



Diseño e implementación de una máquina de control numérico por computadora (CNC) de tres ejes para la fabricación de placas de circuito impreso (PCB).

Kevin Alejandro Pérez Ramos

20441728445

Jeferson Stid Cerquera Ortiz

20441725935

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2022

Diseño e implementación de una máquina de control numérico por computadora (CNC) de tres ejes para la fabricación de placas de circuito impreso (PCB).

Kevin Alejandro Pérez Ramos

Jeferson Stid Cerquera Ortiz

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

Ingeniero Electrónico

Director (a):

Ing. Eduard Armando Rodríguez Vásquez

Línea de Investigación:

Automatización de procesos.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

Contenido

Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
Planteamiento del Problema	16
Objetivos	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	17
Justificación	18
1. Marco Teórico	19
1.1. Control Numérico por Computadora	19
1.1.2. Sistema de control.....	20
1.1.3. Programación Código G	20
1.2. Placas de Circuito Impreso (PCB)	21
1.2.1. Tipos de Circuito impreso.....	23
1.2.2. Tipos de ensamblaje.....	24
1.2.3. Diseño de un circuito Impreso	25
2. Metodología	27
2.1. Implementación Mecánica	28
2.1.1. Diseño CAD.....	29

2.1.2. Ensamblaje.....	30
2.2. Implementación Eléctrica y Electrónica.....	31
2.2.1. Hardware de Control.....	31
2.2.2. Motores	34
2.2.3. Controlador A4988	39
2.2.4. Fuente.....	41
2.2.6. Montaje Electrónico y calibración.....	42
3. Resultados.....	53
3.1. Guía práctica de funcionamiento	56
4. Conclusiones	63
Anexos.....	65
Enlaces	70
Referencias Bibliográficas.....	71

Listas de Figuras

Figura 1 , Movimiento espacial CNC.....	19
Figura 2 , Lazo de Control	20
Figura 3 , Componentes montados sobre PCB	22
Figura 4 , PCB de una sola capa.	23
Figura 5 , PCB con doble capa.	24
Figura 6 , PCB multicapa.....	24
Figura 7 , Conexión de componentes SMD - SMT.	25
Figura 8 , Conexión de componentes THT - PTH.....	25
Figura 9 , Método de diseño de Christopher Alexander	27
Figura 10 , Diseño renderizado CNC.....	30
Figura 11 , CNC Parcialmente Ensamblada.	30
Figura 12 , Hardware de Control.	33
Figura 13 , Motores NEMA 17 (17HS3401)	35
Figura 14 , Motor Spindel 775-DC.....	36
Figura 15 , Controlador A4988.....	39
Figura 16 , Fuente de voltaje S-150-24.....	41
Figura 17 , Enchufe AC-01	42
Figura 18 , Montaje Componentes Electrónicos.....	43
Figura 19 , Ajuste de los Controladores.	44
Figura 20 , XLoader.....	44
Figura 21 , Firmware Cargado a la Placa.....	45
Figura 22 , Grblcontrol (Candle)	45

Figura 23, Parámetros Iniciales.	46
Figura 24, Configuración Inicial Pasos del Motor.....	46
Figura 25, Comprobación Movimiento de los ejes.....	47
Figura 26, Primera Prueba de Calibración.....	47
Figura 27, Calibración eje 'X'.	48
Figura 28, Segunda Prueba de Calibración.....	48
Figura 29, Parámetro Final de Calibración.....	49
Figura 30, Valor inicial eje 'Z'.	49
Figura 31, Valor final eje 'Z'.	50
Figura 32, Prueba Ancho de pistas.	51
Figura 33, Prueba de Funcionamiento - Pistas.	51
Figura 34, Prueba de Funcionamiento - Perforación.	52
Figura 35, Prueba de Funcionamiento - Corte.	52
Figura 36, Prueba de Funcionamiento - Resultado.....	52
Figura 37, Vista Explosionada CNC.....	53
Figura 38, Vista Frontal CNC.....	53
Figura 39, Vista Lateral Izquierda CNC.....	54
Figura 40, Vista Posterior CNC.....	54
Figura 41, Vista Lateral Derecha CNC.....	54
Figura 42, Z-Probe.	55
Figura 43, Conexión Z-probe.....	55
Figura 44, Diagrama esquemático - Astable.....	56
Figura 45, Diagrama esquemático - Monoestable.	56

Figura 46, Simulación Circuito Astable.	58
Figura 47, Simulación Circuito Monoestable	59
Figura 48, Diseño PCB – Astable.	59
Figura 49, Diseño PCB- Monoestable.	59
Figura 50, Circuitos en Baquelita.	60
Figura 51, Montaje de componentes.	60
Figura 52, Circuito Monoestable - Case.	62
Figura 53, Circuito Astable - Case.	62

Lista de Tablas

Tabla 1, Códigos G	21
Tabla 2, Criterio de evaluación Hardware de Control	33
Tabla 3, Algunas especificaciones de los motores paso a paso.	34
Tabla 4, Configuración Pasos x Vuelta.....	35
Tabla 5, Características Spindle 775.....	37
Tabla 6, Velocidad de corte según la broca	38
Tabla 7, Información Brocas-Fresas.	38
Tabla 8, Características del DRV8825.....	40
Tabla 9, Calibración eje 'X', 'Y' y 'Z'.....	50

Lista de Ecuaciones

Pasos del Motor.....	36
RPM para el Corte	37
Corriente Controladores.....	40
Voltaje Controladores	40
Ajuste de Pasos	47
Frecuencia de Salida	57
Ciclo de Trabajo.....	57
Periodo	57
Tiempo Promedio.....	61
Porcentaje de Error	61

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de una máquina de control numérico por computadora (CNC) para la fabricación de placas de circuito impreso (PCB), la cual se plantea como una forma de incentivar el desarrollo de habilidades para el diseño y fabricación de PCB's, las cuales son de importancia en diversas áreas profesionales de la ingeniería electrónica.

Como resultado se obtiene una maquina CNC con unas características físicas de 380mm de ancho, 310mm de fondo y 270mm de altura, su área de trabajo soporta placas de circuito no mayores a 280mm x 130mm; como hardware, se utiliza el circuito integrado 'Atmega328P' el cual se encuentra ensamblado a la placa de control. Por último, se desarrolla una guía práctica de funcionamiento con la cual se pretende instruir sobre el manejo de la máquina.

Palabras clave: CNC, CDIO, PCB.

Abstract

This paper presents the design and implementation of a computer numerical control (CNC) machine for the manufacture of printed circuit boards (PCB), which is proposed to encourage the development of design and manufacturing skills. PCB's, which are important in various professional areas of electronic engineering.

As a result, is obtained a CNC machine with physical characteristics of 380mm wide, 310mm deep and 270mm high, its work area supports circuit boards no larger than 280mm x 130mm; As hardware, the integrated circuit 'Atmega328P' is used, which is assembled to the control board. Finally, a practical operating guide is developed with which it is intended to instruct on the handling of the machine.

Keywords: CNC, CDIO, PCB.

Introducción

La tecnología CNC, ha presentado grandes avances a través de los años, logrando reducir su tamaño y el de sus componentes electrónicos, en estas máquinas una computadora se encarga de controlar el movimiento cartesiano de sus ejes y velocidad de sus motores. Esto se logra a partir de un ‘código G’ el cual le da las instrucciones al ordenador de cómo moverse para fabricar la pieza o componente deseado. En la actualidad es una herramienta de uso común en la industria, ya que presenta grandes beneficios en la automatización de procesos, permitiendo así, un desarrollo en la producción de una forma más segura para los trabajadores, más eficientes y a un costo significativamente menor.

Hoy en día, existen muchas herramientas para construir una CNC por cuenta propia, contando en el mercado con placas ‘plug & play’, la cuales facilitan la implementación debido a que solo se debe conectar los componentes a sus respectivos puertos y el equipo ya estaría en condiciones de funcionamiento; por otra parte, se tiene los ‘Computadores de una sola placa’ o ‘Single-Board Computer’(SBC) tales como Arduino o Raspberry Pi, estas son similares en funcionamiento a las anteriormente mencionadas.

En la Universidad Antonio Nariño, sede Neiva, no se cuenta con este tipo de equipamiento para la fabricación de placas de circuito impreso (PCB). Por tal razón, se presenta el diseño e implementación de una máquina CNC para el desarrollo de PCB, esto se describe a lo largo de este Trabajo de Grado, el cual se encuentra dividido en cuatro capítulos.

