para mover cada riel a través de las guías lineales de acero y aluminio sin perder pasos.

Un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte 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.

Estos motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de 1.8°, Es por eso que ese tipo de motores son muy utilizados, ya que pueden moverse a deseo del usuario según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador.

Estos motores poseen la característica de quedar enclavados en una posición si una o más de sus bobinas está energizada o bien total mente libres de corriente. Los motores nema 23 que se usaran para realizar en sistema de control modular son de la siguiente referencia.



Figura 9.2 Motor paso a paso NEMA 23 modelo 23HS9430B. Fuente: Autor.

Sus características son las siguientes.

Tipo de motor	Bipolar
Ángulo de motor	1.8°
Par de retención (Holding Torque)	3.0 Nm (425 oz/in) (30.60 Kg/cm)
Corriente nominal / fase	4.2A
Resistencia de fase	0.9ohms
Tensión recomendada	3.78V
Inductancia	3.8mH ± 20%(1KHz)

Tabla 9.2 Características eléctricas motor NEMA 23. Fuente: (Stepperonline, s.f.).

Tamaño del marco	57 x 57mm
Longitud	113mm
Diámetro del eje	Φ10mm
Longitud del eje	24mm
Longitud de corte en D	20mm
Número de derivaciones	4
Longitud del cable	400mm
Peso	1.8kg

Tabla 9.3 Especificaciones físicas motor NEMA 23. Fuente: (Stepperonline, s.f.).

Este motor paso a paso bipolar Nema 23 es el más popular, con el ángulo del paso de 1.8° o (200 pasos / revolución). Cada fase toma 4.2A, lo que permite un par de retención de 3.0Nm (425oz.in). El ángulo de paso es de 1.8° ya que así es mencionado en la tabla anterior de características eléctricas de la página stepperonline, aunque por otro lado el parámetro de los pasos por revolución del motor no sale en la tabla anterior, más adelante en el capítulo 12.4 se enseña cómo se halló ese parámetro.

### **9.2.2 Drivers para motores**

Para controlar los motores NEMA 23 es necesario escoger los drivers más idóneos, en cuanto a su corriente, resolución de micro pasos y lo más importante es que sean de alta calidad para funcionar en el largo plazo. Se evaluaron varias alternativas por un lado los drivers A4988 que son una referencia comercial de bajo costo los cuales son muy usados para impresoras 3D domésticas y por otro lado los drivers DM542A que poseen características mucho más interesantes como se verá a continuación.

### **9.2.3 Driver A4988**

El A4988 es un completo controlador de motor de micro pasos con traductor incorporado para una fácil operación. Está diseñado para funcionar Motores paso a paso bipolares en pleno, medio, cuarto, octavo y modos de dieciseisavos pasos, con una capacidad de unidad de salida de hasta 35 V y  $\pm 2$  A. El A4988 incluye una corriente fija de apagado.

Regulador que tiene la capacidad de operar de forma lenta o mixta. Simplemente introduciendo un clip en las unidades de entrada STEP, el motor irá a un micro paso. No hay tablas de secuencia de fases, controladores de alta frecuencia, o complejo de interfaz-programa.



Figura 9.3 Driver a4988 vista posterior. Fuente: Autor.

Characterisitic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	Vbb		35	V
Output Current	Iout		+ - 2	A
Logic Input Voltage	Vin		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	Vdd		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	Vsense		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	Vref		5.5	V
Operating Ambient Temperature	Ta	Range S	-20 to 85	°C
Maximun Junction	Tj(max)		150	°C
Storege Temperature	Tstg		-55 to 150	°C

Tabla 9.4 Tazas máximas de desempeño driver A4988. Fuente: (Allegro, s.f.).

#### 9.2.4 Drivers DM542A

Es un driver de tipo industrial que sirve para controlar motores paso a paso de todo tipo con un diámetro exterior de 42 mm a 86 mm y una corriente de fase inferior a 4.0A. Este circuito que adopta es similar al circuito de servo control que permite que el motor funcione suavemente casi sin ruidos ni vibraciones. El par de torsión cuando se ejecuta DM542A a alta velocidad también es significativamente más alto que el otro controlador de dos fases, lo que, es más, la precisión de posicionamiento también es mayor.



Figura 9.4 Driver industrial DM542A. Fuente: Autor.

Como se observa en la figura anterior este driver en su parte izquierda posee una tabla la cual muestra a que corriente de salida se necesita trabajar y los pulsos por revolución que indican la precisión del motor. También poseen en la parte derecha el conexionado de las bobinas del motor paso a paso, sus pines de control, su alimentación y los interruptores que, dependiendo de su estado, alto o bajo configuran la corriente y los pasos del driver.

Voltaje de entrada	18-50 VDC
Corriente de entrada	<4 A
Corriente de salida	1.0 A ~ 4.2 A
Consumo	Consumo:80 W; seguro interno: 6 A
Temperatura	Temperatura de Trabajo: -10 ~ 45°C Temperatura Media: -40°C ~ 70°C
Humedad	Sin condensación, sin gotas de agua
Gas	Se prohíbe los gases combustibles y suciedad conductiva
Peso	200 g

Tabla 9.5 Especificaciones eléctricas driver DM542A. Fuente: (Longsmotor, s.f.).

En conclusión, para controlar los motores NEMA 23 escogidos son necesarios unos drivers que puedan soportar la elevada corriente del motor y que además de ello tengan la libertad de manejar diferentes resoluciones con sus micro pasos. Por eso los drivers A4988 no sirven para esta aplicación a comparación de los drivers de tipo industrial DM542A que cumplen las características de manejar corriente de fase máxima de 4.2 A, poseen una gran resolución (25000 pasos por revolución) y son de alta calidad.

### 9.2.5 Arduino Mega y Shield RAMPS 1.4

Para controlar todo el hardware se hizo uso del microcontrolador Arduino MEGA con la Shield RAMPS 1.4 que es muy usada en el ámbito de la impresión 3D pero que también puede usarse para realizar manufactura sustractiva como el corte o grabado láser y el fresado CNC, bajo unas modificaciones en el software control Marlin, del cual se hablará del mismo y sus respectivas configuraciones en otro capítulo.

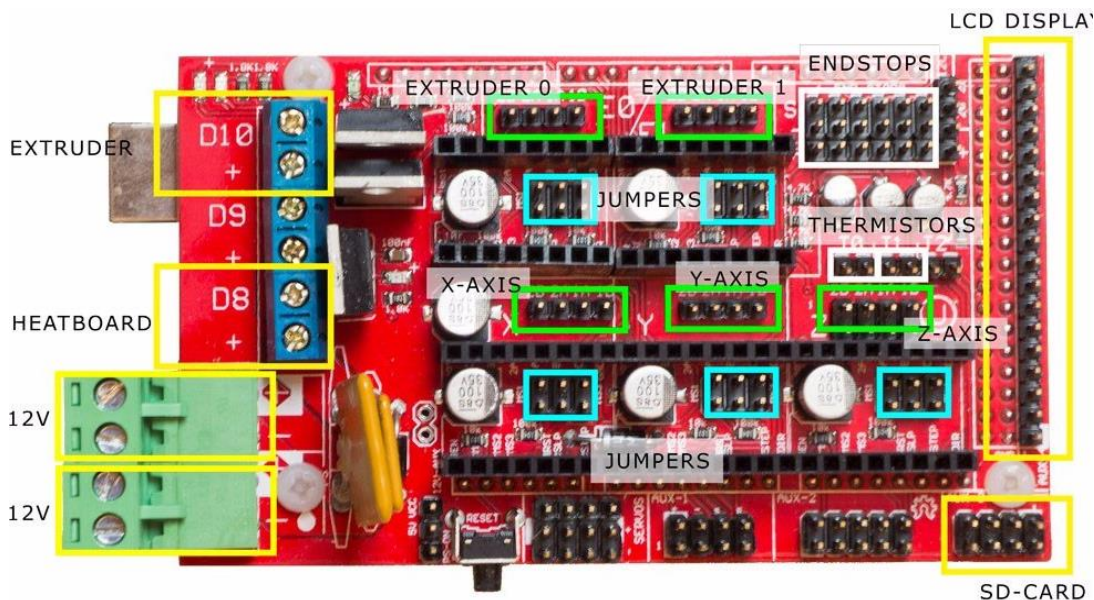


Figura 9.5 Diagrama de conexión de los dispositivos de la impresora 3D por FDM.

Fuente: (Shahid, Khan, & Khan, 2019).

La tarjeta electrónica principal consiste en un Arduino MEGA, acoplado a una shield RAMPS específica para control de impresoras 3D (Shahid, Khan, & Khan, 2019), adaptada para funcionar con los drivers de potencia seleccionados, que además puede brindar salidas de voltaje para funciones adicionales de potencia como: calentar el material del extrusor, calentar la cama caliente, conectar LCDs, ventiladores.

El Arduino Mega 2560 es un microcontrolador basado en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada / salida digital (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una

conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio.  
(descubrearduino, s.f.)

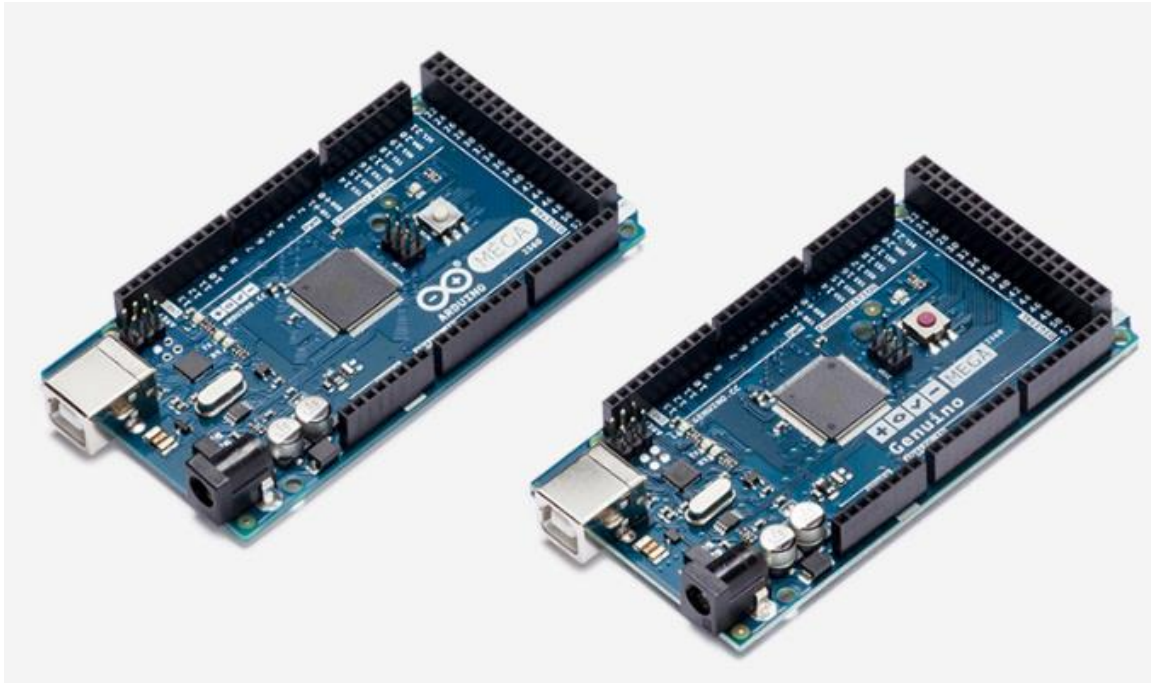


Figura 9.6 Arduino Mega 2560. Fuente: (Arduino, s.f.).

### 9.2.6 Extrusor para impresión 3D

Para realizar manufactura de impresión 3D es necesario usar un extrusor. Las partes que conforman un extrusor son las que se pueden ver en la siguiente imagen

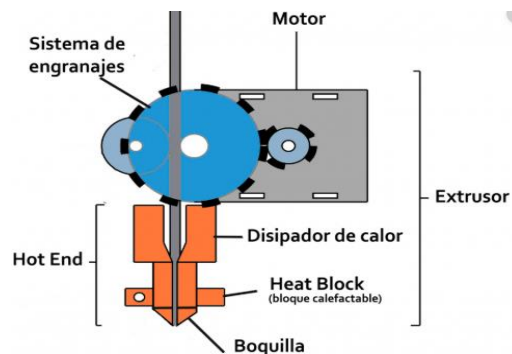


Figura 9.7 Ilustración de un extrusor. Fuente: (toninadal.frax3dr, s.f.).

El extrusor que se usó es uno tipo MK8 que tenían los laboratorios de ingeniería mecánica el cual luce así:



Figura 9.8 Extrusor Mk8. Fuente: (toninadal.frax3dr, s.f.).

Los sensores e instrumentos que componen el extrusor como nozzle, ventilador, termistor se conectan a la shield RAMPS.

Las características técnicas de este tipo de Extrusor son las siguientes:

#### CARACTERÍSTICAS

- Diámetro de la boquilla: 0.4mm
- Tipo de motor: Nema 17
- Diámetro del filamento: 1.75mm
- Material de impresión: PLA y ABS
- Termistor: 100K NTC
- Voltaje operación del ventilador: 12V
- Velocidad del eje de movimiento: 400mm/s
- Temperatura de funcionamiento: 190° – 230°

- Dimensiones del extrusor: 7.7cm x 4.2cm

En este caso la boquilla del nozzle tiene aproximadamente 1 mm de diámetro y no 0.4 mm.

### 9.2.7 Grabado Láser

Para realizar manufactura sustractiva de grabado láser la universidad cuenta con uno de CO2 de 6W de la marca OPT Lasers el cual es el siguiente:



Figura 9.9 Laser Driver Opt-Lasers. Fuente: (Opt Lasers, s.f.).

Sus características técnicas son las siguientes:

## Technical Data

Wavelength	445 nm
Output optical power at 20°C	2.5 W / 5 W
Modulation	TTL or analog
Modulation frequency	Max 100 kHz
Input voltage	6 - 12 V
Modulation voltage	0 - 5 V
Focus distance	Adjustable
Wires	High-quality cable

Figura 9.10 Datos técnicos OPT lasers. Fuente: (Opt Lasers, s.f.).

### 9.2.8 Herramienta de fresado (Spindle)

Para realizar el fresado se pensó en varias herramientas para realizarlo, una de ellas era un mototool que trabaja en AC, pero no era la mejor opción, ya que al trabajar en distintos materiales no producía el suficiente torque para cortar el material como la madera. También existían otro tipo de soluciones, como un taladro o una pulidora de altas revoluciones, pero la gran desventaja de ser muy ruidosos y esto en ambientes de manufactura es lo peor, por eso se desechó esa opción. Para solventar ese problema se usó un spindle de 500 W de la línea ER11, es ideal porque a diferencia de herramientas de corriente alterna como taladros

o mototools este spindle ofrece ventajas más relevantes en todo sentido como lo son: Trabaja en DC, tiene un ruido casi nulo, ideal para ambientes de manufactura, posee una alta gama de collets para adaptar brocas de todo tipo de grosor para diferentes materiales, velocidad y torque suficiente para trabajar materiales fuertes como madera o aluminio además de poseer un control manual de velocidad de 0 a 12000 rpm.



Figura 9.11 Spindle ER11 500W. Fuente: (Amazon, s.f.)

En la figura anterior se ve todo el kit usado para operar el spindle, como lo es su fuente de 24 V con su potenciómetro para variar la velocidad, los collects para adaptar distintos tipos de herramientas y un soporte para anclar el spindle a una base de mecanizado

La tabla de características es la siguiente:

Tensión de funcionamiento	100VDC
Potencia:	500 W
Velocidad	Hasta 12.000 rev/min
Par de torsión	5000 G/CM

Resistencia al aislamiento	:> 2 megohms
Diámetro	52mm
Husillo de alta precisión	0,01-0,03mm
Fuente de alimentación:	
1. Entrada	AC220V/110V±10%
2. Frecuencia	50/60Hz
3. corriente	4A

Tabla 9.6 Características Spindle ER11. Fuente: (Vistrónica, s.f.).

### 10. SOFTWARE DE CONTROL Marlin 1.x

Marlin es un firmware de código abierto para la familia RepRap de replicadores de prototipos rápidos, popularmente conocido como "impresoras 3D". Se derivó de Sprinter y GRBL, y se convirtió en un proyecto de código abierto independiente el 12 de agosto de 2011 con su versión Github. Marlin está bajo la licencia GPLv3 y es gratuita para todas las aplicaciones.

Desde el principio, Marlin fue creada por y para los entusiastas de RepRap para ser un controlador de impresora sencillo, confiable y adaptable que "simplemente funciona". Como prueba de su calidad, Marlin es utilizada por varias impresoras 3D comerciales reconocidas. Ultimaker, Printrbot, AlephObjects (Lulzbot) y Prusa Research son solo algunos de los proveedores que envían una variante de Marlin.

Como producto de la comunidad, Marlin pretende adaptarse a la mayor cantidad posible de tarjetas electrónicas y configuraciones. Para que sea configurable, personalizable,

extensible y económico para los aficionados y vendedores por igual. Una compilación de Marlin puede ser muy pequeña, para usar en una impresora con solo un hardware modesto como es el caso de la shield Ramps junto con el microcontrolador Arduino. Las características se habilitan según sea necesario para adaptar Marlin a los componentes agregados. (marlinfw, s.f.).

### **10.1 Como funciona Marlin**

Marlin Firmware se ejecuta en la placa principal de la impresora 3D, gestionando todas las actividades en tiempo real de la máquina. 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 3D.

Marlin implementa un proceso de fabricación aditivo denominado Modelado por deposición fundida (FDM), también conocido como Fabricación de filamentos fundidos (FFF). En este proceso, un motor empuja el filamento de plástico a través de una boquilla caliente que funde y extruye el material mientras la boquilla se mueve bajo el control de la computadora. Después de varios minutos (o muchas horas) de colocar finas capas de plástico, el resultado es un objeto físico.

El lenguaje de control para Marlin es un derivado del código G, los comandos de código G le dicen a la máquina que haga cosas simples como “configurar el calentador 1 a 180 ” o “moverse a XY a velocidad F.” Para imprimir un modelo con Marlin, se debe convertir a código G usando un programa llamado un "slicer"(rebanador).

A medida que Marlin recibe comandos de movimiento, los agrega a una cola de movimiento que se ejecutará en el orden recibido. La "interrupción por pasos" procesa la

cola, convirtiendo los movimientos lineales en impulsos electrónicos de tiempo preciso en los motores paso a paso. Incluso a velocidades modestas, Marlin necesita generar miles de pulsos paso a paso cada segundo. (por ejemplo,  $80 \text{ pasos por mm} * 50 \text{ mm} / \text{s} = 4000 \text{ pasos por segundo}$ ) Dado que la velocidad de la CPU limita la velocidad de movimiento de la máquina, siempre se está buscando nuevas formas de optimizar la interrupción por pasos.

Los calentadores y los sensores se administran en una segunda interrupción que se ejecuta a una velocidad mucho más lenta, mientras que el bucle principal maneja el procesamiento de comandos, la actualización de la pantalla y los eventos del controlador. Por razones de seguridad, Marlin se reiniciará realmente si la CPU se sobrecarga demasiado para leer los sensores. (João Brázio, s.f.)

Para la creación en principio se tiene que tener en cuenta los criterios definidos por el cliente o el usuario que se desea obtener un software para realizar 3 tipos de manufactura: Impresión 3D, Grabado láser y fresado CNC.

## **11. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL MODULAR**

En la siguiente imagen se ve el esquema del proyecto donde se muestra el sistema de control modular CNC que va interconectado con un sistema subyacente por medio de acoples para motores, fines de curso de la máquina, resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend, comunicación PC/ Sistema de control y pwm del láser. El control del spindle es independiente ya que como se vio en el capítulo 10.6 este viene con un kit donde la fuente alimenta el spindle y da la salida de pwm controlada por un potenciómetro.

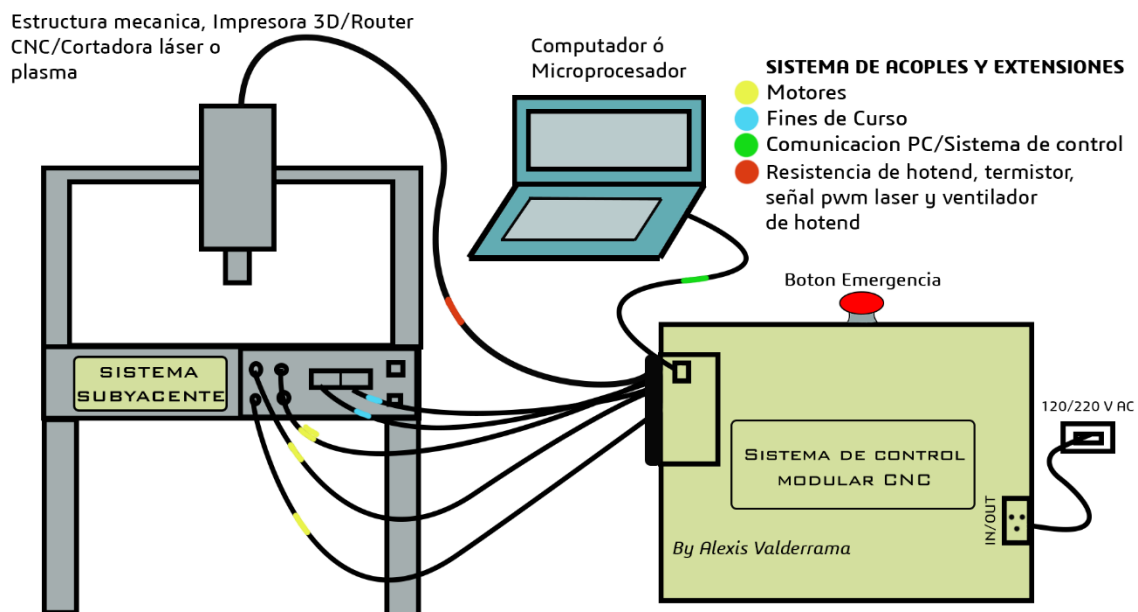


Figura 11.1 Esquema del acoples y extensiones del sistema de control modular principal y su sistema subyacente. Fuente: Autor

Al haber escogido los materiales en el diseño ahora ya se puede realizar la implementación usando la shield RAMPS y conectando todos los componentes en ella. Todo esto se ensambló en un gabinete que contiene todos los elementos de hardware en su interior y sus acoples de fácil conexión.

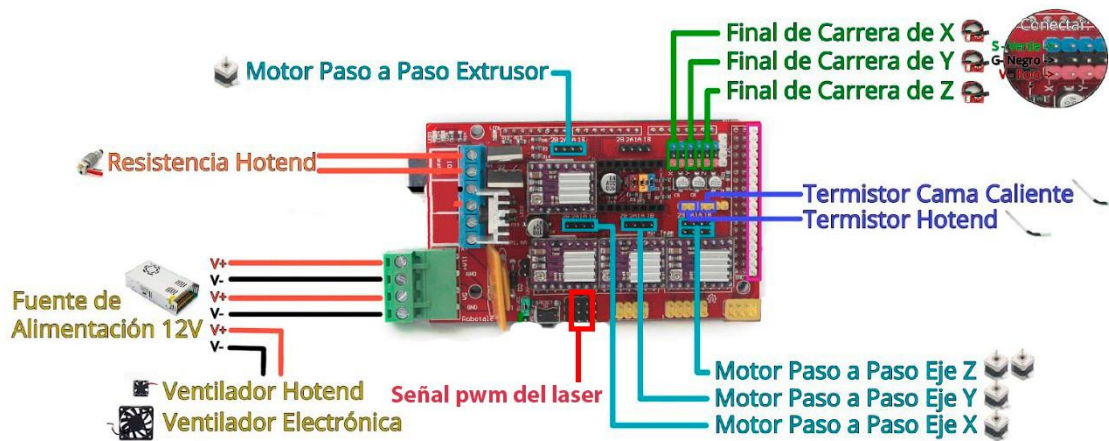


Figura 11.2 Diagrama de conexión de los dispositivos de la impresora 3D por FDM.

Fuente: Autor.

### 11.1 Gabinete

Se hizo uso de un chasis donde se adecuaron todos los componentes electrónicos, y acoples para motores, fines de curso, termistores, ventilador de hotend, comunicación serial y control pwm del láser. Se escogió un chasis de lámina de acero para aplicaciones eléctricas de calibre 22 de 50 \* 60 \* 20 cm, el propósito de esta selección, es brindar a los componentes del controlador una protección frente a agentes externos, como humedad, polvo, viruta y ruido electromagnético que pueda afectar a los componentes, debido a que con anterioridad se han presentado problemas de este tipo en las máquinas que tienen los componentes electrónicos expuestos. Se incorporó una refrigeración activa a través de ventiladores, puesto que los drivers para controlar los motores producen mucho calor y es necesario expulsarlo para no averiar los demás componentes electrónicos internos.



Figura 11.3 Vista frontal y lateral del chasis donde irán almacenados todos los componentes. Fuente: Autor.

En la figura anterior se puede notar que se usaron 2 ventiladores para la refrigeración interna del chasis con el fin de que el calor sea expulsado del interior hacia afuera.

También hay 2 salidas de voltaje alterno, con el fin de alimentar las fuentes DC internas y la otra para facilitar la conexión de una herramienta de corte AC directamente si así se desea en un futuro.

## 11.2 Sistema Subyacente

Se realizó un sistema subyacente para la conexión de los acoples que vienen del sistema principal. Este sistema va acoplado a la máquina CNC que se desea controlar y contiene la

conexión de cables a los respectivos, motores y fines de curso acondicionados en la estructura mecánica.



Figura 11.4 Sistema subyacente de acoples. Fuente: Autor.

Hay 6 acoples para motores y fines de curso, que se conectan con extensiones de cables y también hay una entrada o salida de voltaje de 120 V AC para conectar un mototool.

### 11.3 Implementación de drivers DM542A.

Estos drivers se conectaron a la shield RAMPS de la siguiente manera:

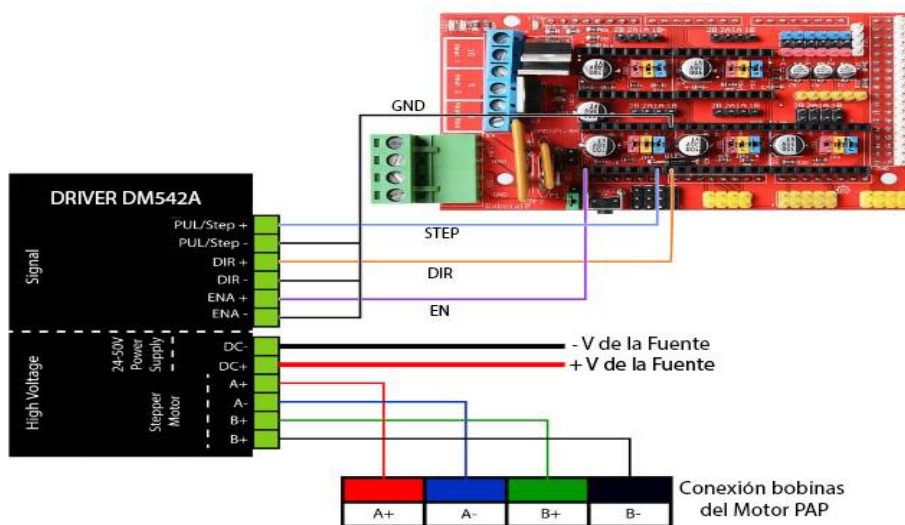


Figura 11.5 Conexión del driver DM542A a la RAMPS. Fuente: Autor.

Como se puede denotar en la conexión de los drivers a la placa hay unos pines hembra, los cuales están ahí porque esta placa en principio usa los drivers A4988.

Este tipo de driver tiene muchas cosas en común con otro tipo de drivers industriales del mercado, en diferentes modelos lo que suele variar es la potencia, voltaje de entrada y la corriente de salida, por lo demás son muy similares. En el lateral de estos drivers se encuentran unos interruptores para la configuración de los micro pasos (pulse/rev) y potencia de salida, simplemente se encienden o se apagan los interruptores de acuerdo con la configuración deseada teniendo en cuenta la tabla frontal que tiene el driver como se ve en la figura 10.

La configuración se hizo de la siguiente manera.

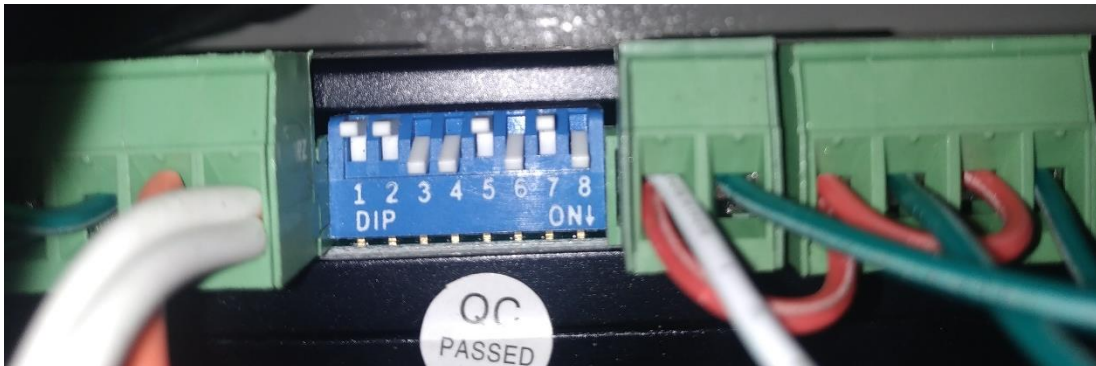


Figura 11.6 Configuración escogida de los drivers DM542A. Fuente Autor.

Se configuraron los drivers DM542A con una corriente de 1.46 A de salida y 8 micro pasos (1600 pulse/rev) para cada uno de los 3 motores que se implementaron en todos los ejes. Se hizo de esta manera porque al aumentar la corriente de salida de los drivers, los motores comienzan a calentarse, llegando alrededor de 80°C si se trabaja a una corriente de más de 4 A y eso ya no es conveniente para la vida útil del motor, ya que su rango de temperatura de trabajo debe estar entre -40°C ~ 70°C a máxima corriente.

## 11.4 Fuentes de alimentación

Se implementaron tres fuentes de alimentación para el sistema de control modular. Dos de 360W para suministrar suficiente potencia a los drivers y motores, y una fuente de 120 W para la alimentación de la RAMPS, los dispositivos conectados a la misma y ventiladores de refrigeración del chasis o gabinete.

### 11.4.1 Fuentes para drivers y motores



Figura 11.7 Fuente de alimentación de 360W. Fuente: Autor.

Esta fuente de alimentación posee una salida única entre 35 V y 36 V con una corriente de salida máxima de 10 A, la cual servirá para alimentar los driver y motores, ya que en la hoja de datos del driver dice que soporta un valor de voltaje de entrada entre 18 VDC y 36 VDC. Se hizo uso de 2 fuentes porque los drivers fueron configurados con una salida de

corriente de 2.37 A y si son 6 drivers entonces se necesitan 14.22 A de salida para los motores y con una sola fuente no es posible. Por ende, se asignó a cada fuente de 360 W 3 drivers quedando así en 7.21 A para cada una.

#### **11.4.2 Fuente para RAMPS y ventiladores**

En principio se realizó un circuito de acondicionamiento de voltaje para bajar la tensión de una fuente de 36 V a 12 V con el fin de alimentar la RAMPS y los ventiladores y obtener una alta corriente de salida, para ello se decidió realizar un circuito de bypass transistorizado. Esto se hizo porque en el momento solo se tenían fuentes de 36 V disponibles.

El concepto de bypass transistorizado está basado en un transistor PNP que se coloca junto al LM317 o cualquier otro regulador de voltaje. Emisor y la base se colocan antes del regulador y el colector se conecta después.

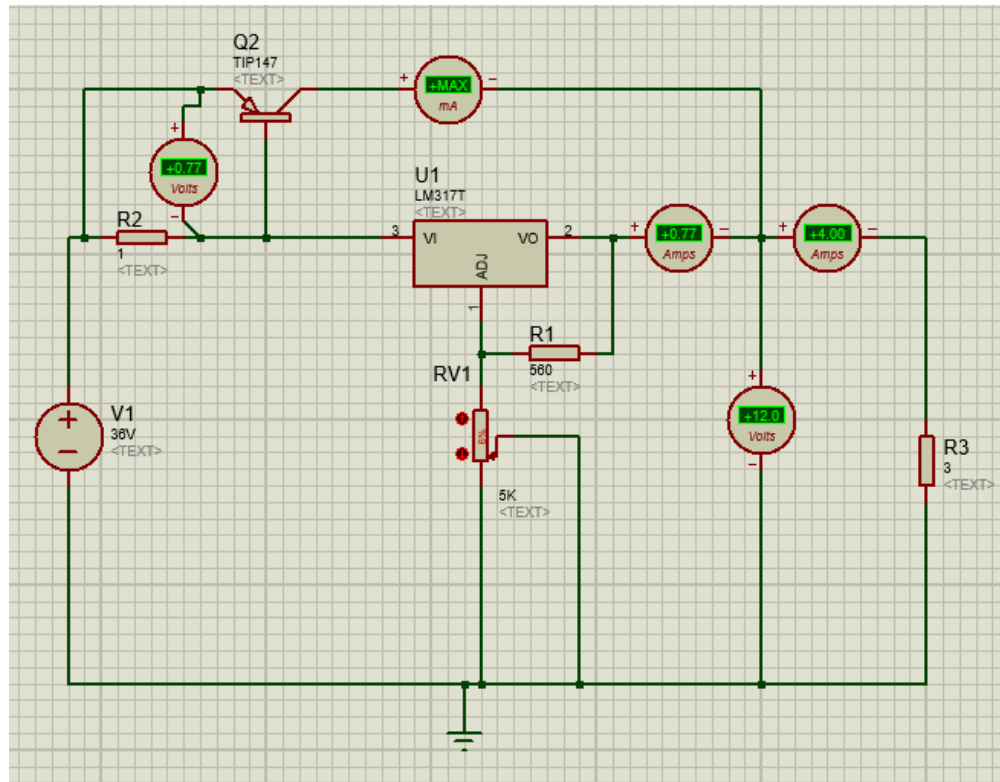


Figura 11.8 Simulación del circuito de bypass con un transistor PNP. Fuente: Autor.

En la simulación se puede ver que el circuito funciona. Esto se debe a que según las características del Tip147 debe existir una diferencia de potencial de al menos 0.7 V entre la base el emisor para que el transistor entre en conducción. Para ello se escogió una resistencia de 1  $\Omega$  de 10 W de la siguiente manera:

$$v = IR$$

$$0.7 = IR$$

$$R = \frac{0.7}{I}$$

Se partió por escoger una corriente de 700 mA

$$R = \frac{0.7}{0.7}$$

$$R = 1 \Omega$$

Entonces  $1 \Omega$  es la mejor resistencia para activar el transistor y hacer que opere con una corriente de salida de alrededor 4 A.