En el primer capítulo se realiza una búsqueda bibliográfica y se indaga en los conceptos fundamentales del tema en cuestión; en el segundo capítulo se muestra el diseño del equipo y de sus diferentes piezas y la selección de los componentes electrónicos; en el tercer capítulo, se

presentan los resultados obtenidos, el desarrollo de una guía práctica de funcionamiento del equipo en cuestión y, por último, en el capítulo cuatro, se presentan las conclusiones del presente trabajo.

Planteamiento del Problema

El método más usado y extenso para la fabricación de PCB es el denominado “método químico”, en el que se emplea cloruro de hierro para delimitar las pistas del circuito en una placa fenólica de baquelita, el uso de este ácido conlleva riesgos para la persona que lo manipula, los cuales pueden ser posibles irritaciones o quemaduras en la piel y en caso de inhalación se puede llegar a presentar irritación en la nariz y dificultad para respirar. (New Jersey Department of Health and Senior Services, 1998)

Generalmente, los docentes de la sede Neiva, que se encargan de impartir las asignaturas teórico-prácticas de ingeniería electrónica, establecen el desarrollo de las prácticas de laboratorio para los estudiantes, sin tener en cuenta una posterior implementación de esta en una placa de circuito impreso, de este modo, perdiendo la oportunidad de desarrollar habilidades en el área de diseño y fabricación de placas de circuito impreso.

La no enseñanza de lo anteriormente mencionado se puede percibir como una problemática, ya que las metodologías adoptadas por la facultad es la iniciativa CDIO y la taxonomía de Bloom. En la iniciativa CDIO, cada letra hace referencia a un módulo, los cuales son concebir, diseñar, implementar y operar, en pocas palabras, esta iniciativa establece que el medio adecuado para la enseñanza educativa en ingeniería es mediante el desarrollo e implementación de productos y sistemas. En el caso del programa de Ingeniería Electrónica, en ciertas asignaturas, se puede evidenciar una falta en el desarrollo de los módulos de

“implementar” y “operar”, pues la primeramente mencionada hace referencia a la transformación del diseño en un producto funcional, incluyendo la fabricación y realización de pruebas; por otra parte, el módulo operar, hace referencia a la ejecución y mantenimiento del producto elaborado, en ambos casos, los laboratorios se limitan únicamente al montaje en protoboard, sin pensar en un posterior diseño e implementación en una placa de circuito impreso (PCB). (Universidad Antonio Nariño, s.f.) (The CDIO™ Standards, 2004)

Considerando lo anteriormente mencionado, se plantea como problema de investigación, indagar sobre la respuesta al siguiente cuestionamiento: ¿Como incentivar el desarrollo de habilidades en diseño, fabricación e implementación de placas de circuito impreso (PCB) en las prácticas de laboratorio para las asignaturas del programa de ingeniera electrónica sede Neiva?

Objetivo General

Diseñar e implementar una máquina CNC aplicada a la fabricación de placas de circuito impreso para el laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad Antonio Nariño, sede Neiva.

Objetivos Específicos

- Determinar parámetros electromecánicos y físicos para el diseño de la CNC.
- Seleccionar el software y el tipo de conexión para la adquisición de datos en el equipo.
- Calibrar los controladores de los motores ‘X’, ‘Y’ y ‘Z’ y seleccionar el motor de fresado con base en los cálculos realizados.
- Implementar parte mecánica y electrónica para efectuar las respectivas pruebas y ajustes.
- Desarrollar una guía práctica para la comprensión del funcionamiento de la CNC.

Justificación

Se cree necesario que la Universidad Antonio Nariño empiece a instruir a los estudiantes de Ingeniería Electrónica en el diseño y la fabricación de placas de circuito impreso, ya que, en la actualidad, la industria del desarrollo de PCB ha experimentado un rápido crecimiento en el transcurrir de los años a causa de los avances tecnológicos, entre ellos, la rápida adopción del Internet de las Cosas (IoT) en la industria y en la electrónica de consumo (Blundell, 2018). El desarrollo de este tipo de habilidades puede favorecer a los futuros egresados, ya que en ciertas áreas de la ingeniería se requiere personal cualificado en el diseño y desarrollo de placas de circuito. (Bogatin, s.f.) (Aranguren, Etxaniz, & López-Nozal, 2012)

Por tales razones, se propone la implementación y desarrollo de una máquina CNC para el laboratorio de Ingeniería Electrónica sede Neiva, que sea capaz de ofrecer resultados y acabados de una buena calidad.

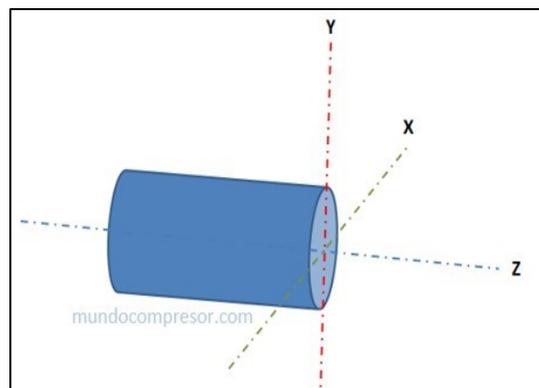
Se dará un valor agregado a la máquina, diseñando una guía práctica de funcionamiento, con el fin de adquirir los conocimientos básicos para el manejo del equipo en cuestión, de este modo, acercar a los estudiantes y docentes al diseño y fabricación de placas de circuito impresos (PCB).

1. Marco Teórico

1.1. Control Numérico por Computadora

Una máquina de control numérico por computadora (CNC), es un equipo electromecánico que permite la automatización y fabricación de piezas en diversos materiales. El funcionamiento de este equipamiento se logra, mediante la programación en código G de las coordenadas de la pieza a fabricar, esto permite controlar la posición y velocidad de los motores encargados del movimiento de los ejes X, Y, y Z. (ver figura 1)

Figura 1, Movimiento espacial CNC.



Fuente: <https://bit.ly/39DojBs>

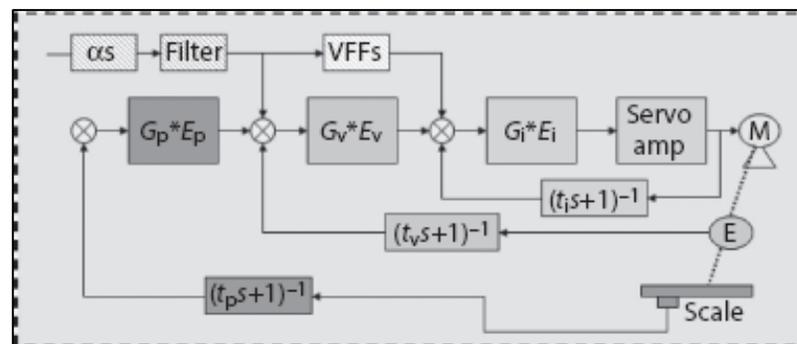
Esta tecnología tiene su origen en el año 1950, cuando se crearon las primeras máquinas de Control Numérico (NC) que funcionaban a partir de tarjetas perforadas que permitía el posterior control de los motores encargados del movimiento de los ejes. Con el pasar de los años y los crecientes avances informático de esa época, a finales de la década de 1960 se logró la implementación de una computadora a un equipo NC, de este modo, creando una CNC y consiguiendo un equipo más potente, robusto y flexible. (Geng, 2016)

En la actualidad los dispositivos de control numérico por computadora son una pieza fundamental en la industria ya que han venido remplazando a los trabajos manuales en la producción manufacturera, principalmente por la reducción de costos y rentabilidad a largo plazo. (Sinha, 2010)

1.1.2. Sistema de control

El sistema de control en este tipo de máquinas es de lazo cerrado, este compara la posición inicial respecto a la posición de desplazamiento para restar la diferencia entre estas dos y de ese modo realizar el movimiento de los ejes, ese valor es conocido como ‘error’. Para medir la posición se suele utilizar, un codificador rotativo, el cual proporciona la retroalimentación del sistema en lazo cerrado. (Geng, 2016)

Figura 2, Lazo de Control



Fuentes: Manufacturing Engineering Handbook, 2nd Edition.

1.1.3. Programación Código G

Para la fabricación de piezas en la CNC se utiliza el lenguaje de programación de alto nivel ‘Código G’, el cual fue un estandarizado en el año 1980 con la denominación RS-274D por la ‘Electronic Industris Alliance (EIA)’, esto debido a su fácil programación y estructura, existen dos formas de programación, absoluta e incremental las cuales se habilitan con los códigos G90 y

G91, respectivamente. En la programación absoluta todas las coordenadas se dan a partir de un único punto de referencia, por otra parte, en la programación incremental, se obtienen las coordenadas a partir del punto anterior donde únicamente se escribe la letra G seguido de un número como se muestra en la tabla 1. (Geng, 2016)

Tabla 1, Códigos G

G00	01	Movimiento rápido	G69	16	Cancelar G68
G01	01	Movimiento de interpolación lineal	G70	00	Configuración circular para agujeros para tornillos
G02	01	Movimiento de interpolación Circular a mano derecha (CW)	G71	00	Arco modelo para agujeros para tornillos
G03	01	Movimiento de interpolación Circular a mano izquierda (CCW)	G72	00	Agujeros para tornillos a lo largo de un ángulo
G04	00	Pausa (Dwell)	G73	09	Ciclo preprogramado de taladro con avances cortos a alta velocidad
G09	00	Alto o paro total	G74	09	Ciclo preprogramado de roscado inverso
G10	00	Fijar desplazamientos	G76	09	Ciclo preprogramado de acabado fino cilíndrico
G12	00	Fresado de cavidad circular a mano derecha	G77	09	Ciclo preprogramado de perforado de la parte posterior cilíndrica
G13	00	Fresado de cavidad circular a mano izquierda	G80	09	Cancelar ciclo preprogramado
G17	02	Selección del plano XY	G81	09	Ciclo preprogramado de taladro
G18	02	Selección del plano ZX	G82	09	Ciclo preprogramado de taladrado de centros
G19	02	Selección del plano YZ	G83	09	Ciclo preprogramado de taladrado en avances cortos
G20	06	Seleccionar pulgadas	G84	09	Ciclo preprogramado de roscado o machuelado
G21	06	Seleccionar milímetros	G85	09	Ciclo preprogramado de perforado cilíndrico
G28	00	Retorno al cero de la máquina	G86	09	Ciclo preprogramado de alto / perforado cilíndrico
G29	00	Retorno al punto de referencia	G87	09	Ciclo preprogramado de retracción manual / perforado cilíndrico
G31	00	Saltar, omitir o pasar por alto la función	G88	09	Ciclo preprogramado de retracción manual/pausa/perforado cilíndrico
G35	00	Medición automática del diámetro de la herramienta	G89	09	Ciclo preprogramado de pausa y perforado cilíndrico
G36	00	Medición automática de los desplazamientos de trabajo	G90	03	Sistema absoluto
G37	00	Medición automática de los desplazamientos de la herramienta	G91	03	Sistema incremental
G40	07	Cancelar compensación del cortador	G92	00	Establecer coordenadas de trabajo
G41	07	Compensación del cortador a la izquierda	G93	05	Modalidad de avance de tiempo inverso
G42	07	Compensación del cortador a la derecha	G94	05	Modalidad de avance por minuto
G43	08	Compensación + de la longitud de la herramienta	G98	10	Retorno al punto inicial
G44	08	Compensación - de la longitud de la herramienta	G99	10	Retorno al plano R
G47	00	Grabado de texto	G100	00	Cancelar la imagen espejo
G49	08	Cancela G43/G44/G143	G101	00	Activar la imagen espejo
G50	11	Cancelar G51	G102	00	Salida programable al RS-232
G51	11	Escalado	G103	00	Límite del previsor de bloques
G52	00	Establecer el sistema de coordenadas	G107	00	Correlación o transformación cilíndrica
G53	00	Selección fuera de modalidad de las coordenadas de la máquina	G110-G129	12	Seleccionar del sistema de coordenadas de trabajo
G54-G59	12	Selección del sistema de coordenadas de trabajo	G136	00	Medición automática del centro del desplazamiento de trabajo
G60	00	Posicionamiento unidireccional	G143	08	Compensación de la longitud de herramienta en el 5 eje
G61	13	Alto total dentro de modalidad (Exact Stop modal)	G150	00	Propósito general de fresado de cavidad
G64	13	Cancelar G61	G174-G184	00	Roscado rígido con propósitos generales
G65	00	Llamada macro-subrutina	G187	00	Control de precisión para maquinado en alta velocidad
G68	16	Rotación			

Fuente: <https://bit.ly/3sLRwRj>

1.2. Placas de Circuito Impreso (PCB)

Las placas de circuito impreso, comúnmente conocida por sus siglas en inglés, Printed Circuit Board (PCB), es una placa de material aislante, la cual se constituye de una fina capa de cobre en la cual se graban los caminos o pistas que unen los diferentes componentes electrónicos,

estos pueden ser de una, dos o multicapas las cuales pueden estar conectadas entre sí, a través de las perforaciones. (Brihuega, 2011)

Figura 3, Componentes montados sobre PCB



Fuente: <https://bit.ly/3NqNwxB>

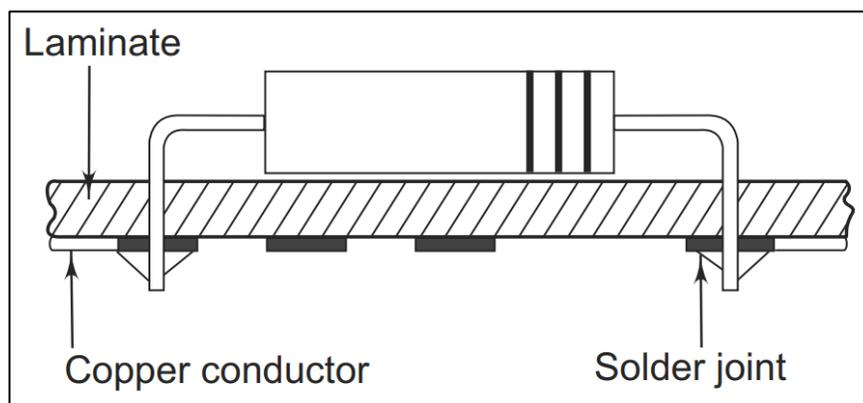
El desarrollo de circuitos impresos se remonta a principios del siglo XX, cuando en el año de 1903, Alber Hanson desarrollo un método para crear pistas metálicas conductoras de cobre o latón, en dieléctricos laminándolos y uniéndolos en papel de parafina. En 1913, Arthur Berry desarrollo el método de impresión y grabado, muy similar al usado hoy en día, para fabricar calentadores, más adelante en 1927, se le atribuye a Charles Ducas la invención del método de la galvanoplastia del patrón de circuito. Pero a quien realmente se le atribuye la creación de la primera placa de circuito es al Ingeniero Paul Eisler, quien la fabrico para el desarrollo de una radio. En el año de 1950, la armada de estados unidos, con base a los avances de Eisler, desarrollo el método de auto ensamblaje, este consistía en que cada componente se insertaba en una lámina con el patrón de conexión y posteriormente se realizaba el anclaje de los componentes con soldadura, esto fue fundamental para el bando aliado en la segunda guerra mundial para desarrollar fusibles de proximidad más fiables para municiones. (Harper, 2004)

1.2.1. Tipos de Circuito impreso

En la fabricación de placas de circuito se encuentran cinco clasificaciones principales, las cuales son de una sola capa, doble capa, multicapa, rígidas y flexibles.

PCB de una sola capa (ver figura 4), son aquellas donde se cuenta con una única capa de material conductor donde se encuentran soldados los componentes, se fabrican principalmente con el método de impresión y grabado, este tipo de tarjetas se suele emplear para desarrollar circuitos simples donde se quiera mantener los costos de producción bajos. (Khandpur R. , 2006)

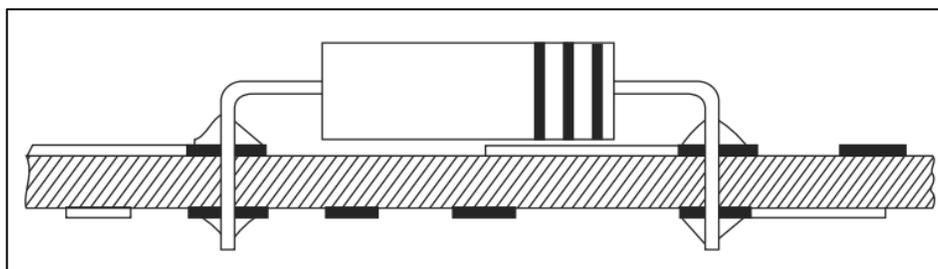
Figura 4, PCB de una sola capa.