Posteriormente se realizó el diseño en EAGLE y se realizó su PCB quedando de la siguiente manera:

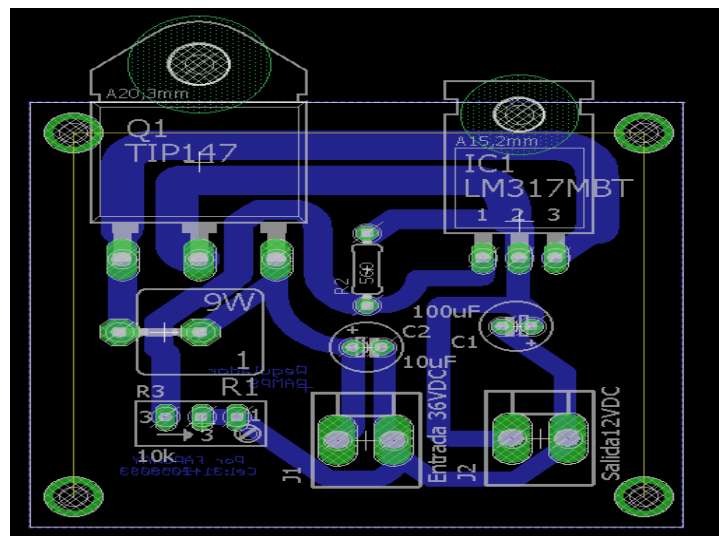


Figura 11.9 Diseño PCB regulador con bypass transistorizado. Fuente: Autor.



Figura 11.10 PCB del bypass transistorizado. Fuente: Autor.

En la figura anterior se ven 2 circuitos independientes ya que uno de ellos alimentaría la RAMPS y el otro los ventiladores del gabinete.

El circuito funcionó bien en protoboard y en su PCB, pero era demasiado ineficiente ya que su energía se perdía en forma de calor (por eso su gran disipador), ocasionando que después de un uso continuo de 10 minutos este se terminara quemando por el exceso de calor. Se desechó esta idea y se prefirió usar fuentes de alimentación de 12 V que resistieran las largas jornadas de trabajo sin ningún fallo.

Para ello se usó una fuente de 12 V - 20 A para alimentar la RAMPS y los dos ventiladores de refrigeración. El hotend a máxima temperatura necesita 5 A de la RAMPS y los ventiladores 170 mA dando como resultado 5.34 A. Su conexión es igual a la fuente de 36 V.

#### **11.4.3 Adecuación de la fuente de 12V al chasis**

Se crearon 2 soportes para la fuente de alimentación de 12 V los cuales van unidos a una placa del chasis, en este proceso se deseó crear soportes con optimización topológica. De por sí no era necesario crear la optimización topológica, pero se quiso poner en práctica conocimientos adquiridos por el autor.

La optimización topológica es un método en el que la computadora crea un diseño optimizado basado en las fuerzas y las superficies de contacto que se especifiquen por el diseñador. Este método está integrado en Fusion 360, y es una herramienta increíble para optimizar fácilmente los diseños.

El soporte para la optimización diseñado es el siguiente:

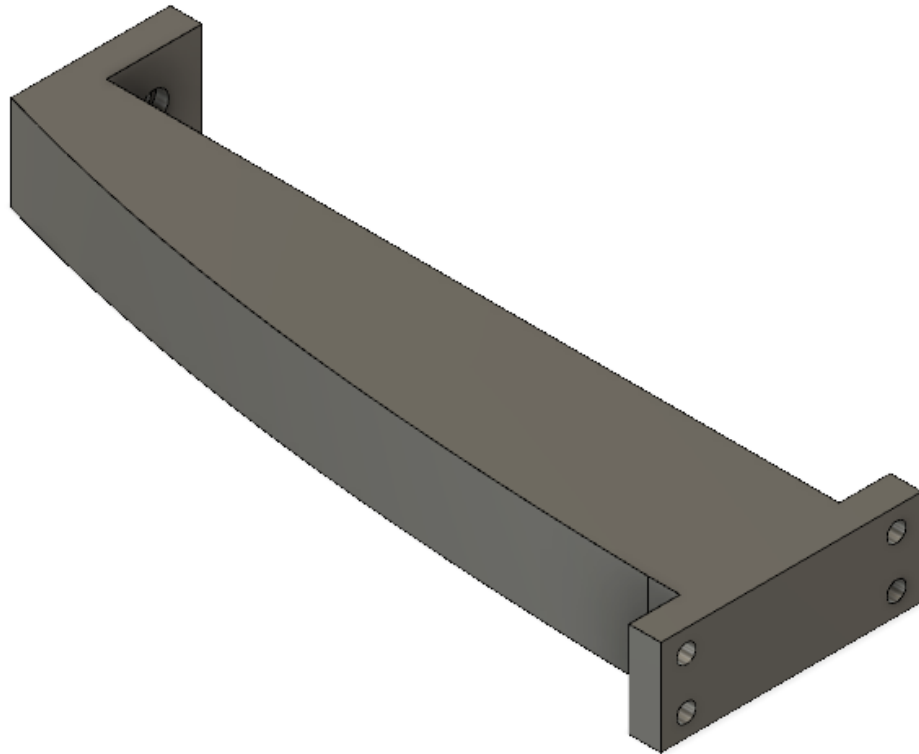


Figura 11.11 Diseño del soporte en bruto para fuente de alimentación de 12V. Fuente:

Autor.

En la anterior imagen se puede observar el diseño del soporte para la fuente el cual posee agujeros para el acople a una placa del sistema de control modular y la fuente de poder.

Para realizar a optimización topológica se diseñó el soporte con el fin de ser usable, eficiente y de fácil acople con la fuente de alimentación.

Se definieron las fuerzas, las fricciones y los puntos de contacto como se puede ver a continuación.

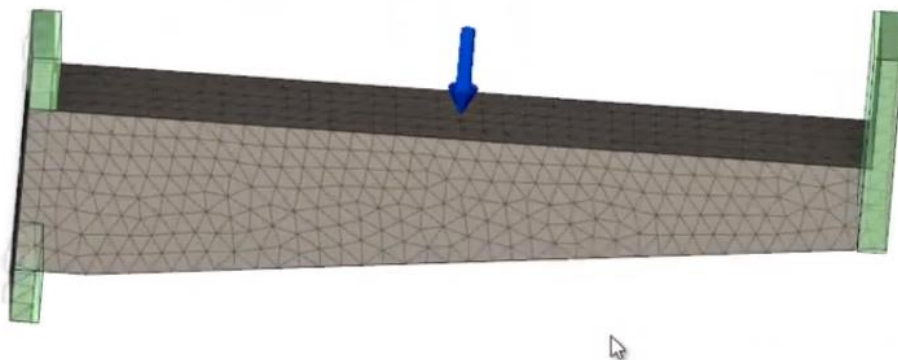


Figura 11.12 Definición de los puntos de fuerza (flecha azul), puntos de contacto y zonas de material. Fuente: Autor.

En la figura anterior se observan los parámetros para la optimización topológica, en las superficies resaltadas de color verde están los puntos que necesariamente se desean dejar sea cual sea el resultado de la optimización, puesto que ahí van los tornillos que se aseguran la fuente de poder. Se definió el parámetro de peso en 10N (1 Kg) para cada soporte denotado con la flecha azul que se ve en la anterior figura, ya que la fuente pesa alrededor de 1 kg en el peor de los casos. La optimización topológica con esas características fue la siguiente.

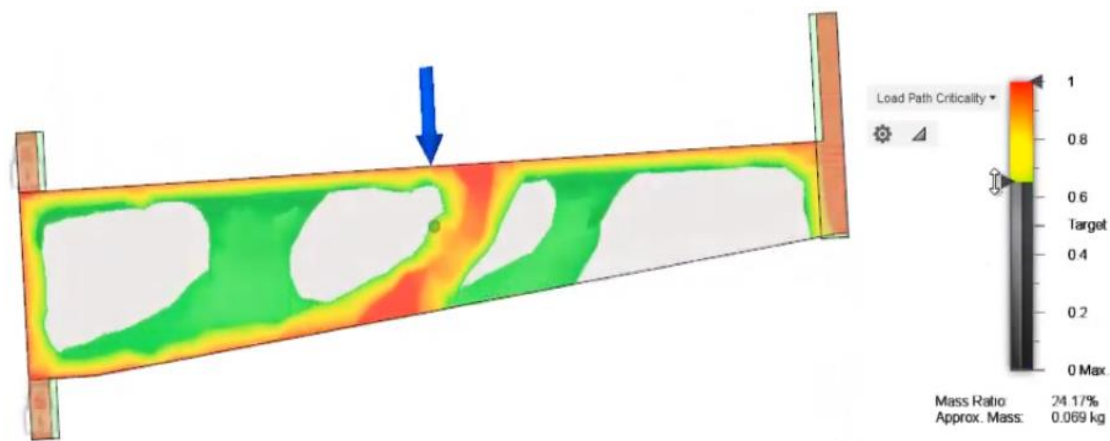


Figura 11.13 Resultado de la Optimización Topológica para el soporte de la fuente de 12V. Fuente: Autor.

En la figura anterior se ve el resultado de la optimización con una tasa de masa del 24,17% y una masa aproximada de 0.069 Kg (69g) reduciendo el material en un 76% y conservando las propiedades mecánicas necesarias para sostener la fuente como si de un soporte totalmente sólido por dentro se tratara. De todas maneras, ese es el objetivo de la optimización topológica, reducir material, costos y los más importante. El peso de la estructura.

Posteriormente se realizó la malla para exportar el modelo sólido y realizar la fabricación en impresión 3D.

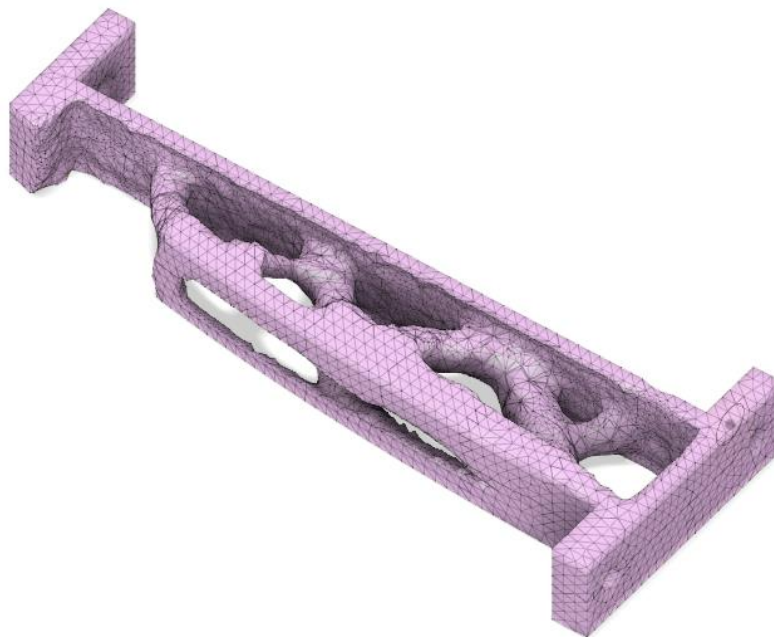


Figura 11.14 Malla solida del soporte listo para imprimir en 3D. Fuente: Autor.

La malla se importó en formato OBJ para pasarlo por el fileteador o slicer, quedando de la siguiente forma.

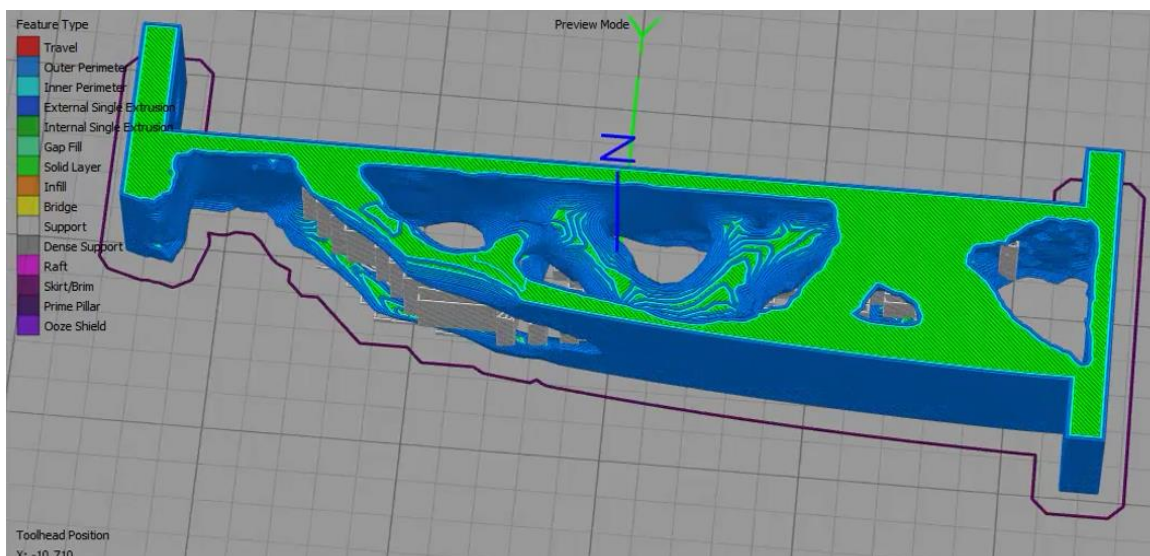


Figura 11.15 Vista previa del modelo en el slicer antes de imprimirlo en 3D. Fuente:

Autor.

Después de dar los parámetros de fabricación CAM al soporte como se ve en la anterior figura, se procede a realizar la impresión, quedando de la siguiente manera.



Figura 11.16 Vista isométrica de los Soportes impresos en 3D para la fuente de poder de 12V. Fuente: Autor.



Figura 11.17 Vista lateral de los soportes impresos en 3D para la fuente de poder de 12V.

Fuente: Autor.

La instalación de los soportes quedo de la siguiente forma dentro del chasis del sistema de control modular de la impresora.



Figura 11.18 Fuente de 12 V instalada en el sistema de control modular con optimización topológica en los soportes. Fuente: Autor.

En la figura anterior se puede observar la fuente sostenida por los soportes con optimización topológica, estos soportes pueden sostener hasta 1.5 Kg sin deformarse y romperse, están diseñados con la finalidad de que la fuente de poder de 12 V se pueda acoplar y desacoplar fácilmente con un ajuste a presión que es ofrecido por unas tuercas que están en el interior de los soportes denotados por un agujero negro.

Las imágenes anteriores varían con respecto a la simulación hecha en el programa fusión 360 ya que se hicieron varios test para mejorar el diseño y optimizar el material. Pero en síntesis se realizó el mismo proceso con tal de dar una mejor optimización y una mejor geometría para facilitar la fabricación por la técnica de impresión 3D.

#### 11.4.4 Conexión de las fuentes

La conexión de esta fuente tanto AC y como DC se muestra en las etiquetas que tiene la fuente. Tiene un potenciómetro en la parte izquierda de ajuste el cual como su nombre lo indica, sirve para realizar un ajuste fino al voltaje de salida que ronda de los 35 VDC a los 36 VDC. Después siguen los terminales de alimentación de positivo y negativo que van a las borneras de voltaje de entrada de los drivers DM542A. Por último, se encuentran los terminales de tierra, neutro y fase respectivamente que van conectados por medio de una extensión eléctrica al respectivo tomacorriente de 110 V AC o 120 V AC.

#### 11.4.5 Adecuación de las fuentes de 36 V al chasis

Para que las fuentes quedaran adheridas en la parte interior del chasis y que no se cayeran o movieran cuando se levantara el sistema de control, se decidió realizar el CAD de unos soportes con la facilidad de que las fuentes también se pudieran acoplar y desacoplar. El resultado fue el siguiente.

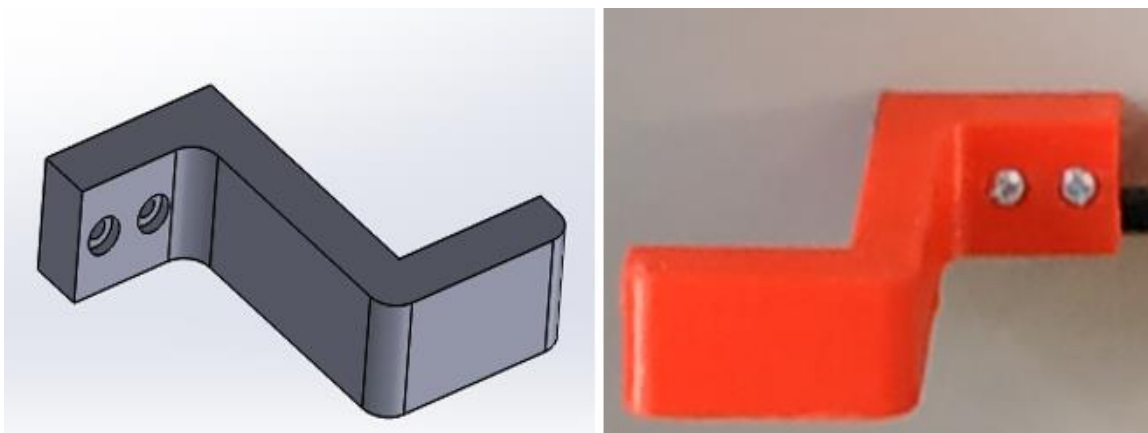


Figura 11.19 Diseño CAD /Realidad Soporte de fácil acople para fuente de 360 W.

Fuente: Autor.