Fuente: Printed Circuit Boards Design, Fabrication, and Assembly.

PCB de doble capa (ver figura 5), en este tipo se encuentra una capa de material conductor a ambos lados de la tarjeta, permitiendo la conexión de los componentes que se encuentran en la capa superior con la inferior o viceversa, con este método se pueden fabricar PCB más robustas y pequeñas. (Khandpur R. , 2006)

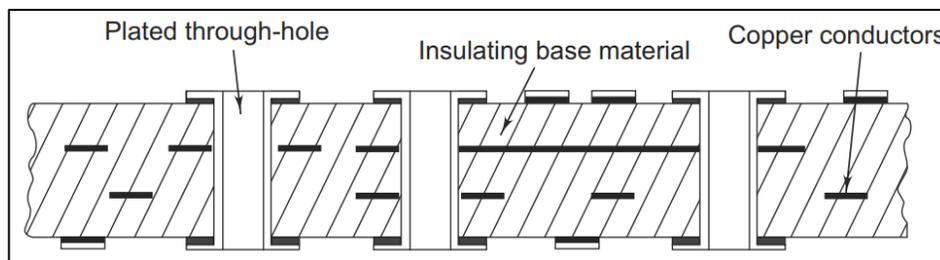
Figura 5, PCB con doble capa.



Fuente: Printed Circuit Boards Design, Fabrication, Assembly and Testing.

PCB de multicapa (ver figura 6), su principal característica es que está conformada por más de dos capas de material conductor el cual se le denomina ‘material pre-impregnado’, este se coloca entre cada capa del circuito y este se completa interconectado transversalmente las capas requeridas con orificios pasantes enchapados. (Khandpur R. , 2006)

Figura 6, PCB multicapa.



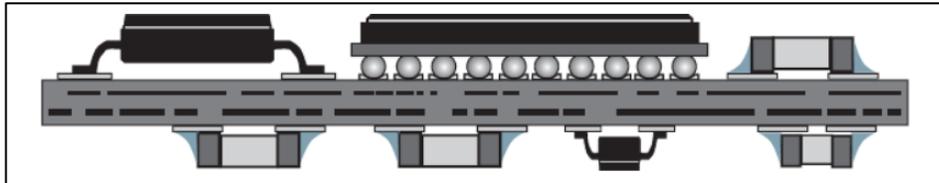
Fuente: Printed Circuit Boards Design, Fabrication, Assembly and Testing.

1.2.2. Tipos de ensamblaje

A la hora de realizar el ensamblaje los componentes a la PCB, se utilizan dos tipos de tecnologías, de montaje superficial (SMT - SMD), y el método de orificio pasante chapado (PHT - THT). En la tecnología SMT (ver figura 7), los componentes se colocan y sueldan sobre las pistas de cobre de la placa, en este método no se realizan perforaciones. El método PHT (ver figura 8), se utiliza cuando se tiene componentes con pasadores, estos se insertan en las

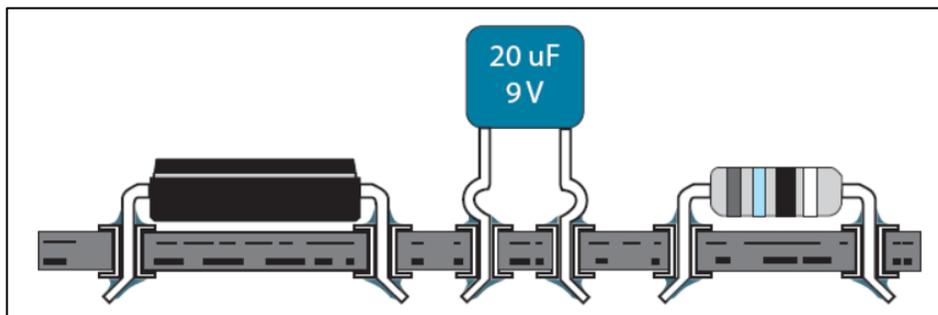
perforaciones de la placa de circuito y posteriormente se sueldan, aunque en la actualidad este método ha venido en desuso aún se suele utilizar en aplicaciones donde se requieren altas corrientes y soldaduras fuertes. (Tummala, 2019)

Figura 7, Conexión de componentes SMD - SMT.



Fuente: Fundamentals of Device and Systems Packaging.

Figura 8, conexión de componentes THT - PTH.



Fuente: Fundamentals of Device and Systems Packaging.

1.2.3. Diseño de un circuito Impreso

Al momento de desarrollar un diseño de una PCB, se deben tener ciertas consideraciones para tener un flujo de trabajo adecuado y no presentar mayores inconvenientes en el proceso. Por tal motivo, a continuación, se presenta una serie de puntos a tener en consideración para llevar a cabo esta tarea.

1. Elaborar un listado de componentes que se vayan a utilizar.

2. Pasar el diagrama esquemático al software de diseño electrónico.
3. Revisar si el software cuenta con todos los componentes requeridos, de lo contrario, cree el empaquetado de los componentes faltantes.
4. Con ayuda del software de diseño, se creará el 'Footprint' que es una primera mirada digital al esquemático en forma de PCB (a este punto debe tener en cuenta si se usara tecnología THT, SMD o una mezcla de ambas).
5. Ajustar el tamaño, pistas, orificios y componentes de tal modo que se adecue al diseño deseado y comprobar que el conexionado este debidamente realizado.

2. Metodología

Este proyecto se desarrolla mediante la metodología de diseño de Christopher Alexander, este es un método del diseño industrial el cual describe que, a partir de la identificación de una problemática en un contexto definido, se deberá estructurar la solución en seis fases, las cuales son: información, investigación, diseño, decisiones, calculo y confección del modelo (fabricación).

- Primera fase, investiga todo lo relacionado con la problemática.
- Segunda fase, indaga sobre los usuarios y el contexto en el que se desarrollara el producto.
- Tercera fase, desarrolla un diseño teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios.
- Cuarta fase, establecen los parámetros esperados del producto.
- Quinta fase, ajusta el diseño a lo establecido en la fase anterior.
- Sexta fase, construye un prototipo funcional. (Macias, 2018)

Figura 9, Método de diseño de Christopher Alexander



Fuente: Autores.

Para efectos prácticos de este trabajo de grado se agruparon determinadas fases, quedando dividido en cuatro etapas, las cuales se describen de la siguiente manera:

Primera Etapa, en esta se desarrollan las fases de información e investigación, se realiza la respectiva revisión bibliográfica y de documentación que contribuya a dar cumplimiento al objetivo de este trabajo de grado.

Segunda Etapa, se aborda las fases de diseño y decisiones, se realiza un primer diseño en el programa CAD 'Fusión 360' y se establecen los parámetros físicos, electrónicos, electromecánicos y software de la máquina CNC.

Tercera Etapa, se aborda la fase de cálculo, en esta etapa se realizan los cálculos para la selección de los componentes de control, motores y fuente de voltaje, además se lleva a cabo la calibración de estos.

Cuarta Etapa, se desarrolla la fase de Fabricación, en esta se realiza la implementación de la parte mecánica y electrónica, se efectúan pruebas de funcionamiento y se ajustan los componentes en caso de ser necesario y, por último, se presenta el desarrollo de lo abordado en la guía práctica de funcionamiento.

2.1. Implementación Mecánica

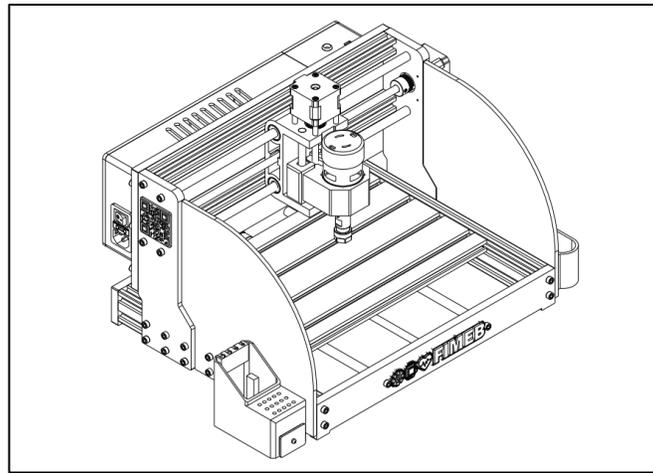
En esta fase se realiza el modelado de cada una de las piezas mecánica que conforman la estructura física de la CNC.