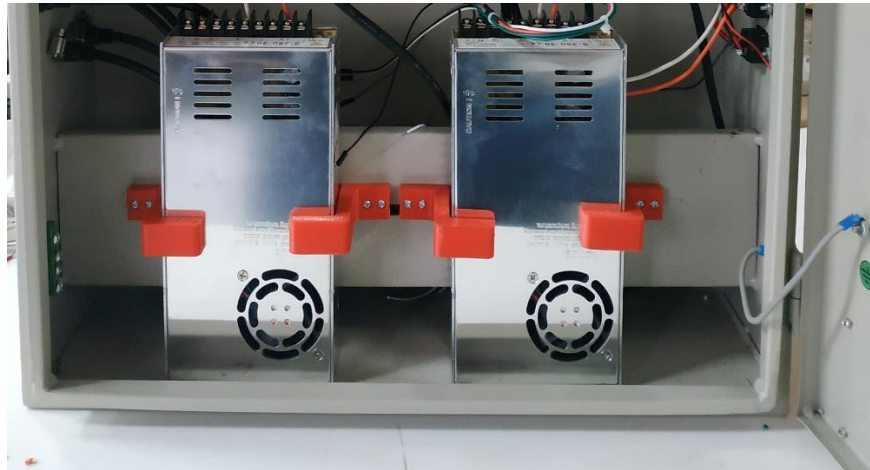


Figura 11.20 Fabricación de soportes de fácil acople para fuentes de 360 W unidos al chasis. Fuente: Autor.

Como se ve en la anterior figura se realizaron 2 soportes para cada una de las fuentes de 360 W que alimentan los drivers/motores, las fuentes no están atornilladas al chasis, sino que son los soportes diseñados los que están unidos a él, con el fin de que el usuario pueda cambiar o extraer la fuente si se daña de manera muy fácil, realizando una maniobra de desmontaje hacia arriba y desatornillando los cables que van hacia la misma.

### **11.5 Conexión y tipo de acoples para motores.**

Para las conexiones de los seis motores se usaron los siguientes conectores de referencia gx16-4, con la finalidad de conectarlos a los drivers y adaptarlos al chasis de la controladora para hacer una extensión plug-and-play de los motores a las diferentes estructuras CNC.



Figura 11.21 Conectores Gx16 – 4 para motores paso a paso. Fuente: Autor.



Figura 11.22 Acoples de motores paso a paso colocados en el chasis. Fuente: Autor.

Hay 6 puntos de acople los cuales 2 van al eje y, 1 al eje x, 2 al eje z y uno al extrusor de la máquina el cual es fácilmente visible en la figura porque es de color plateado a diferencia de los acoples de los motores para cada eje.

Por otro lado, se realizó una extensión de acople para conectarse con las diferentes estructuras mecánicas que se quieren controlar, las cuales quedaron de la siguiente forma.



Figura 11.23 Extensiones para los motores. Fuente: Autor.

La extensión de estos motores, y además todo el cableado utiliza un cable AWG 16 (4 cables calibre 16), según la American Wire Gauge Standard, en su tabla se muestra la siguiente información:

AWG	Dia mm	SWG	Dia mm	Max Amps	Ohms / 100 m
11	2.30	13	2.34	12	0.47
12	2.05	14	2.03	9.3	0.67
13	1.83	15	1.83	7.4	0.85
14	1.63	16	1.63	5.9	1.07
15	1.45	17	1.42	4.7	1.35
16	1.29	18	1.219	3.7	1.48
18	1.024	19	1.016	2.3	2.04
19	0.912	20	0.914	1.8	2.6
20	0.812	21	0.813	1.5	3.5
21	0.723	22	0.711	1.2	4.3
22	0.644	23	0.610	0.92	5.6
23	0.573	24	0.559	0.729	7.0
24	0.511	25	0.508	0.577	8.7
25	0.455	26	0.457	0.457	10.5
26	0.405	27	0.417	0.361	13.0
27	0.361	28	0.376	0.288	15.5
28	0.321	30	0.315	0.226	22.1
29	0.286	32	0.274	0.182	29.2
30	0.255	33	0.254	0.142	34.7
31	0.226	34	0.234	0.113	40.2
32	0.203	36	0.193	0.091	58.9
33	0.180	37	0.173	0.072	76.7
34	0.160	38	0.152	0.056	94.5
35	0.142	39	0.132	0.044	121.2

Figura 11.24 American Wire Gauge Standard. Fuente: (pepegreen, s.f.).

El calibre 16 tiene un diámetro de 1.291 mm y tiene una capacidad de corriente de 3.7 A, lo cual es adecuado para la aplicación. El cable utilizado es de tipo industrial y tiene un apantallamiento interno de protección frente al ruido eléctrico.

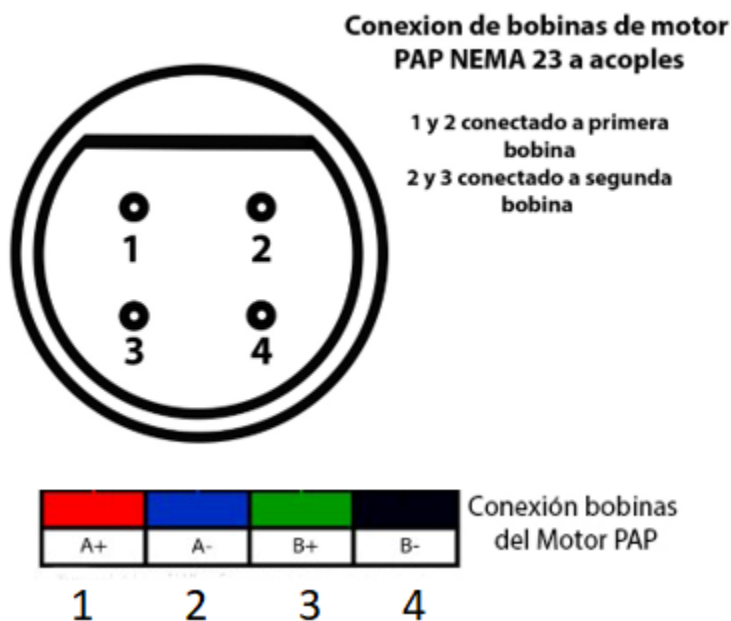


Figura 11.25 Conexión de bobinas de motor paso a paso NEMA 23 a acoples y extensiones de cable. Fuente: Autor.

En la anterior figura se muestra como están conectadas las bobinas de los motores paso a paso a cada acople y extensión tanto del sistema modular de control como a su sistema subyacente, denotando que su acoplamiento es bastante sencillo ya que como se ve en la misma figura hay una muesca que permite únicamente hacer la conexión válida.

### **11.6 Conexión y tipo de acoples para fines de curso, resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y conexión pwm de láser.**

Como elementos de protección para la operación de la impresora se implementaron fines de curso para determinar el tope máximo y mínimo de cada eje de desplazamiento de la estructura mecánica en X (mínimo y máximo), Y (máximo y mínimo), Z (solo máximo). Su implementación es de gran valor, sirve como protección de la máquina frente a un

accidente o error de programación de la máquina por parte del usuario al momento de realizar cualquier labor de control numérico, es decir, el error más común está ligado en querer construir una pieza en la máquina, que es más grande que el área de trabajo para el cual fue diseñada la estructura, que la supera o que se sale de la misma, ocasionando que la máquina se pueda dañar a autodestruir si no se tiene la protección de los fines de curso que delimiten el área efectiva de la máquina. Para ello se usaron los siguientes fines de curso.



Figura 11.26 Fines de curso del sistema de control modular. Fuente: Autor.

Para acoplar los fines de curso al chasis se diseñó una placa y se fabricó con ayuda de una impresora 3D.

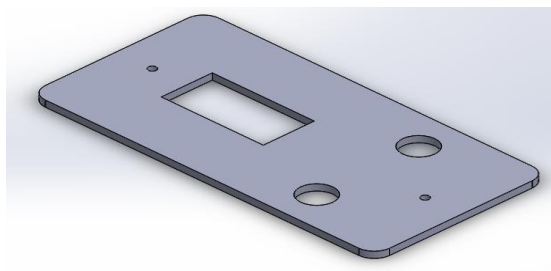


Figura 11.27 Diseño de placa para acoples de fines de curso resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y salida pwm para láser. Fuente: Autor.

En la figura anterior se ve el diseño de la placa, que tiene una abertura para 2 salidas de acoples RJ-45 hembra para la extensión de los fines de curso y 2 aberturas para acoplar resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y salida pwm para láser.



Figura 11.28 Acoples fines de curso, resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y conexión pwm de láser acoplados al chasis. Fuente: Autor.

En esta ocasión también se escogieron los mismos acoples gx16-4 que se implementaron para los motores NEMA 23 y se conectaron de la siguiente manera haciendo referencia la figura anterior.

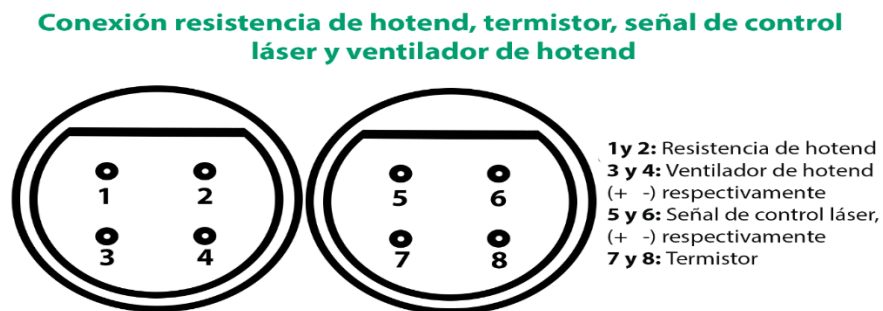


Figura 11.29 Esquema de conexión de acoples para la resistencia de hotend, termistor, ventilador de hotend y conexión pwm para láser. Fuente: Autor.

Se escogió este tipo de conectores y cable para el termistor, ventilador de capa y ventilador de hotend por cuestiones de simplificación de la maniobra, ya que todo este puerto de cables va a un mismo punto.

### **11.7 Acople conexión serial del computador o microprocesador al sistema de control modular**

En la siguiente figura se muestra el acople para comunicación serial del computador al sistema de control modular, que internamente va conectado a Arduino/RAMPS.



Figura 11.30 Acople de comunicación serial del sistema de control modular al computador. Fuente: Autor.

## 12. MODIFICACION DEL SOFTWARE MARLIN PARA EL SISTEMA DE CONTROL MODULAR

La configuración en Marlin para el sistema de control modular fue la siguiente:

### 12.1 Baudrate

La tasa de baudios utilizado fue de 115200 para tener una velocidad optima de transferencia.

### 12.2 Motherboard

Se debe escoger la motherboard que vamos a usar, en nuestro caso es la RAMPS 1.4 con extrusor, ventilador y cama caliente, para ello se realiza lo siguiente:

Hacer clic en la fecha hacia abajo denotada con el círculo rojo:

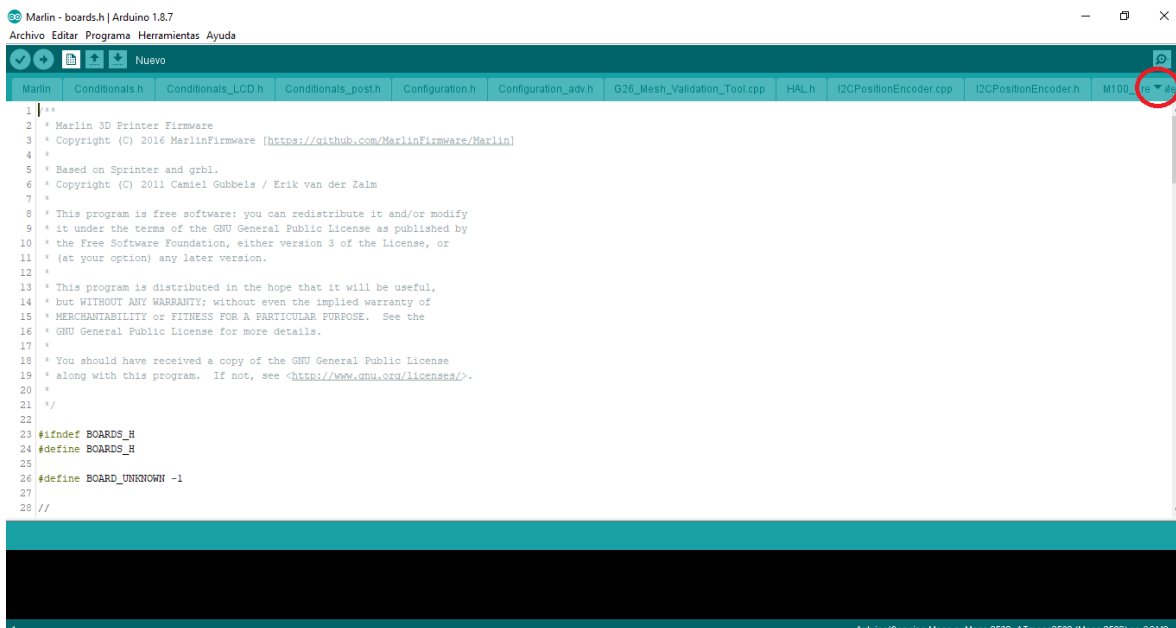


Figura 12.1 Instrucción 1 para escoger la motherboard. Fuente: Autor.

Aparecerán todos los ficheros en C++ que contienen Marlin para configuración de fines de curso, extrusores, código G entre otros. Pero se escoge Boards.h bajando con la rueda del ratón hasta encontrarlo

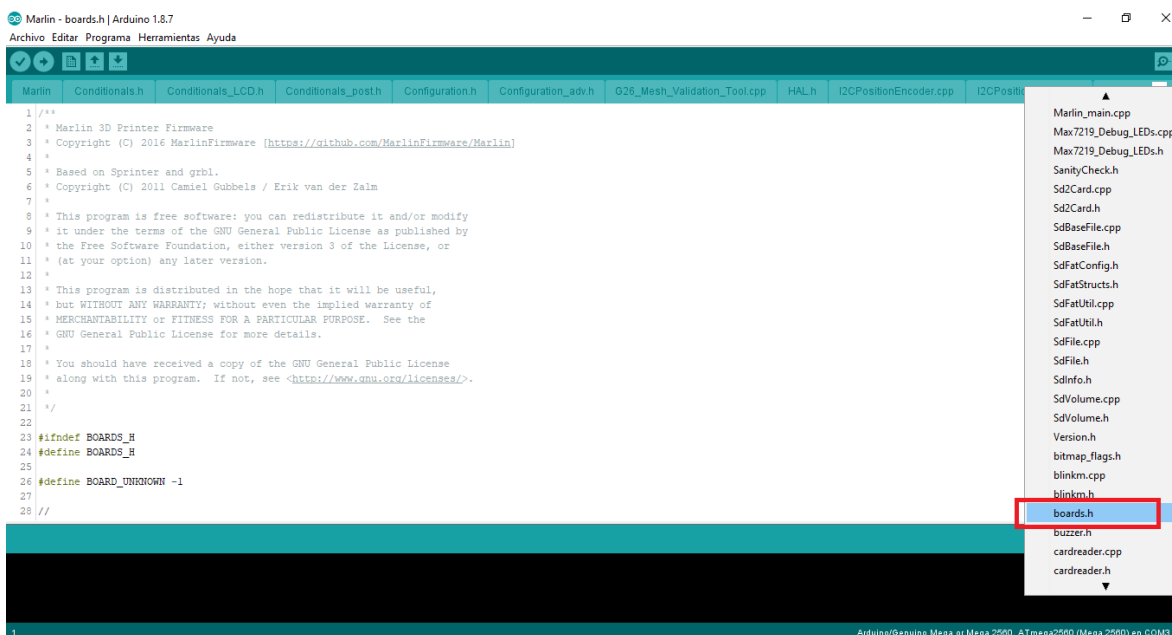


Figura 12.2 Instrucción 2 para escoger la motherboard. Fuente: Autor.

Se hace clic en el fichero y saldrán todas las Motherboards que se puede configurar y la que se debe usar es la numero 43 que contiene a configuración de la RAMPS 1.4 con extrusor, ventilador y cama caliente (EFB)

```

26 #define BOARD_UNKNOWN -1
27
28 //
29 // RAMPS 1.3 / 1.4 - ATmega1280, ATmega2560
30 //
31
32 #define BOARD_RAMPS_OLD      3    // MEGA/RAMPS up to 1.2
33
34 #define BOARD_RAMPS_13_EFB   33   // RAMPS 1.3 (Power outputs: Hotend, Fan, Bed)
35 #define BOARD_RAMPS_13_EEB   34   // RAMPS 1.3 (Power outputs: Hotend0, Hotend1, Bed)
36 #define BOARD_RAMPS_13_EFF   35   // RAMPS 1.3 (Power outputs: Hotend, Fan0, Fan1)
37 #define BOARD_RAMPS_13_EEF   36   // RAMPS 1.3 (Power outputs: Hotend0, Hotend1, Fan)
38 #define BOARD_RAMPS_13_SF    38   // RAMPS 1.3 (Power outputs: Spindle, Controller Fan)
39
40 #define BOARD_RAMPS_14_EFB   43   // RAMPS 1.4 (Power outputs: Hotend, Fan, Bed)
41 #define BOARD_RAMPS_14_EEB   44   // RAMPS 1.4 (Power outputs: Hotend0, Hotend1, Bed)
42 #define BOARD_RAMPS_14_EFF   45   // RAMPS 1.4 (Power outputs: Hotend, Fan0, Fan1)
43 #define BOARD_RAMPS_14_EEF   46   // RAMPS 1.4 (Power outputs: Hotend0, Hotend1, Fan)
44 #define BOARD_RAMPS_14_SF    48   // RAMPS 1.4 (Power outputs: Spindle, Controller Fan)
45
46 #define BOARD_RAMPS_PLUS_EFB 143   // RAMPS Plus 3DYMY (Power outputs: Hotend, Fan, Bed)
47 #define BOARD_RAMPS_PLUS_EEB 144   // RAMPS Plus 3DYMY (Power outputs: Hotend0, Hotend1, Bed)
48 #define BOARD_RAMPS_PLUS_EFF 145   // RAMPS Plus 3DYMY (Power outputs: Hotend, Fan0, Fan1)
49 #define BOARD_RAMPS_PLUS_EEF 146   // RAMPS Plus 3DYMY (Power outputs: Hotend0, Hotend1, Fan)
50 #define BOARD_RAMPS_PLUS_SF  148   // RAMPS Plus 3DYMY (Power outputs: Spindle, Controller Fan)
51
52 //

```

Figura 12.3 Instrucción 3 para escoger la motherboard. Fuente: Autor.