Para la fabricación del modelo, se toma como referencia la 'CNC3018', esto con el fin de que la maquina tenga una fácil reparación al momento de presentarse una falla en los componentes electrónicos, y en caso del daño de alguna pieza mecánica, se pueda encontrar comercialmente. Además, se estableció que la misma tenga unas dimensiones reducidas con el fin que se pueda transportar de un lugar a otro de forma rápida y sencilla.

La máquina cuenta con unas dimensiones de 380 mm de ancho, 310 mm de fondo y aproximadamente, 270 mm de altura; se compone de cuatro perfiles de aluminio, dos de 20x40x290mm y otros dos de 20x20x360mm estos se encargan de darle estabilidad a la estructura, seis varillas lisas con un diámetro de 10mm, dos de 290mm, dos de 360mm y dos de

100mm de largo, estas permiten el desplazamiento en los ejes 'x', 'y' y 'z', también cuenta con tres varillas roscadas T8 de 295mm, 365mm y 100mm, las cuales trabajan en conjunto con los motores paso a paso encargados del movimiento de los ejes. Todos los componentes se soportan en cinco piezas, las cuales se ubican en la parte frontal, lateral y posterior.

Figura 10, Dibujo diseño CNC.



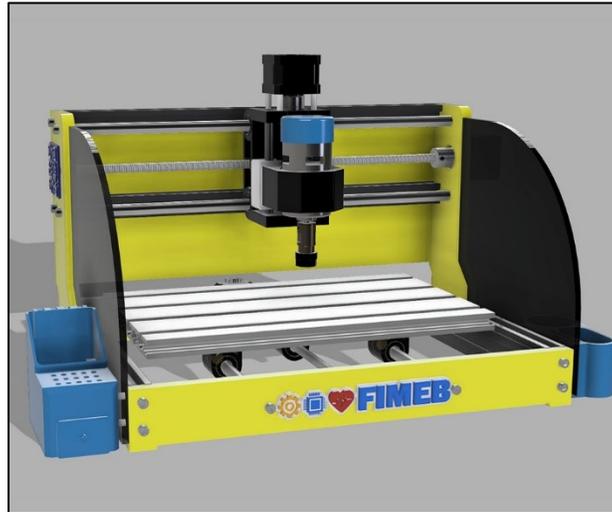
Fuente: Autores.

Por último, la máquina CNC va sobre una meza movable lo cual permite el desplazamiento de esta a los lugares donde se requiera.

2.1.1. Diseño CAD

Cada componente fue realizado y ensamblado con la ayuda del software CAD 'Autodesk Fusión 360', se empezó dibujando las piezas (de color amarillos) en las que se soportarían todos los componentes (ver figura 12), posteriormente se realizaron las piezas de metal, tales como varillas lisas, varillas roscadas, perfiles de aluminio, tornillos, rodamientos, acoples flexible y la cama de trabajo, por último, se diseñaron las piezas que se imprimen en 3D, tales como caja contenedora de componentes electrónicos y de la fuente, tapas frontales, anclajes y organizadores.

Figura 11, Diseño renderizado CNC.

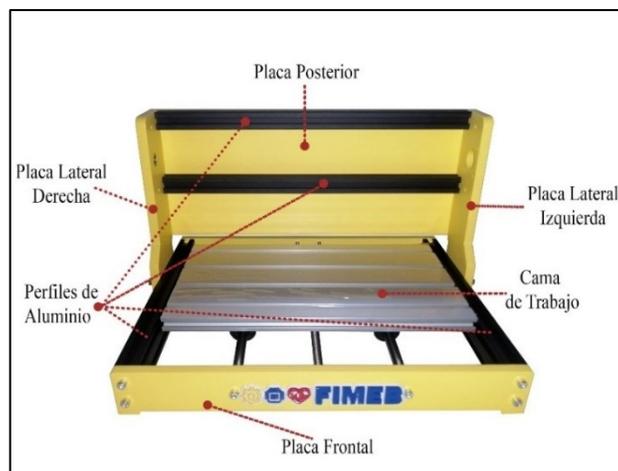


Fuente: Autores.

2.1.2. Ensamblaje

Se realiza el montaje de las piezas y se verifica que cada componente encaje según el diseño planteado ya que, en ciertos elementos, como la cama de trabajo, ha de quedar debidamente alineada al eje 'z', también se realizaron pruebas de desplazamiento manual a los tres ejes, con el fin de comprobar que el movimiento de cada uno de ellos fuera suave y sin estancamientos.

Figura 12, CNC Parcialmente Ensamblada.



Fuente: Autores.

2.2. Implementación Eléctrica y Electrónica

En esta fase del proyecto, se tuvieron en cuenta las consideraciones pertinentes para la selección de la fuente de voltaje, el hardware-software y demás componentes electrónicos que son necesarios para el funcionamiento del equipo, teniendo en cuenta que los componentes permitieran una implementación eficiente y en caso de fallas tener un amplio catálogo de información web, tales como documentos o medios de video. Por último, se implementó el firmware grbl 1.1. que es el de uso común para trabajar con hardware enfocado al control numérico computarizado, este software es de uso libre y está en constante actualización, así que, en caso de que se desee actualizar la versión del firmware, no se presentara ningún inconveniente.

2.2.1. Hardware de Control

A continuación, se realiza una comparación de tres tipos diferentes de hardware para el control de la CNC, se tuvieron en cuenta aspectos tales como la practicidad, durabilidad, dimensiones, tipos de controladores, firmware, dificultad para la resolución de fallos, número máximo de motores operables, futuras actualizaciones o mejoras del hardware y del software.

Como primera placa se tiene la CNC-Shield, es un módulo al que se le acopla un Arduino UNO, esta placa es desarrollada por 'Protoneer' la cual utiliza 'grbl' como firmware. Se caracteriza por ser un hardware OpenSource el cual permite el control de hasta tres motores independiente y un motor espejo, es decir, duplica el movimiento de un eje, su voltaje de entrada es de 12V a 36V, permite trabajar con los controladores DRV8825 y A4988. Sus dimensiones son de 69 x 53 x 19 mm, soporta hasta 6 switch de final de carrera, opera únicamente con un motor o un láser, cuenta con extensa información web ya que es el método más usado para este tipo de proyectos, es de fácil actualización, puede presentar fallos en los controladores, la

calibración puede tornarse tediosa, prestaciones limitadas de hardware. (Maker Group Global, 2018)

Como segunda opción se tuvo en cuenta la placa de control Rampas, esta es una tarjeta desarrollada por 'RepRap', la cual funciona acoplándose a un Arduino MEGA y el firmware 'Merlin', soporta hasta cinco controladores A4988, puede controlar hasta cinco motores, una cama caliente, un extrusor y un ventilador, tres termistores, hasta seis switch de final de carrera, cuenta con un puerto para la conexión de un controlador Offline LCD, funciona a 12V (para trabajar con 24V se deben realizar modificaciones a la placa) y sus dimensiones son 114 x 61 x 32 mm. Esta placa suele ser utilizada, principalmente para la implementación de impresoras 3D, aunque se puede adaptar para una CNC. (RepRap, 2021)

Por último se identificó la tarjeta 'CAMXTOOL', esta es una placa dedicada para el control de máquinas CNC, esta funciona a partir del circuito integrado Atmega328P y trabaja con el firmware 'grbl', cuenta con tres controladores integrados A4988, soporta voltajes de 12V a 24v, implementa un puerto para la conexión de un controlador Offline LCD, permite la conexión de un motor spindle y un grabador laser, hasta seis switch de final de carrera, conector para sonda de prueba, conector para ventilador, accionador automático y regulador por software del spindle, sus dimensiones son de 88 x 63 x 1.5 mm. Es de fácil configuración y actualización, ampliamente utilizada para el desarrollo de máquinas CNC y es menos propensa a fallos debido a su construcción. (SainSmart, 2020)

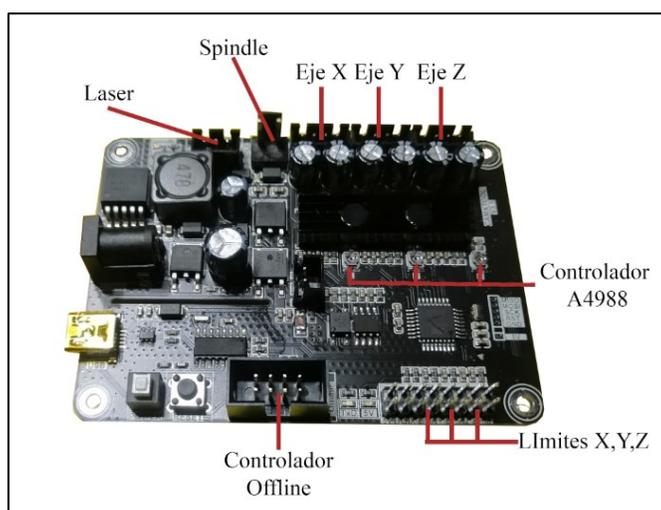
Teniendo en cuenta la información recolectada se utilizó el método de criterio de evaluación, donde se toma 5 como la calificación más alta y 1 la más baja, a continuación, se muestra una tabla con las características que se tuvieron en cuenta para la selección.