Una vez sabido esto, se define la motherboard en el fichero Configuration.h como se muestra a continuación:

```

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

```

Figura 12.4 Definición de la motherboard RAMPS a usar en el fichero. Fuente: Autor.

Se define el número de extrusores y el diámetro por defecto del material que se extruirá, en este caso se configuró así:

```

147 // This defines the number of extruders
148 // :[1, 2, 3, 4, 5]
149 #define EXTRUDERS 1
150
151 // Generally expected filament diameter (1.75, 2.85, 3.0, ...). Used for Volumetric, Filament Width Sensor, etc.
152 #define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75

```

Figura 12.5 Definición del número de extrusores y diámetro de la boquilla. Fuente:

Autor.

### 12.3 Ajuste PID para nozzle

Se ajustó el PID con la variable proporcional y la derivativa para calentar el hotend del extrusor de forma correcta ya que los valores por defecto no nos sirven puesto que el número de histéresis definidas para que la temperatura se pueda establecer son 3. Si en 3 histéresis no permanece constante la temperatura entonces Marlin lanza un error de prevención de altas temperaturas. Para calibrar las constantes de PID de la temperatura se hizo uso del PID Autotune de Marlin con el siguiente código G: M303 E0 S200 C8 digitado en ponterface. Esto calentará la primera boquilla (E0) y circulará alrededor de la temperatura objetivo 8 veces (C8) a la temperatura dada (S200) y devolverá los valores para PI y D. una vez termina el proceso, Pronterface devuelve las constantes que se deben ingresar en el fichero Configuration.h como se ve a continuación.

```
383 | #define DEFAULT_Kp 22.2  
384 | #define DEFAULT_Ki 1.08  
385 | #define DEFAULT_Kd 130
```

Figura 12.6 Variables PID configuradas. Fuente: Autor.

### 12.4 Cálculos para pasar pasos por mm

Los cálculos que se harán a continuación son hechos a través de la experiencia y prueba y error.

En principio se configuraron los pasos por mm de cada eje de la estructura, teniendo en cuenta el hardware de la máquina.

Necesitamos hallar el número de pasos del motor. Los motores NEMA 23 que se adquirieron tienen un paso de ángulo de  $1.8^\circ$  entonces:

$$\text{pasos del motor} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ}$$

$$\text{pasos del motor} = 200$$

### 12.5 Poleas y correas

Las correas y poleas son las encargadas de transmitir los movimientos del eje x e y. La forma de funcionamiento se basa en que el motor NEMA 23 transmite los movimientos a la polea, la cual a su vez se encarga de mover la correa.

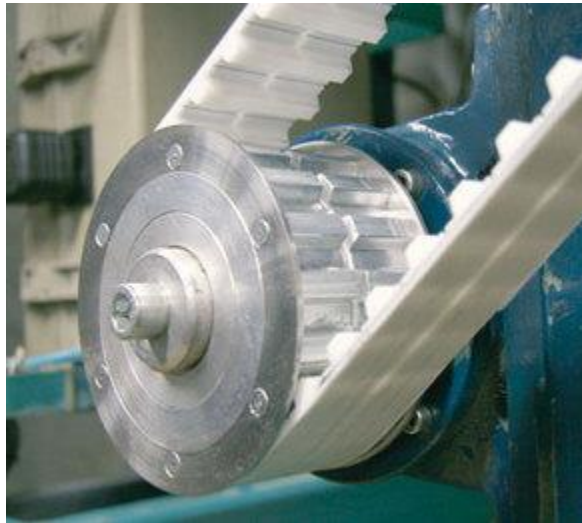


Figura 12.7 Polea y correa. Fuente: Autor.

Las poleas y correas usadas fueron la de referencia GT2 que son usadas para realizar movimientos lineales. Las correas de la estructura CNC tienen una separación por diente de 2mm y las poleas tienen 20 dientes.

Con estos datos ya se pueden calcular los pasos por mm que el motor debe recorrer junto con las correas y poleas.

Fórmula pasos por mm:

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = \frac{\text{pasos motor NEMA} * \text{micropasos del driver}}{\text{nro de dientes de la polea} * \text{mm de separacion entre cada diente}}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = \frac{200 * 8}{20 * 2}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = \frac{1600}{40}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = 40$$

## 12.6 Husillo

Para el eje Z la máquina posee un husillo para realizar los movimientos lineales en este eje en vez de poleas por tanto los cálculos de pasos por mm cambian.



Figura 12.8 Husillo. Fuente: Autor.

Se realizó la prueba de cuantos mm recorría por cada vuelta y fueron 5 mm, con este dato ya se pueden calcular los pasos por mm para el husillo.

Fórmula pasos por mm:

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = \frac{\text{pasos motor NEMA} * \text{micropasos del driver}}{\text{cantidad de mm recorridos por una vuelta}}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = \frac{200 * 8}{5}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = \frac{1600}{5}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = 320$$

## 12.7 Extrusor

Para la calibración de los pasos por mm del extrusor se hizo a ensayo y error ya que era de un fabricante chino que no poseía datasheet. Para la calibración de los pasos por mm del extrusor se escogió un valor al azar entre 1 y 100 pasos por mm el cual fue 80 y se ingresó en la línea DEFAULT\_AXIS\_STEP\_PER\_UNIT de Marlin.

Cuando se le dio la orden de extruir 20 mm en Pronterface, realmente extruyó 23 mm el motor, por ende, se realizó una regla de 3 para hallar el valor real de la siguiente manera:

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} = \frac{\text{pasos por mm ingresado} * \text{mm material extruido en realidad}}{\text{mm en material esperado}}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} \text{ para extrusor} = \frac{80 * 23}{20}$$

$$\frac{\text{step}}{\text{mm}} \text{ para extrusor} = 92$$

## 12.8 Ingreso de los datos a Marlin

Una vez tenemos los pasos por mm de cada eje, se programaron esos datos en el fichero “configuration.h” de Marlin como se ve a continuación:

De izquierda a derecha van los correspondientes valores para los ejes X, Y, Z, E

```
611 | #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 40, 40, 320, 93 }
```

Figura 12.9 Definición pasos por milímetro por defecto. Fuente: Autor.

## 12.9 Velocidad de avance

Para la velocidad de avance hay aspectos a tener en cuenta, ya que velocidades muy altas para nuestra estructura rígida y pesada puede significar una alta inercia al realizar movimientos y acabar en la malformación de nuestra estructura a largo plazo, los valores máximos de velocidad de avance por defecto escogido fueron los siguientes para cada eje y extrusor:

```
618 #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE      { 1000, 1000, 5, 25 }
```

Figura 12.10 Valores máximos de velocidad de avance por defecto. Fuente: Autor.

De  $1000 \frac{mm}{s}$  para los ejes X y Y

De  $5 \frac{mm}{s}$  para el eje Z

De  $25 \frac{mm}{s}$  para el extrusor

Los valores para el eje z y extrusor cambian porque el eje Z necesita más precisión a la hora de realizar impresión 3D y la velocidad en este eje no tiene que ser necesariamente alta, Por otro lado, el extrusor maneja una velocidad máxima de  $25 \frac{mm}{s}$  ya que la velocidad de retracción cuando se imprime en 3D no debe ser muy alta ni muy baja.

Realmente estos valores pueden ser cambiados en el código G que se vaya a ingresar en la máquina para realizar algún mecanizado o impresión 3D, por ejemplo: G0 X10.0 Y15.0 Z3.0 F120 indica un movimiento a (10,15,3) a una velocidad de avance de  $120 \frac{mm}{s}$ . Si no se especifica F, se utiliza la última velocidad de avance utilizada en el firmware.

## 12.10 Aceleración

La aceleración es un valor intrínseco que se programa en el firmware y no puede ser alterado por el código G. ya que esto va a ser determinante en la calidad de los prototipos realizador por impresión 3D, por fresado o por corte láser.

Una aceleración baja es lo ideal ya que la inercia de la estructura del eje z es bastante grande y puede malograr el resultado final de la impresión principalmente, por eso se calibraron estos valores con prueba y error.

```
626 | #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION      { 1000,1000,100,25 }
```

Figura 12.11 Valores máximos de aceleración por defecto. Fuente: Autor.

De  $1000 \frac{mm}{s^2}$  para los ejes X y Y

De  $100 \frac{mm}{s^2}$  para el eje Z

De  $25 \frac{mm}{s^2}$  para el extrusor

## 12.11 Jerk

Es un parámetro avanzado que aplica una aceleración/deceleración en los movimientos si el cambio de velocidad es muy brusco. Pero si el cambio no es brusco, cambia la velocidad al instante. Jerk es la máxima diferencia de velocidad para que un movimiento considere brusco.

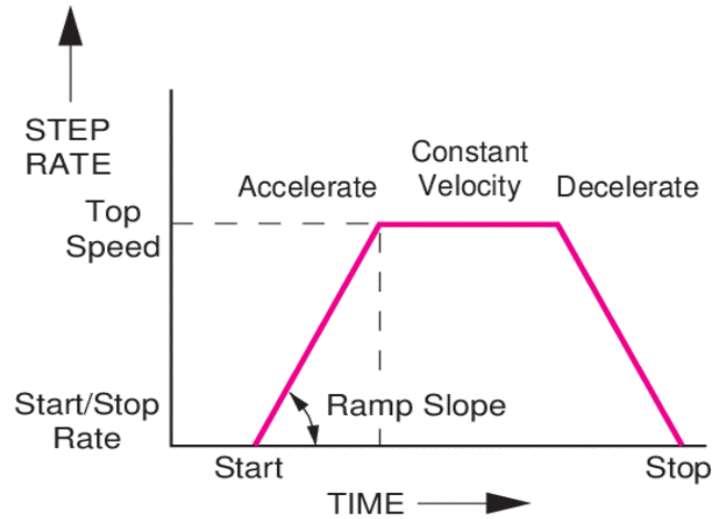


Figura 12.12 Grafica explicativa de jerk, aceleración. Fuente: (newport, s.f.).

Por defecto, el valor de jerk es muy alto, y eso hace que los movimientos no vayan todo lo fluido que debería, por eso hay que bajar bastante este valor. Esto se usa para dar un acabado más estético a las piezas, pero no es un parámetro determinante. Se dejaron estos valores.

```

648 #define DEFAULT_XJERK           6.0
649 #define DEFAULT_YJERK           6.0
650 #define DEFAULT_ZJERK           0.8
651 #define DEFAULT_EJERK           4.0
---
```

Figura 12.13 Parámetros de JERK. Fuente: Autor.

## 12.12 Fines de curso

Para los fines de curso se habilitaron las resistencias de pullup ya que de los 3 pines físicos que tiene estos sensores, solo usamos los pines de normalmente abierto y la tierra

Y se habilitaron en el software de la siguiente manera

```

517 // Enable pullup for all endstops to prevent a floating state
518 #define ENDSTOPPULLUPS
519 #if DISABLED(ENDSTOPPULLUPS)
520     // Disable ENDSTOPPULLUPS to set pullups individually
521     //#define ENDSTOPPULLUP_XMAX
522     //#define ENDSTOPPULLUP_YMAX
523     //#define ENDSTOPPULLUP_ZMAX
524     //#define ENDSTOPPULLUP_XMIN
525     //#define ENDSTOPPULLUP_YMIN
526     //#define ENDSTOPPULLUP_ZMIN
527     //#define ENDSTOPPULLUP_ZMIN_PROBE
528 #endif

```

Figura 12.14 Definición parámetros de pullups. Fuente: Autor.

Habilitar el pullup para todos los fines de curso máximos y mínimos también es importante porque previene que los estados flotantes que causan malfuncionamiento en los recorridos de cada eje de la estructura CNC.

### 12.13 Inversión de fines de curso máximos y mínimos

Por defecto están en falso, pero como estamos usando los pines NA y tierra los invertimos a true

```

530 // Mechanical endstop with COM to ground and NC to Signal uses "false" here (most common setup).
531 #define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
532 #define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
533 #define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
534 #define X_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
535 #define Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
536 #define Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
537 #define Z_MIN_PROBE_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the probe.
...

```

Figura 12.15 Inversión fines de curso máximos y mínimos. Fuente: Autor.

### 12.14 Inversión de la dirección del motor z fines de curso

El eje del motor para el eje x cuando se realizaba homing iba para otra dirección, así que se puso en falso el eje z como se muestra en la línea 850 de Marlin.

```

847 // Invert the stepper direction. Change (or reverse the motor connector) if an axis goes the wrong way.
848 #define INVERT_X_DIR true
849 #define INVERT_Y_DIR true
850 #define INVERT_Z_DIR false

```

Figura 12.16 Inversión de la dirección del motor z fines de curso. Fuente: Autor.

## 12.15 Control para láser

Para el control del láser, según la página web del fabricante, el modo de conexión es el siguiente:

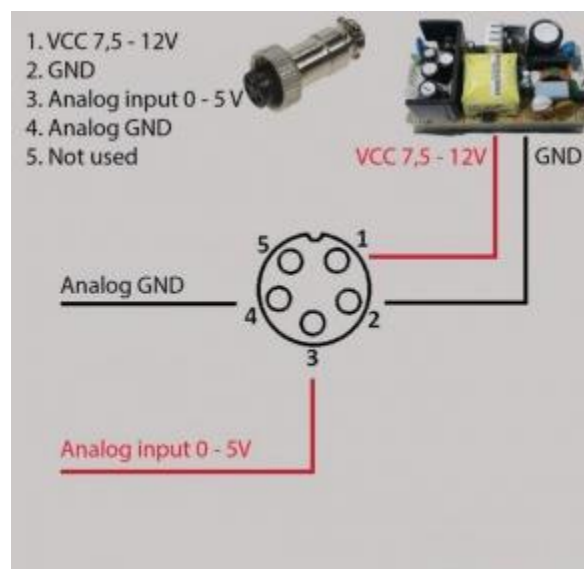


Figura 12.17 Conexión del láser. Fuente: (Opt Lasers, s.f.).

Para que la controladora pueda enviar la señal adecuada al láser fue necesario modificar el software Marlin para utilizar una señal de control pwm que normalmente permite el control de servomotores en impresoras 3D con control realimentado. La entrada digital del láser con su GND se conectó al pin d6 de la placa RAMPS que posee una salida pwm de 0 a 5V.

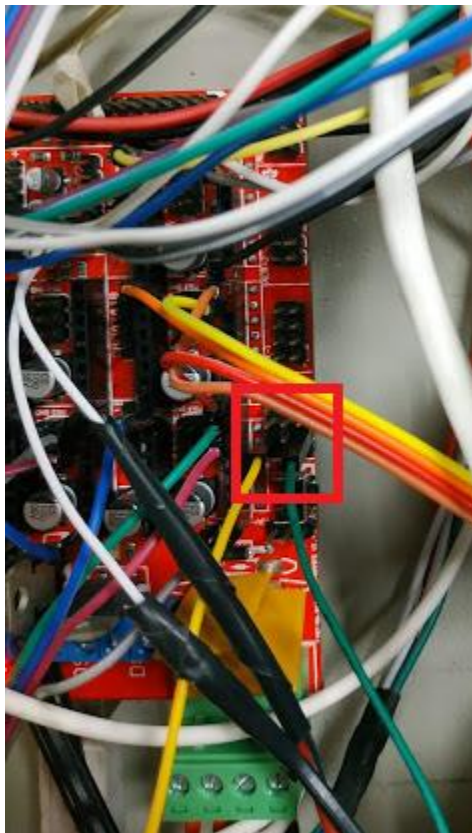


Figura 12.18 Conexión PWM del láser de CO2. Fuente Autor.

El láser se activa por medio del código G de control numérico. Con el comando M3 S255 se activa el láser a máxima potencia y con el comando M3 S0 se apaga el láser. Una vez se tiene definida las trayectorias del láser en la parte inicial del código se inicia el comando de encendido del láser, después se envían las trayectorias que debe seguir la herramienta y al final se envía el código de apagado del láser.

## 13. RESULTADOS

### 13.1 Resultados Impresión 3D

En primer lugar, se necesita el archivo STL de un diseño CAD para filetear o generar el código G.

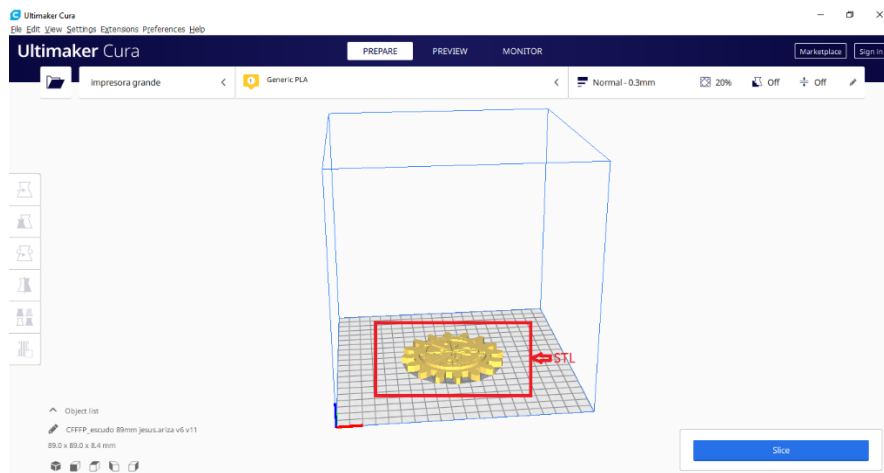


Figura 13.1 Interfaz de cura con el archivo STL dispuesto a filetear. Fuente: Autor.

La controladora solo entiende código G y para realizarlo se escogió el software CURA. Para que funcione es necesario calibrar algunos parámetros, como diámetro del nozzle, dimensiones efectivas de la estructura, velocidad de impresión, velocidad de retracción, diámetro del material entre otros muchos más parámetros que se van calibrando a medida que se va imprimiendo con repetidas pruebas hasta que los parámetros sean los más acertados.

Una vez hecho esto a la pieza a imprimir, simplemente se le da la opción de slice para generar el código G.

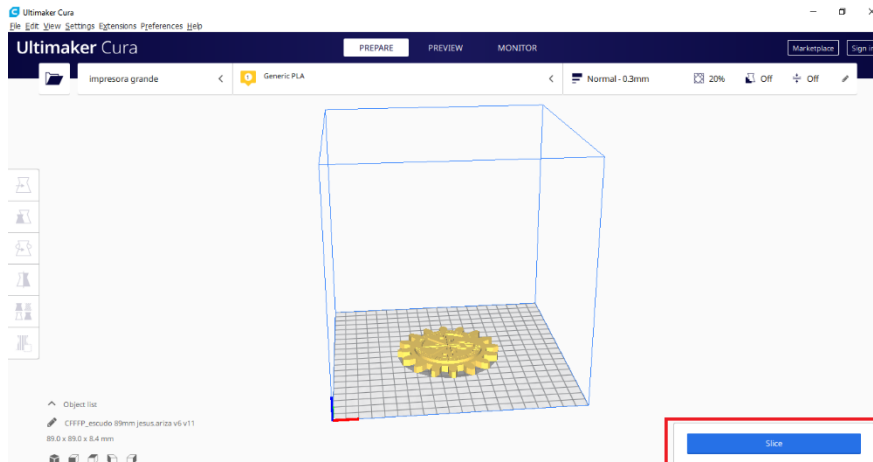


Figura 13.2 Generación del código G. Fuente: Autor.

Una vez fileteado, se coloca el código G en Pronteface para dar la orden de imprimir

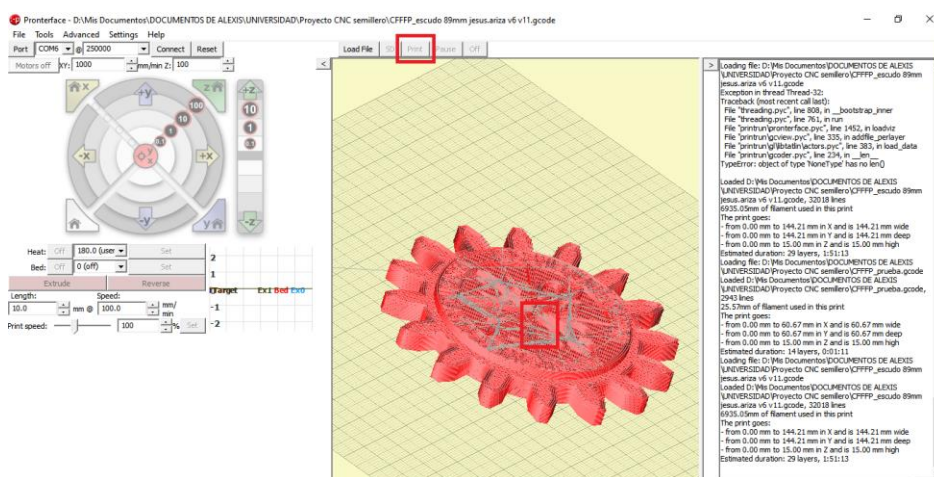


Figura 13.3 Interfaz de impresión de Pronteface. Fuente: Autor.

Después de aproximadamente 3 h de imprimir tenemos el siguiente resultado.

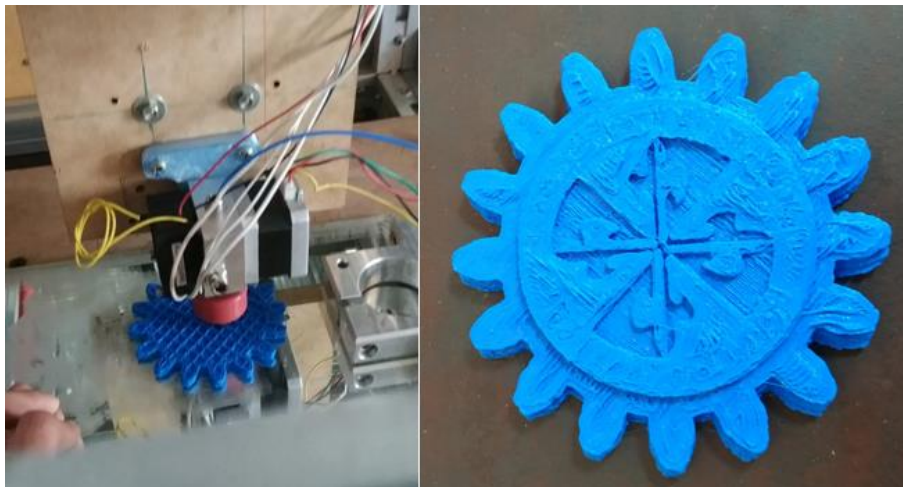


Figura 13.4 Figura impresa en 3D con la controladora diseñada por el autor. Fuente:  
Autor.

La imagen anterior muestra que efectivamente la controladora sirve para imprimir en 3D.

### **13.2 Resultados Fresado CNC**

Para realizar el fresado se usó otro programa denominado NC viewer que es online y se programó punto a punto las coordenadas como se ve en la siguiente imagen en la parte izquierda. Después de realizar la programación se carga en la interfaz Pronterface que sirve para poner el funcionamiento el código G.

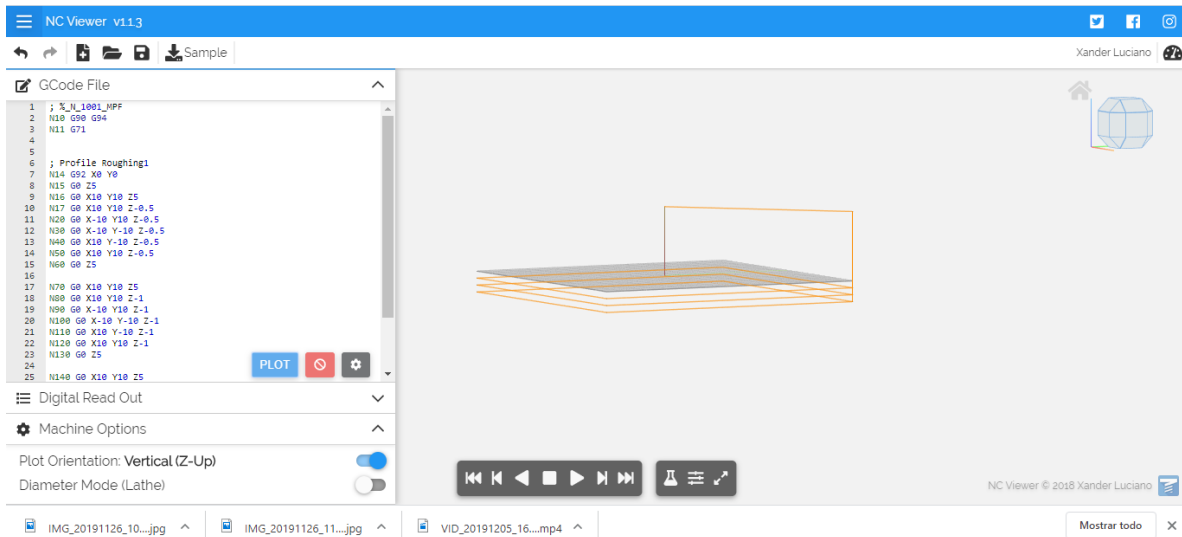


Figura 13.5 Coordenadas en NC Viewer para realizar un cuadrado. Fuente: Autor.

Para realizar el cuadrado es necesario sustraer material por ende un software de impresión 3D no funciona para esta labor. El resultado es el siguiente:



Figura 13.6 Realizando Geometría cuadrada. Fuente: Autor.

La geometría realizada no es perfecta ya que la estructura no es lo suficientemente rígida para esta labor. Esto demuestra el funcionamiento de este tipo de manufactura sustractiva por capas.

Se realizaron 2 pruebas más, una de refrentado y la otra de una figura geométrica y este fue el resultado:

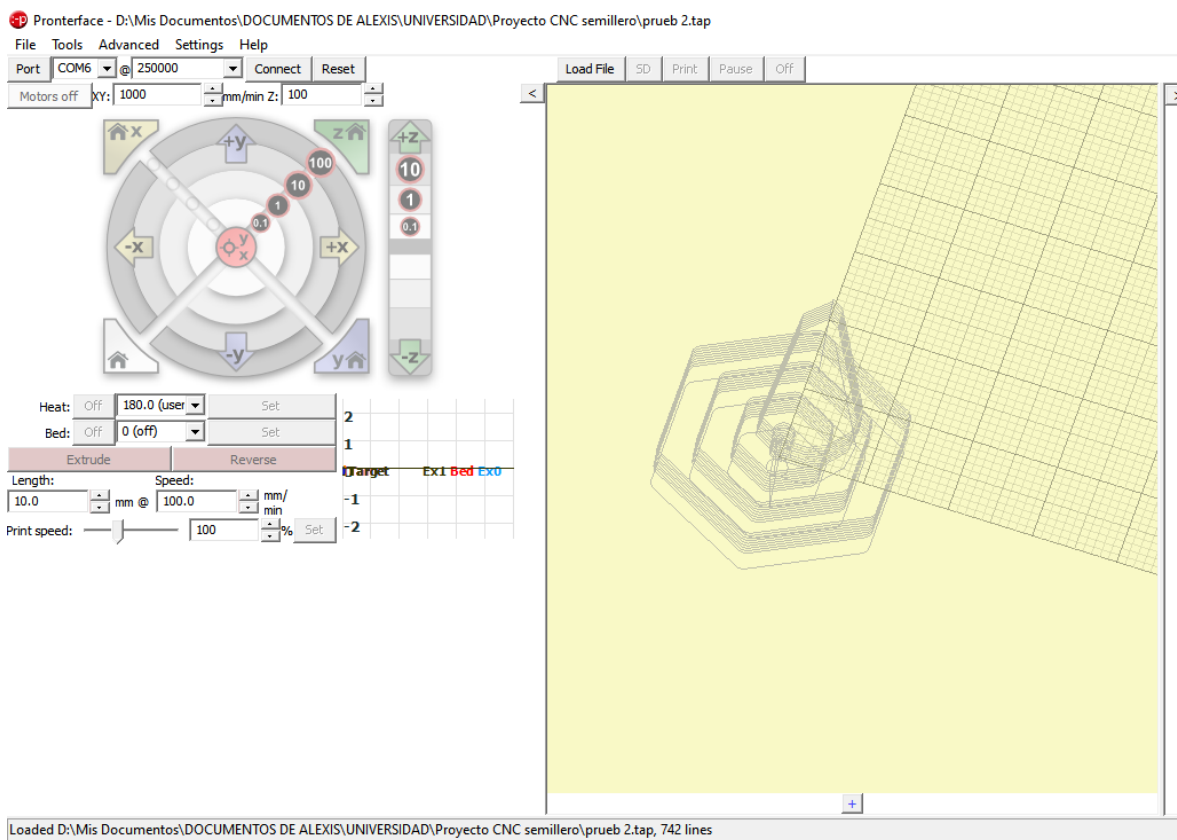


Figura 13.7 G Code geometría hexagonal cargado en pronterface. Fuente: Autor.



Figura 13.8 Prueba de Refrentado y de geometría Hexagonal. Fuente: Autor.

### 13.3 Resultados Grabado Láser CNC

Para realizar el código G en láser se usó el software PIC2CADCAM, el cual detecta los contornos de una imagen para hacer los recorridos y los convierte en código G de control numérico para su fabricación.

Al abrir el programa PID2CADCAM salen estas interfaces:

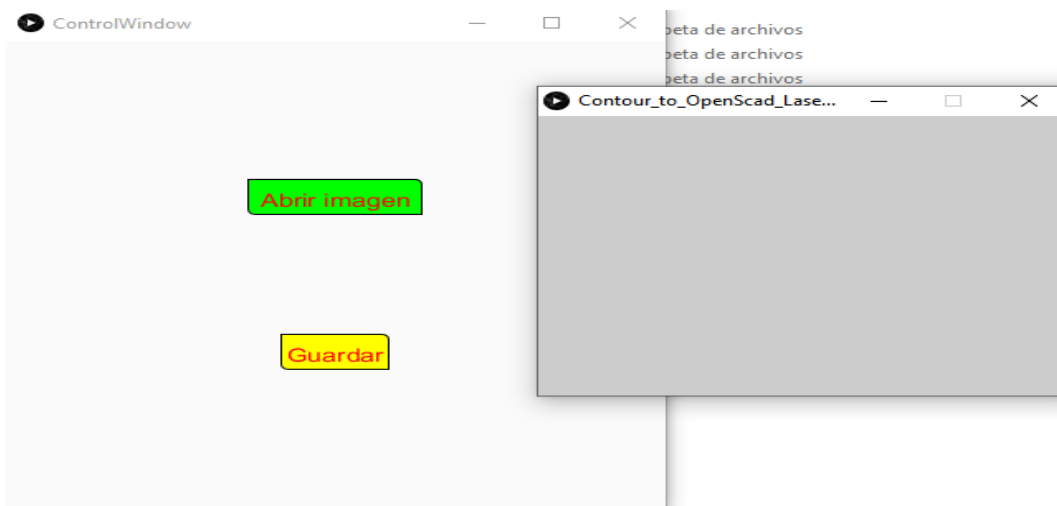


Figura 13.9 Interfaz PID2CADCAM. Fuente: Autor.

Damos click en Abri imagen y escogemos la imagen en formato png que se quiera usar

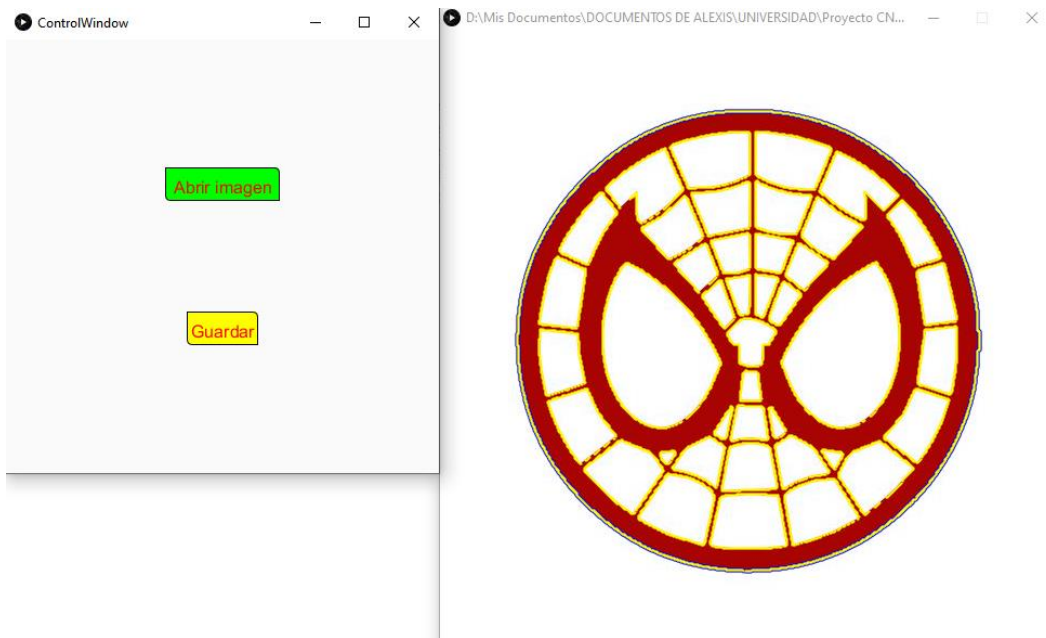
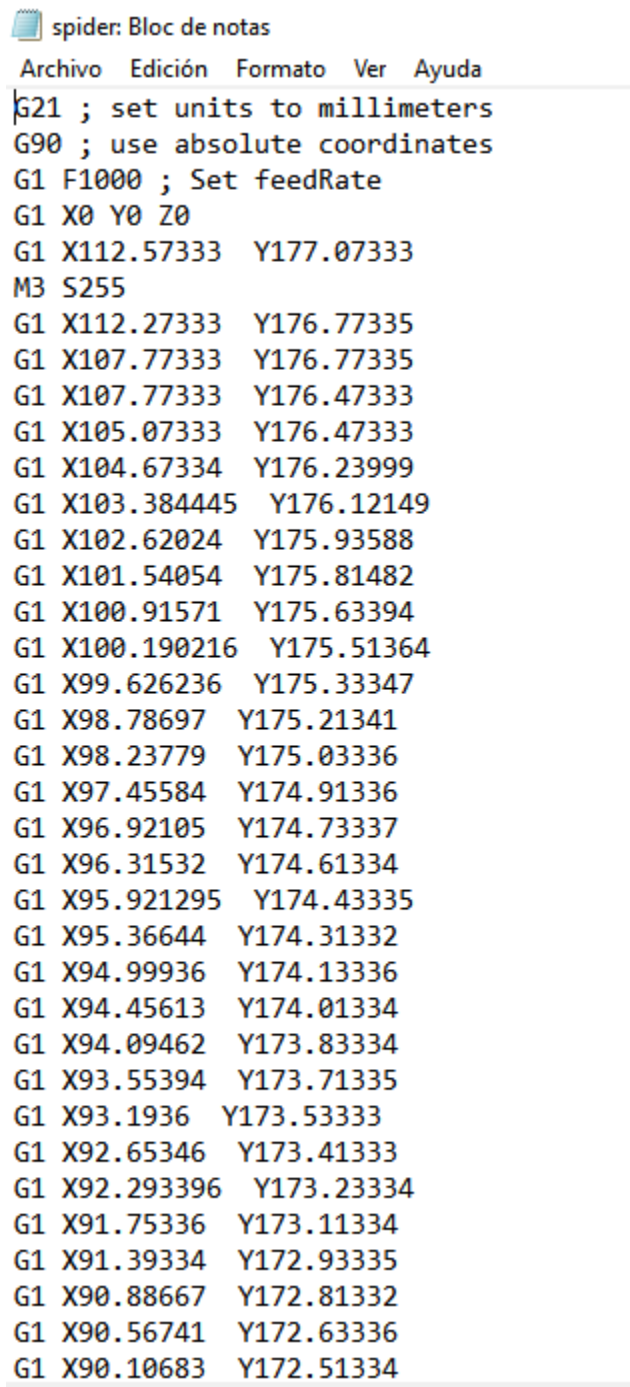


Figura 13.10 Contornos de la figura software PID2CADCAM. Fuente: Autor.