Tabla 2, Criterio de evaluación Hardware de Control

Características	Porcentaje de ponderación	CNC-Shield	Rampas 1.4	CAMXTOOL
Fiabilidad de sus componentes	0,20	2	4	4
Implementación	0,10	3	4	5
Precio	0,10	5	3	3
Durabilidad	0,14	3	3	4
Utilidades	0,1	2	4	5
Soporte	0,18	5	3	5
Actualización de software	0,12	5	4	5
Dimensiones	0,06	5	2	4
Total	1	3,62	3,46	4,4

Fuente: Autores.

Revisando los resultados ponderados de la tabla anterior, se opta por utilizar la tarjeta dedicada ‘CAMXTOOL’ para el control de la CNC ya que es la que mejor se adapta a las necesidades y requerimiento de este proyecto.

Figura 13, Hardware de Control.

Fuente: Autores.

2.2.2. Motores

Para este proyecto se utilizan tres motores NEMA 17, uno para cada eje, su función principal es transmitir su movimiento a las varillas roscadas mediante un acople flexible el cual reduce las vibraciones generadas por el movimiento. El motor encargado del fresado, corte y perforación de las baquelitas, es un motor spindle 775-DC el cual ofrece una velocidad de corte máxima de 10000 RPM a 24V.

2.2.2.1. Motor NEMA 17

Estos motores se fabrican según las especificaciones dadas por la ‘National Electrical Manufacturers Association’ (NEMA), el cual tiene como objetivo crear estándares que permita tener una contribución más sencilla entre los fabricantes y usuarios. (Electro Industria, 2009)

Tabla 3, Algunas especificaciones de los motores paso a paso.

Frame Size	Diameter (mm)	Typical Torque Range for a Stepper Motor (Nm)	Typical Speed Range for a Stepper Motor (RPM)
NEMA 8	20	0.01 - 0.04	0-1000
NEMA 11	28	0.06 - 0.12	0-1000
NEMA 14	35	0.05 - 0.5	0-1000
NEMA 16	39	0.1 - 0.25	0-1000
NEMA 17	43	0.2 - 1	0-1000
NEMA 23	57	0.5 - 3	0-1000
NEMA 24	60	1.2 - 4.6	0-1000
NEMA 34	86	3 - 12	0-1000
NEMA 42	102	12 - 20	0-1000

Fuente: <https://bit.ly/3FbGgCB>

En particular, el motor NEMA 17 es de tipo bipolar, esto hace referencia a que el flujo de la corriente es de tipo variable, tiene un ángulo de paso de $1,8^\circ$, este dato es de utilidad para determinar los pasos por vuelta, en este caso se necesitan 200 pasos para dar una vuelta

completa. Soportan cargas de 1.4V a 4V, lo que le permite generar un torque de hasta 4.2 kg/cm.

(Isaac, s.f.)

Figura 14, Motores NEMA 17 (17HS3401)



Fuente: Autores.

Un punto importante es calcular los pasos por vuelta que se emplean, aquí una tabla de configuración de los controladores:

Tabla 4, Configuración Pasos x Vuelta

MS1	MS2	MS3	Pasos x Vuelta
1	1	1	Pasos Completos
0	1	1	Medios pasos
0	1	0	1/4 de pasos
0	0	1	1/8 de pasos
1	1	1	1/16 de pasos

Fuente: Autores.

Para este proyecto se emplea el modo de ‘Pasos Completos’.

$$P_v = \frac{360^\circ}{\text{grados del motor}} \quad (1)$$

$$P_v = \frac{360}{1.8} = 200$$

Este valor se estable en el programa grbl, con el fin de calibrar el movimiento de los ejes y que, al momento de programar el desplazamiento de cierta cantidad de mm, la CNC se mueva esa misma cantidad, si no se realiza este ajuste, cuando se estén fabricando las placas de circuito, se pueden obtener resultados no deseados.

2.2.2.2. Motor Spindle 775-DC

Es un motor de corriente continua con rodamiento de bolas de precisión, se caracteriza por su alto par y gran velocidad, se pueden alcanzar hasta 10000 RPM a un voltaje de 24V, tiene un torque entre 2 a 3.8 Kg/cm y soporta una corriente máxima de 12 A.

Figura 15, Motor Spindel 775-DC.



Fuente: Autores.

En la siguiente tabla se muestran características relevantes de este motor.

Tabla 5, Características Spindle 775.

Voltaje (DC)	12 – 24 V.
Corriente Máxima(A)	12 A.
Potencia(W)	150 – 288 W.
Velocidad (RPM)	5000 – 10000 RPM

Fuente: Autores.

En otras implementaciones se suelen usar motores mucho más potentes o incluso, acoplan un motor-tool al eje 'Z' para que realice el fresado, agujeros y cortes de las piezas, esto debido a que también se busca trabajar en otros materiales diferentes a la baquelita para el grabado de circuito.

Para este proyecto, el motor 775-DC es más que suficiente para la fabricación de placas de circuito, esto basado en el cálculo de parámetros de mecanizado, donde dependiendo de la fresa y el material de trabajo, el motor deberá ser capaz de ofrecer una velocidad de desplazamiento mínima para obtener un resultado óptimo.

Para el cálculo de las RPM necesarias se utiliza la siguiente fórmula:

$$RPM = \frac{V_c * 1000}{\theta * \pi} \quad (2)$$

Donde 'V_c' es la velocidad de corte en m/min y θ es el diámetro de la broca.

La velocidad de corte es un parámetro que depende del tipo de material, para baquelita es un valor de 3 a 5 m/min, reemplazando este valor en la ecuación 2 y haciendo el cálculo para cada una de las brocas, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 6, Velocidad de corte según la broca

Broca	Diámetro(mm)	RPM
Perfilado x14mm	3.175	501,27
Perfilado x10mm	1.8	884,19
Perforaciones x3.175mm	1.0	1273,24
Perforaciones x3.175mm	1.20	1326,31
Perforaciones x3.175mm	0.8	1591,54
Punta en forma de V	0.1	9549,29

Fuente: Autores.

Tabla 7, Información Brocas-Fresas.

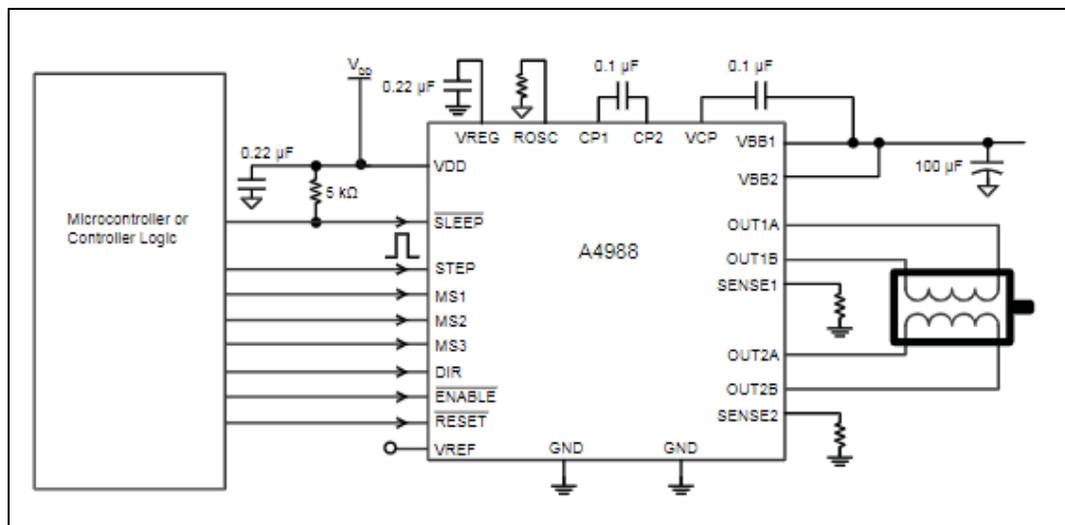
Broca	Nombre Comercial	Imagen
Perfilado x14mm	Fresa de perfilado SC/FT 3.175x14mm	
Perfilado x10mm	Fresa de perfilado SC/FT 3.175x10mm	
Perforaciones x3.175mm	Broca de 1x10.5mm	
Perforaciones x3.175mm	Broca de 1.25x10.5mm	
Perforaciones x3.175mm	Broca de 0.8x10.5mm	
Punta en forma de V	Broca de grabado 3D – 30x0.1mm	

Fuente: Autores.