Los contornos de color amarillo significa lo que el software esta reconociendo para realizar el codigo G.

Una vez hecho esto simplemente damos al boton guardar y se hara un fichero con extension .gcode como se ve acontinuacion que tiene 4650 lineas de código



```
spider: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
G1 F1000 ; Set feedRate
G1 X0 Y0 Z0
G1 X112.57333 Y177.07333
M3 S255
G1 X112.27333 Y176.77335
G1 X107.77333 Y176.77335
G1 X107.77333 Y176.47333
G1 X105.07333 Y176.47333
G1 X104.67334 Y176.23999
G1 X103.384445 Y176.12149
G1 X102.62024 Y175.93588
G1 X101.54054 Y175.81482
G1 X100.91571 Y175.63394
G1 X100.190216 Y175.51364
G1 X99.626236 Y175.33347
G1 X98.78697 Y175.21341
G1 X98.23779 Y175.03336
G1 X97.45584 Y174.91336
G1 X96.92105 Y174.73337
G1 X96.31532 Y174.61334
G1 X95.921295 Y174.43335
G1 X95.36644 Y174.31332
G1 X94.99936 Y174.13336
G1 X94.45613 Y174.01334
G1 X94.09462 Y173.83334
G1 X93.55394 Y173.71335
G1 X93.1936 Y173.53333
G1 X92.65346 Y173.41333
G1 X92.293396 Y173.23334
G1 X91.75336 Y173.11334
G1 X91.39334 Y172.93335
G1 X90.88667 Y172.81332
G1 X90.56741 Y172.63336
G1 X90.10683 Y172.51334
```

Figura 13.11 Código G figura para test grabado láser. Fuente: Autor.

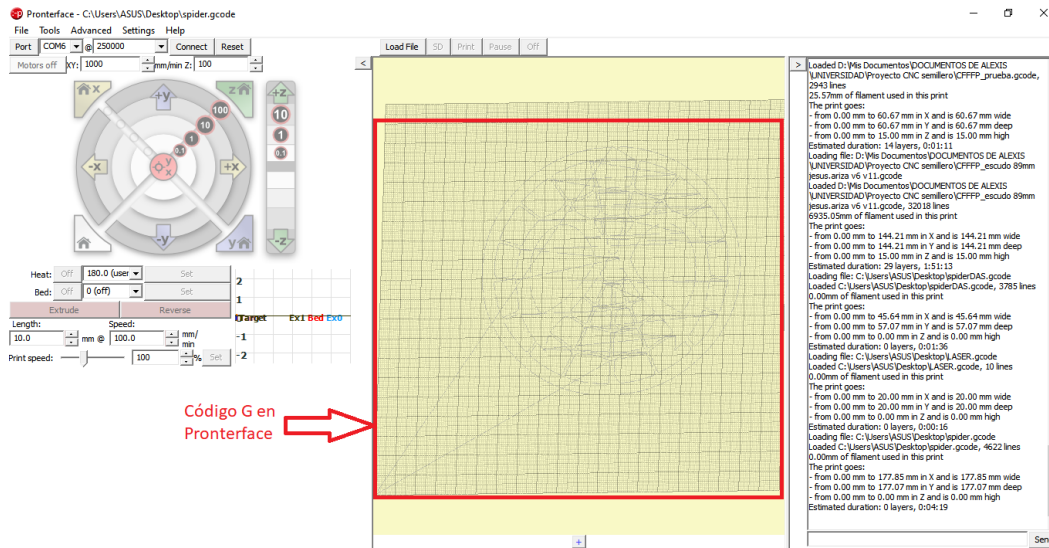


Figura 13.12 Código G figura para test grabado láser en pronterface. Fuente: Autor.

Una vez hecho lo anterior se le da en la opción “print” para que hacer el grabado láser. Y

Los resultados son los siguientes:

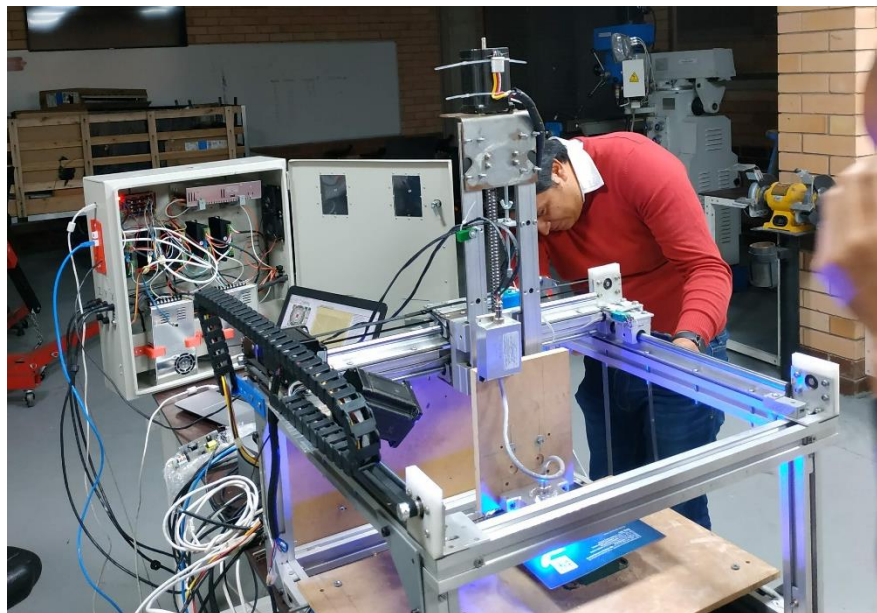


Figura 13.13 Controladora realizando corte láser. Fuente: Autor.

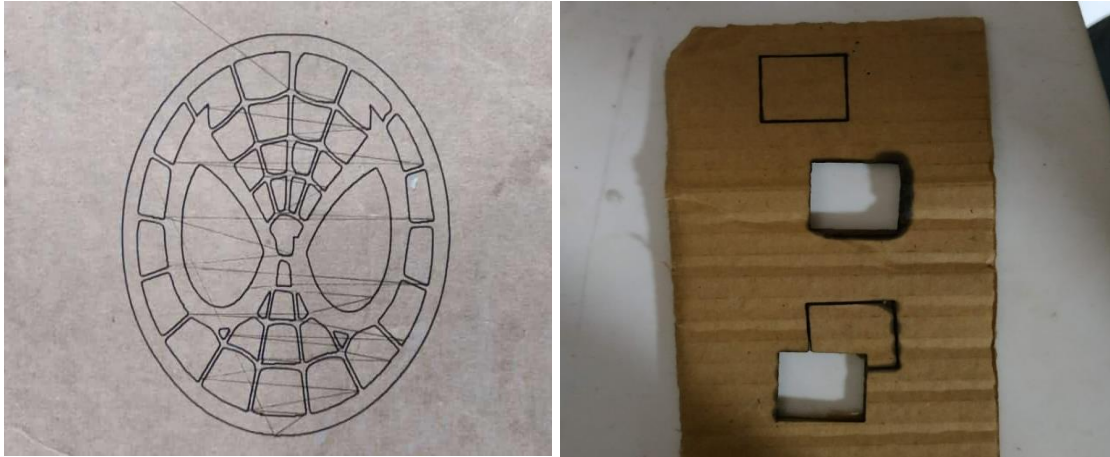


Figura 13.14 Prueba grabado láser en carton. Fuente: Autor.



Figura 13.15 Pruebas grabado láser en papel. Fuente: Autor.

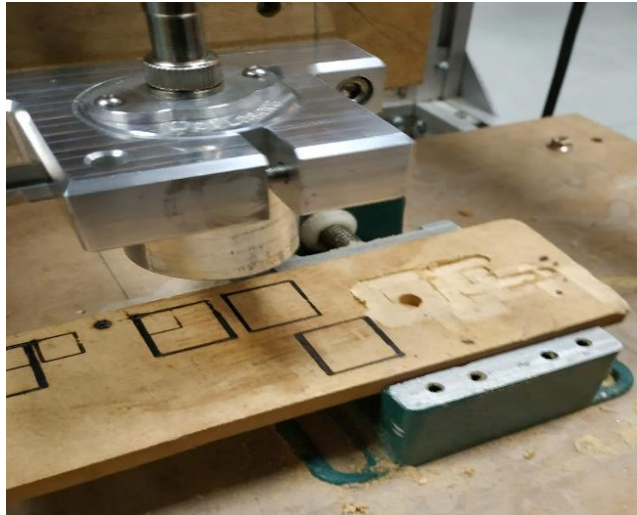


Figura 13.16 Pruebas grabado láser en madera. Fuente: Autor.

## 14. OTROS APORTES DERIVADOS DEL PROYECTO

Este proyecto beneficio en gran medida al autor, donde los conocimientos adquiridos lo inspiraron a crear proyectos interesantes construyendo así un aprendizaje autodidacta para toda la vida, llevándolo a resolver problemas y crear productos de valor con ayuda de una impresora 3D con el fin de cubrir una necesidad en la vida real, fortaleciendo así sus conocimientos teóricos y prácticos.

A continuación, se mostrará el proyecto de más valor que fue inspirado por este trabajo de grado, con ayuda de una impresora 3D y el programa de diseño de SolidWorks.

### **14.1 Diseño asistido por computador (CAD) y Fabricación asistida por computador (CAM) del tren de aterrizaje del dron DJI f550 de la facultad de ingeniería Electrónica USTA Tunja.**

El tren de aterrizaje de un dron es muy importante ya que se necesita para que el dron pueda despegar y aterrizar adecuadamente, más cuando se le añaden aditamentos en la parte de abajo del dron, como cámaras, baterías, gimbal, entre otros. Partiendo de esto, la idea en un principio fue crear unos soportes personalizados para el dron que además de ello tuvieran el valor añadido de poder plegarse, para que el dron se pudiera guardar en cualquier parte y no ocupara una gran área “vacía”, satisfaciendo las necesidades de diseño, ergonomía y funcionalidad.



Figura 14.1 Dron de la facultad antes de los soportes. Fuente: Autor.

Para ello se hizo revisión de algunos diseños que hay en internet para dar una lluvia de ideas y así idealizar un buen diseño, se descubrió que una excelente manera de hacerlo era en las pequeñas placas que tiene el chasis del dron, como se ve en la siguiente figura.



Figura 14.2 Pequeña placa del chasis del dron. Fuente: Autor.

El dron tiene 6 de estas placas de geometría rara debajo de los motores brushless y ahí fue la parte escogida del dron para realizar los 6 soportes, se procedió a tomar las medidas correspondientes para realizar la etapa fija que iría encastrada en aquella geometría extraña y se procedió a realizar el CAD en el programa de SolidWorks.

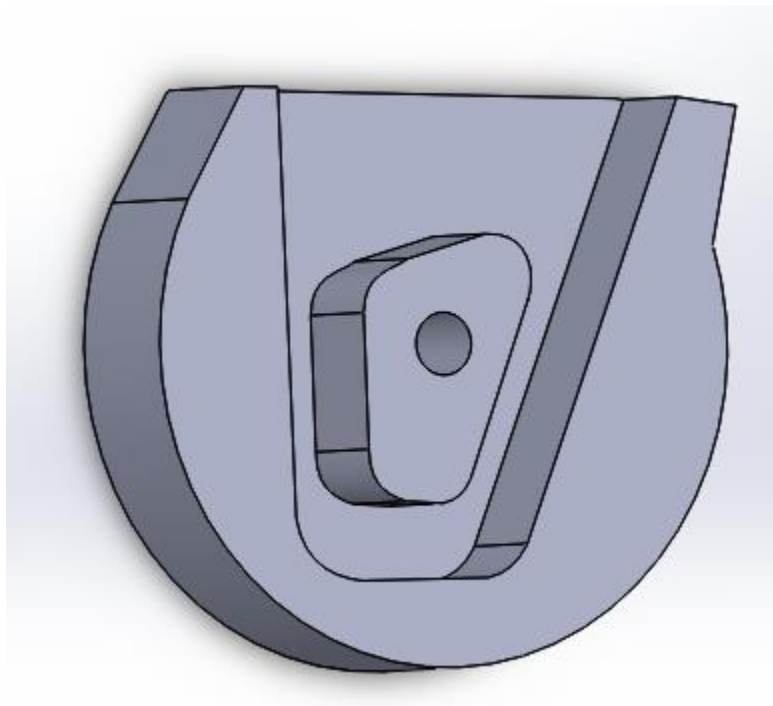


Figura 14.3 Diseño del soporte fijo Version 1. Fuente: Autor.



Figura 14.4 Fabricación del soporte fijo Version 1. Fuente: Autor.

Lastimosamente la primera version no resulto ya que la toma de medidas de esa geometria extrana eran complicadas de tomar, sin embargo se aprendio de los errores y se modificaron los valores de las medidas en el diseño.



Figura 14.5 Fabricación del soporte fijo Version 2. Fuente:Autor.

y satisfactoriamente encajo en la placa sin que se tuviera que hacer mucha fuerza para acoplar ya que fue hecho a la medida. Habiendo terminado esta etapa se procedio a realizar la ultima, que consistia en realizar el soporte plegable para cada uno de los puntos de apoyo del dron.

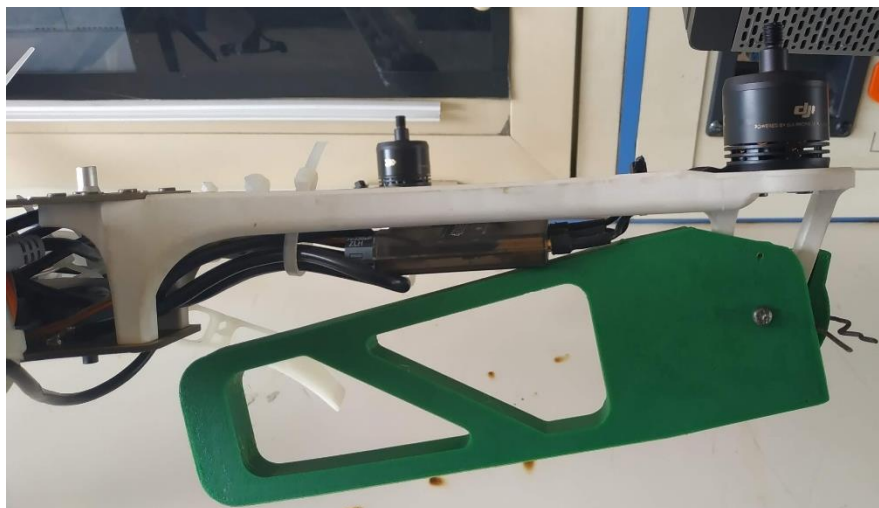


Figura 14.6 Soporte plegable para cada una de los puntos de apoyo del dron Version 1.

Fuente: Autor.

En la figura anterior se ve como quedo el soporte, pero lastimosamente no era un producto ergonómico y funcional, ya que como se puede observar hacia contacto con el controlador ocasionando que se pudiera dañar con el tiempo. Asi que se decidio tomar de nuevo las medidas para de cada una de las patas del dron.



Figura 14.7 Toma de medidas al controlador. Fuente: Autor.



Figura 14.8 Toma de medidas de la distancia del soporte al controlador. Fuente: Autor.