2.2.3. Controlador A4988

El A4988 está diseñado para el control de motores paso a paso en configuraciones de paso completo, 1/2, 1/4, 1/8 y un 1/16 de paso. Su función es controlar todas las señales para el correcto funcionamiento de los motores y debido a que cuenta con un traductor interno, facilita su implementación, cuenta con un controlador de rectificación síncrona que mejora el nivel de temperatura cuando se opera el PWM, también cuenta con una protección al circuito el cual garantiza que en caso de sobre calentamiento el dispositivo se apague, esto se le conoce como ‘bloqueo por bajo voltaje’, es decir, cuando el voltaje este por debajo de un cierto valor, el controlador se apagará y entrará en modo protegido, por último, cuenta con protección contra sobre corrientes. (Allegro MicroSystems, 2010)

Figura 16, Controlador A4988



Fuente: <https://bit.ly/3Mxh4ts>

A continuación, se muestra una tabla con las características relevantes del controlador:

Tabla 8, Características del DRV8825.

Voltaje Lógico (DC)	3V a 5.5V
Volteja Potencia (DC)	8V a 35V
Intensidad	2A máx.
Posos del Motor	Pasos completos, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16 de pasos
Temperatura de Trabajo	-20°C a 85°C

Fuente: Autores.

Se realiza la calibración de los controladores para que tenga un buen funcionamiento en cada uno de los motores paso a paso (NEMA 17), para esta tarea se tiene en cuenta las especificaciones del fabricante y a partir de la siguiente ecuación, se calcula el voltaje de referencia al que deberá estar el controlador.

$$I_{max} = \frac{V_{ref}}{8 * R_s} \quad (3)$$

Se despeja la ecuación y se obtiene el cálculo del voltaje de referencia, I_{max} será un valor entre el 60% y 70% de la corriente máxima y R_s será igual a 0.1Ω

$$V_{ref} = I_{max} * (8 * R_s) \quad (4)$$

Se rempazan los valores en la ecuación y se obtiene un voltaje de referencia de 0.52V.

$$V_{ref} = (2 * 0.6) * (8 * 0.1) = 0.52$$

Para finalizar, este valor se establece en el controlador mediante un potenciómetro y con ayuda de un multímetro; cabe aclarar que este es un valor teórico, así que se tuvo que ajustar e ir probando el comportamiento del motor paso a paso. Ya que en los casos que el motor presento dificultades al momento de realizar desplazamientos con carga, se debió subir lentamente el voltaje hasta que el motor dejara de presentar problemas.

2.2.4. Fuente

Se utiliza una fuente de voltaje de 24V a 6A modelo 'S-150-24' para energizar los componentes electrónicos, se selecciona esta fuente debido a que el motor spindle requiere de 24V para alcanzar las 10000 RPM y para la corriente, se tuvo en cuenta las especificaciones técnicas controladores que aproximadamente, necesitan de 2A para su funcionamiento, en este caso se están usando tres, así que requiere una fuente que suministre hasta 6A.

Figura 17, Fuente de voltaje S-150-24



Fuente: Autores.

Para proteger la integridad de la fuente ante posibles picos de corriente en la red eléctrica, los 120V de entrada en la fuente estarán conectados mediante el enchufe de alimentación AC-01 el cual cuenta con interruptor y porta fusible.

Figura 18, Enchufe AC-01



Fuente: Autores.

2.2.5. Software

El software de control utilizado en este proyecto es grbl v1.1, el cual es gratuito y de código abierto, diseñado para el control de máquinas de tres ejes que lleven como microcontrolador el 'Atmega 328P'. Su lenguaje de programación es C y su funcionamiento se basa en el movimiento de puerto paralelos para el fresado, es decir, controlan cada eje con dos señales 'Clock' y 'Dirección'. Este software es el más utilizado para la creación por cuenta propia de máquinas CNC e impresoras 3D, aunque en el mercado hay algunas empresas que lo utilizan para sus productos tales como '3DTeck', 'Protonner', 'Carbide3D', entre otros. (Jeon, 2021)

2.2.6. Montaje Electrónico y calibración.

En esta parte del proyecto se muestra el proceso de montaje de los componentes electrónicos, la grabación del firmware, calibración y realización de pruebas de funcionamiento

de la CNC, con la finalidad de obtener las mejores prestaciones que pueda ofrecer el equipo y así mismo, fabricar placas de circuito de buena calidad.

Para empezar, se realizó el montaje de la fuente de voltaje y la placa controladora en la parte posterior de la máquina, todo se encuentra contenido en una caja fabricada mediante impresión 3D, esto con el fin de salvaguardar la integridad de los componentes y proteger al usuario.

Figura 19, Montaje Componentes Electrónicos.

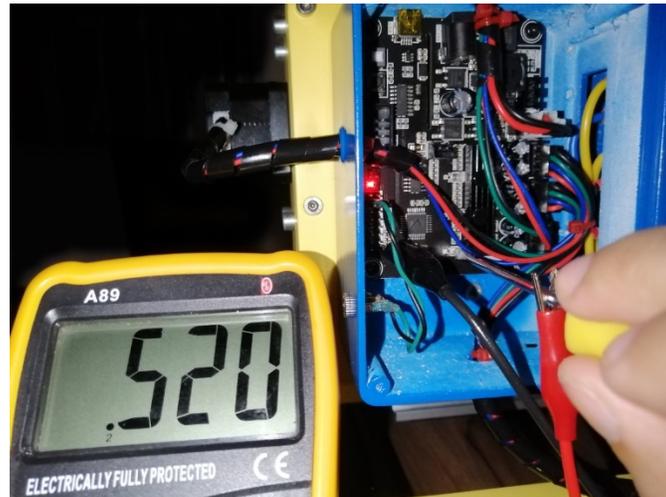


Fuente: Autores.

Como se aprecia en la figura anterior, la fuente de voltaje de 24V-6A, va conectada a la red eléctrica mediante un enchufe de protección, el cual lleva en su interior un fusible. También se observa que la placa de control se encuentra conectada a las salidas de 24V de la fuente de voltaje, en ella van conectados los tres motores NEMA 17, el probador Z y el motor spindle.

A continuación, se realiza el respectivo ajuste de voltaje de los controladores, según la ecuación (4), se establece que se deberá alcanzar un voltaje de 0.52V aproximadamente; esto se realizó en los tres controladores (uno por eje) que se encuentran en la máquina.

Figura 20, Ajuste de los Controladores.

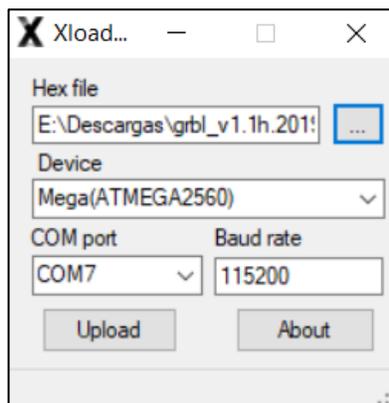


Fuente: Autores.

Ahora, se realiza la instalación del software a la placa de control, esto se hizo mediante el programa 'XLoader', el cual permite grabar el firmware al controlador 'Atmega328P'. Se descarga el archivo en formato '.hex' desde la página del desarrollador, se abre el programa 'Xloader' y se graba el firmware en la placa.

Como primer paso se abre el programa, en el aparecerá una ventana como esta.

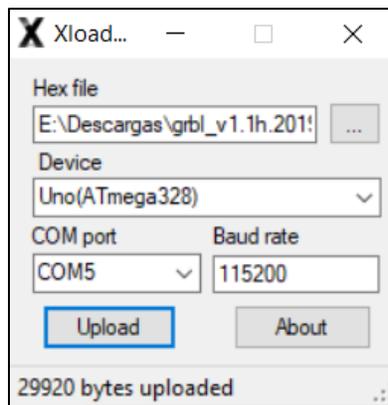
Figura 21, XLoader.