Se hizo de nuevo el diseño teniendo en cuenta los parámetros de diseño y el resultado fue el siguiente:

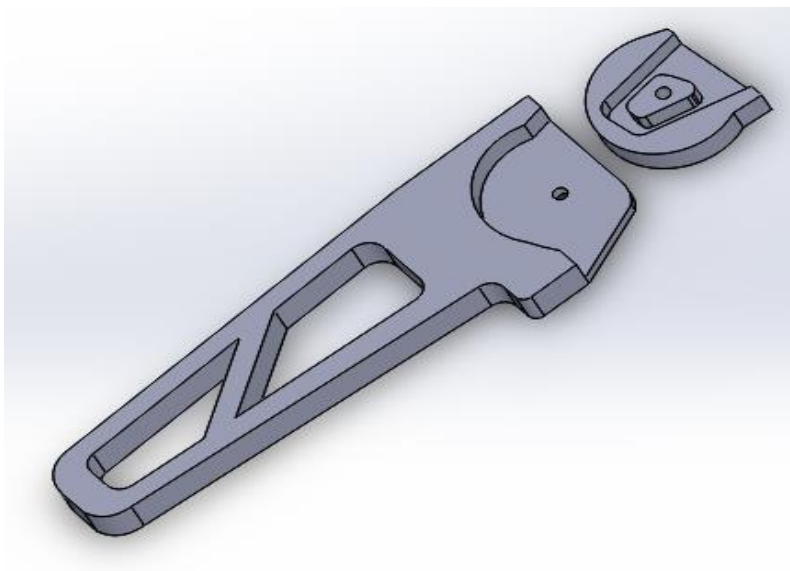


Figura 14.9 Diseño final de cada una de los soportes plegables para el dron. Fuente:

Autor.

Se arreglo el diseño y después se procedió a su fabricación por medio de una impresora 3D. El resultado fue el siguiente.



Figura 14.10 Imprimiendo el soporte fijo Version Final. Fuente: Autor.

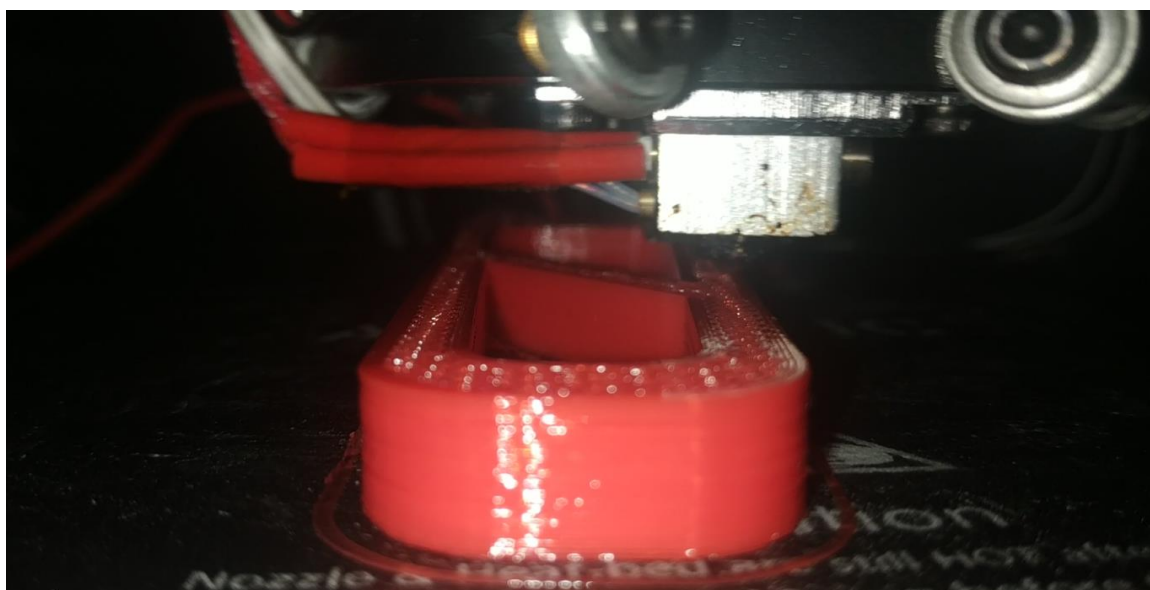


Figura 14.11 Imprimiendo el soporte plegable para cada uno de los puntos de apoyo del dron Version Final. Fuente: Autor.



Figura 14.12 Fabricación del soporte fijo Version Final. Fuente: Autor.

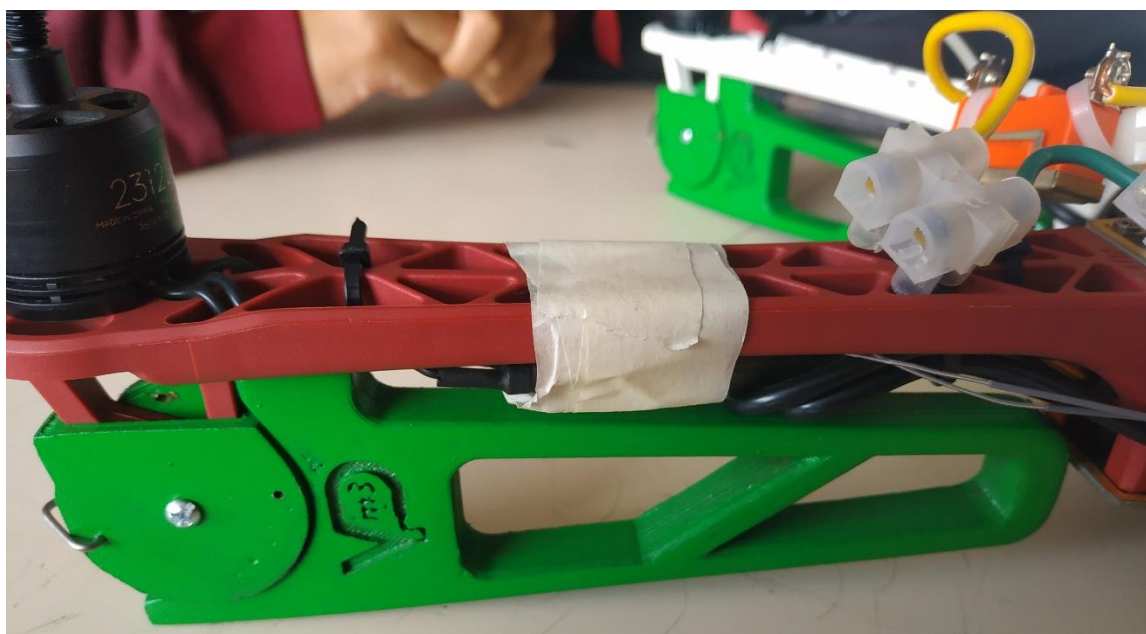


Figura 14.13 Soporte plegable del dron Version Final. Fuente: Autor.

Los soportes plegado protegen los drivers y hacen que el punto de apoyo se distribuya en el chasis sin afectar el chasis del dron, dándole una mayor vida útil a largo plazo.



Figura 14.14 Tren de aterrizaje desplegado y plegado del dron. Fuente: Autor.

Hay un clip en R en cada uno de los soportes plegables del dron, que sirve como seguro para plegar o desplegar el tren de aterrizaje. Este producto cumple con el cumplimiento de todas las necesidades planteadas por el cliente, siendo un producto funcional, eficiente y ergonómico.

## 15. CONCLUSIONES

- Dada la delimitación de la máquina CNC para aplicaciones didácticas y las restricciones de presupuesto disponible en el proyecto de investigación que enmarca este trabajo, las necesidades más importantes de los usuarios o clientes de la máquina identificadas son: Bajo costo de desarrollo y operación, Flexibilidad, facilidad de instalación, operación y mantenimiento, fiabilidad, y ergonomía.
- De acuerdo a las necesidades identificadas, los requerimientos técnicos de diseño principales que permiten dar cumplimiento al objetivo propuesto son: el desarrollo de un sistema de control modular externo a la estructura mecánica, con una cubierta de protección frente a condiciones ambientales desfavorables para un equipo electrónico como polvo virutas metálicas, vibraciones, ruido eléctrico y humedad. Además, fue fundamental garantizar la facilidad de instalación y operación a través de la estandarización de las conexiones entre el controlador y la estructura mecánica. La utilización de controladores, motores y cableado de tipo industrial, proporciona robustez y fiabilidad a la máquina.
- Por otra parte, el uso de herramientas de software y hardware libre, permite una alta flexibilidad y adaptación de la máquina a diferentes herramientas y posibilidades de configuración, además de facilitar futuras actualizaciones y mejoras.
- El software Marlín para el sistema de control modular fue adaptado para que se permitan los 3 procesos de manufactura: Impresión 3D, fresado CNC y corte de materiales blandos y se realizaron sus respectivas pruebas de funcionamiento con la estructura mecánica disponible en el laboratorio de ingeniería mecánica.

- Las pruebas de funcionamiento del proceso de fresado, el más crítico para la estructura mecánica, fueron adecuadas, permitiendo el seguimiento de las trayectorias de fabricación definidas desde el código de control numérico. De igual manera, las pruebas realizadas con el corte por láser, en cuanto al sistema de control fueron correctas. Fue posible el grabado de figuras en 2D y el corte de materiales como papel y cartón.
- En lo referente al proceso de impresión 3D, el controlador, en conjunto con la estructura mecánica funcionó de la forma esperada, permitiendo la fabricación de piezas con geometrías básicas en PLA. Sin embargo, dado que el proceso de impresión 3D requiere de una calibración precisa de los diferentes parámetros que afectan la calidad de impresión, como velocidades, aceleraciones, temperaturas, características de capa, material, relleno entre otras. Es necesario realizar un proceso de calibración más riguroso frente a las nuevas características de la estructura mecánica.
- Se generó el manual de operación y mantenimiento del sistema modular, en donde se explica de forma práctica cómo realizar la conexión del controlador con la estructura mecánica, para cada uno de los procesos de fabricación disponibles, así como tareas periódicas de mantenimiento necesarias para el correcto funcionamiento de la máquina.
- El sistema de control modular desarrollado facilita el mantenimiento porque los módulos electrónicos pueden reemplazarse fácilmente frente a averías, y además se disminuye las posibilidades de fallos al proteger al controlador de un ambiente

hostil como es el laboratorio de procesos de manufactura de ingeniería mecánica en el que constantemente se generan virutas de partículas conductoras, polvo, ruido eléctrico y vibraciones. Actualmente hay una impresora 3D en mantenimiento en el laboratorio de procesos de ingeniería mecánica debido a la exposición a estas condiciones ambientales.

- Aunque solo ha sido posible la realización de pruebas iniciales de funcionamiento, la máquina desarrollada puede ser utilizada como una herramienta importante de aprendizaje de procesos de fabricación, que genere una experiencia, habilidad y las competencias para la operación de máquinas de tipo industrial.
- Contar con una controladora intercambiable facilita la operación (el usuario solo se familiariza con un tipo de controlador, conectores, energización) y facilita el mantenimiento y reparación porque se estandarizan los componentes.

## 16. RECOMENDACIONES

- El desarrollo de un producto específico, en este caso con restricciones importantes en cuanto al presupuesto disponible, a la aplicación didáctica y a la flexibilidad de la máquina, fue un reto grande para el equipo de trabajo del proyecto de investigación. Encontrar una solución correcta desde la ingeniería a una aplicación real necesita de creatividad y, sobre todo, del trabajo interdisciplinar, en este caso desde las disciplinas de electrónica, mecánica y sistemas. Por lo tanto, es recomendable aprender de esta experiencia y continuar en trabajos futuros fomentando el desarrollo de proyectos en conjunto que, como se observa en este trabajo, permiten la obtención de soluciones más adecuadas a las necesidades presentes en nuestro entorno.
- A nivel personal, Fue de gran importancia haber tenido con anterioridad conocimientos en áreas como circuitos, microcontroladores y programación en el lenguaje C++ que permitieron en gran medida el desarrollo del controlador y la realización de las configuraciones del código de Marlin y todo lo que este software puede ofrecer para controlar los sensores de una impresora 3D, además se puede hacer uso de diferentes pines pwm de la shield RAMPS para controlar un láser o spindle.

## 17. Bibliografía

- 3DHUB. (s.f.). *www.3dhub.es*. Obtenido de <https://www.3dhub.es/historia-de-la-impresion-3d/>
- 3Dprinting. (s.f.). *3Dprinting.com*. Obtenido de <https://3dprinting.com/pricewatch/industrial-3d-printer/colido-mega/>
- A.N.M, A., Murshiduzzamana, T. S., & Raisuddin, K. (2017). Design and Development of a Hybrid Machine combining Rapid. *Procedia Engineering*, 163-170. Obtenido de ScienceDirect.
- Allegro. (s.f.). <https://www.alldatasheet.com>. Obtenido de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/455036/ALLEGRO/A4988.html>
- Amazon. (s.f.). *Amazon.com*. Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/500W-Spindle-Kit-Mini-m%C3%A1quina/dp/B07C1TBZC3>
- Arduino. (s.f.). <https://www.arduino.cc>. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560>
- Centro de análisis y prospectiva gabinete técnico guardia civil. (2016). *intranet.bibliotecasgc.bage.es*. Obtenido de [https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local\\_repository/documents/17854.pdf](https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf)
- descubrearduino. (s.f.). *descubrearduino.com*. Obtenido de <https://descubrearduino.com/arduino-mega/>
- Dinero. (2018). *Dinero.com*. Obtenido de <https://www.dinero.com/empresas/articulo/casos-de-impresion-3d-en-colombia/260785>
- Edupan. (2019). Edupan.com. *Top 5 impresoras 3d todo en uno*. Obtenido de <http://edupan.com.pa/2019/04/12/top-5-impresoras-3d-todo-en-uno/>
- Hsieh, C. (2018). Developing Low Cost and Smart Laser-based Paper Cutter based on Open Source 3D Printer. *IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)*, 109-112.
- João Brázio. (s.f.). <https://marlinfw.org/>. Obtenido de <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>
- León, M., & Jersson, X. (2013). *Diseño de un prototipo de impresora 3D que aplica la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida*. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2470>
- Longsmotor. (s.f.). *Longsmotors.com*. Obtenido de <https://www.longsmotor.com/stepper-motor-driver-dm542a-2.html>
- machines, M. (s.f.). *moebyus.com*. Obtenido de <https://moebyus.com/impresoras-3d/128-m3-impresora-3d-de-un-metro-cubico.html>
- marlinfw. (s.f.). <https://marlinfw.org/>. Obtenido de <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>
- newport. (s.f.). *www.newport.com*. Obtenido de [https://www.newport.com/medias/sys\\_master/images/images/hf6/hf0/8798082596894/Fig-13-S-600w.gif](https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/hf6/hf0/8798082596894/Fig-13-S-600w.gif)

- Opt Lasers. (s.f.). *Optlasers.com*. Obtenido de <https://optlasers.com/info/post/clh-25005000-engraving-laser-head>
- pepegreen. (s.f.). *pepegreen.com*. Obtenido de <https://pepegreen.com/awg-que-es/>
- Rúa, E., Jiménez, F., Gutiérrez, G., & Villamizar, I. (2017). 3D Printing as a Didactic Tool for Teaching some Engineering and Design Concepts. *redalyc*, 71-83. Obtenido de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/4988/498858053005/498858053005.pdf>
- Sameer, K., & Edna, H. C. (2018). The Trends and Challenges of 3D Printing. <https://www.researchgate.net/>. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/325895113\\_The\\_Trends\\_and\\_Challenges\\_of\\_3D\\_Printing](https://www.researchgate.net/publication/325895113_The_Trends_and_Challenges_of_3D_Printing)
- Shahid, M. T., Khan, M. A., & Khan, M. Z. (2019). Design and Development of a Computer Numeric Controlled 3D Printer, Laser Cutter and 2D Plotter all in one machine. *IEEE*, 569-575.
- Shivakumar, T., Sravan, M. S., & Selvajothi, K. (2016). Python based 3-Axis CNC plotter. *2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, (págs. 823-827). Melaka.
- smartie store. (s.f.). <https://smartie.store/>. Obtenido de <https://smartie.store/wp-content/uploads/2019/01/Guidance-how-to-connect-laser-to-3D-printers-and-CNC-machines.pdf>
- somosmakeR. (s.f.). <https://somosmaker.com/>. Obtenido de <https://somosmaker.com/tairona/tairona-prusa/>
- Stepperonline. (s.f.). *Stepperonline.com*. Obtenido de <https://www.omc-stepperonline.com/download/23HS45-4204S.pdf>
- Suárez, J. (Febrero de 2015). <https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/>. Obtenido de <https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/88/1/SuarezLunaJohovaniM%20MMANAV%202015.pdf>
- toninadal.frax3dr. (s.f.). <http://toninadal.frax3d.com>. Obtenido de <http://toninadal.frax3d.com/impresoras-fff-extrusor>
- Tran, N.-H., Nguyen, V.-C., & Nguyen, V.-N. (2017). *semanticsscholar.org*. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/3da0/527f69c5e8f823db868c364034d0d861bddf.pdf>
- Vistrónica. (s.f.). *Vistrónica.com*. Obtenido de <https://www.vistronica.com/impresora-3d-y-cnc/spindle-o-husillo-12000-rpm-110vdc-er11-500w-soporte-detail.html>
- Wei-chen, L., Ching-chih, W., & Shan-Chen, C. (1 de Mayo de 2014). Development of a Hybrid Rapid Prototyping System. Obtenido de sciencedirect.com: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401361400171X?via%3Dihub>

## **18. ANEXOS**

1. Manual de operación y mantenimiento del sistema de control modular (SCM)
2. Programa sistema de control modular (SCM)