Fuente: Autores.

Se dará clic en el recuadro con el marco azul y se busca el archivo ‘. hex’, después se identifica la referencia del microcontrolador de la placa, selecciona el puerto y se da clic en ‘upload’. El programa cargará el firmware y mostrara que fue subido correctamente, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 22, Firmware Cargado a la Placa.



Fuente: Autores.

Con este paso ya concluido, se procede a realizar la calibración de la maquina CNC. El programa para controlar el equipo desde la computadora será el ‘Grblcontrol (Candle)’ el cual es un software de libre uso.

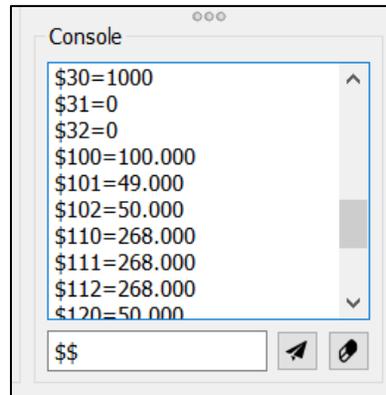
Figura 23, Grblcontrol (Candle)



Fuente: Autores.

En el programa, se escribe en la ventana de comandos '\$\$', esto desplegará la configuración inicial de la maquina y de ese modo, se realizaron las modificaciones a los parámetros que lo requerían.

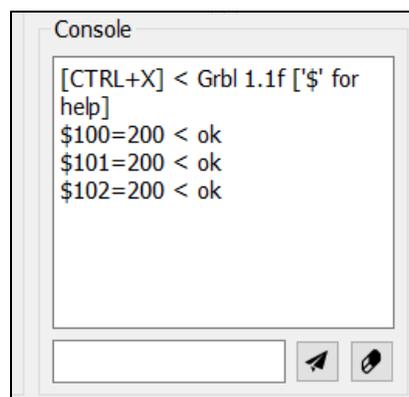
Figura 24, Parámetros Iniciales.



Fuente: Autores.

Se modifican las líneas con los códigos \$100, \$101 y \$102, los cuales definen los pasos/mm de los motores NEMA 17, según la ecuación (1) se establece un valor de 200 para cada eje.

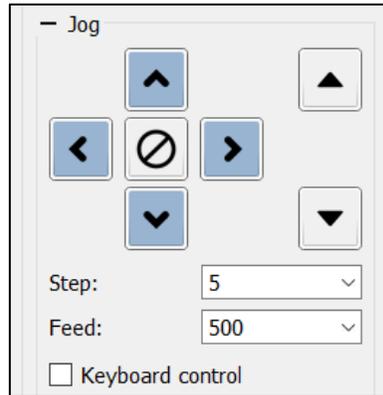
Figura 25, Configuración Inicial Pasos del Motor.



Fuente: Autores.

Con la CNC encendida, se abre al programa y se mueven los ejes, estableciendo un movimiento de 5mm.

Figura 26, Comprobación Movimiento de los ejes.



Fuente: Autores.

Iniciando con el eje 'X', se habilita el motor spindle, se baja el eje 'Z' y con una broca se realiza una perforación, posteriormente se deberá mover el eje 'X' hacia un lado y se repite el procedimiento. La distancia entre el punto inicial y el final deberá ser de aproximadamente 5mm.

Figura 27, Primera Prueba de Calibración.



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la figura anterior, el desplazamiento medido fue de aproximadamente 2mm, hay una diferencia de 3mm, respecto al valor teórico. Con el dato anterior, se establece un nuevo valor de pasos, mediante la siguiente ecuación.

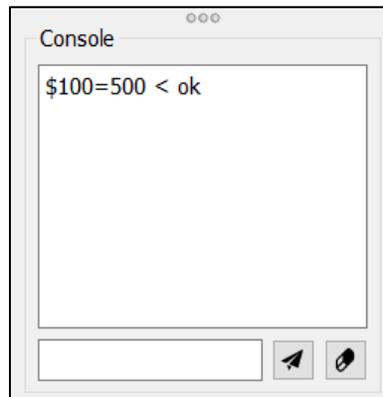
$$\text{Ajuste de pasos} = \frac{\text{Valor Teorico} * \#\text{numero de pasos}}{\text{Valor Medido}} \quad (5)$$

Así que, reemplazando los datos en la ecuación, se obtiene el siguiente valor.

$$\text{Ajuste de pasos} = \frac{5 * 200}{2} = 500$$

Se reemplazo el valor obtenido en la ventana de comandos y nuevamente, se realizó las mediciones.

Figura 28, Calibración eje 'X'.



Fuente: Autores.

Figura 29, Segunda Prueba de Calibración.

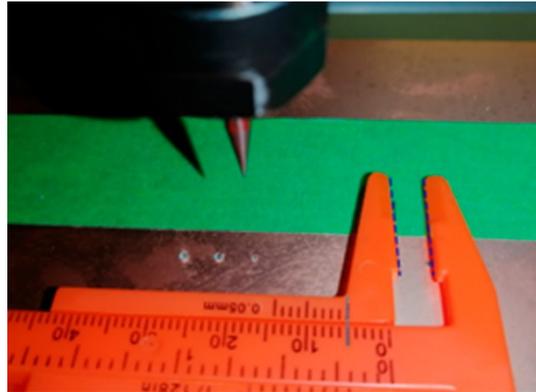


Fuente: Autores.

En esta segunda prueba, se observa la diferencia entre la distancia teórica y la medida, la cual es aproximadamente 2mm. Para ajustar correctamente el eje se repitió lo previamente realizado hasta encontrar el valor adecuado.

Posterior a varias mediciones se encontró, el valor de paso que más se acerca al teórico y al medido, es de 800 pasos/mm.

Figura 30, Parámetro Final de Calibración

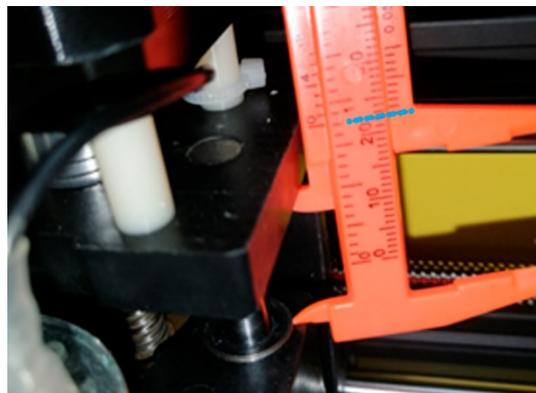


Fuente: Autores.

Se repite el procedimiento anterior para el eje 'Y', la diferencia, es que la cama de trabajo se desplaza hacia adelante.

Para el eje 'Z' se colocó el instrumento entre el acople del motor al eje y el tope superior que limita el movimiento del eje 'Z'.

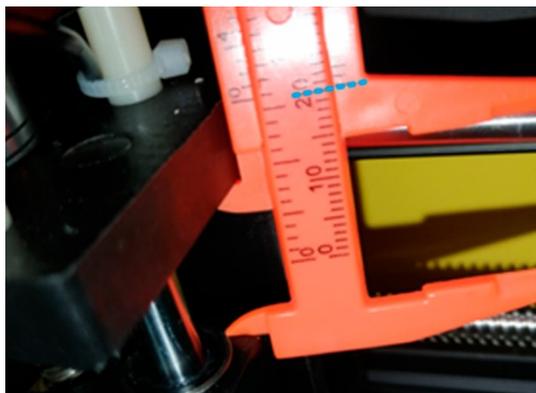
Figura 31, Valor inicial eje 'Z'.



Fuente: Autores.

En el programa, se movió el eje 'Z' hacia arriba, posterior, se restó el valor inicial con el final, el cual dio aproximadamente 2mm.

Figura 32, Valor final eje 'Z'.



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar, el ajuste de desplazamiento se repite en los tres ejes, por ende, el valor adecuado para este eje será igualmente de 800 pasos/mm.

A continuación, se muestra una tabla que reúne la información de la calibración realizada de los ejes 'X', 'Y' y 'Z'.

Tabla 9, Calibración eje 'X', 'Y' y 'Z'.

Numero de pasos	Valor Teórico(mm)	Valor Medido(mm)
200	5	2
500	5	3
833	5	5.2
800	5	5

Fuente: Autores.

Como último paso se realizó una prueba de funcionamiento, con la cual se verificará la resolución de fresado y el desplazamiento de los ejes.

Figura 33, Prueba Ancho de pistas.

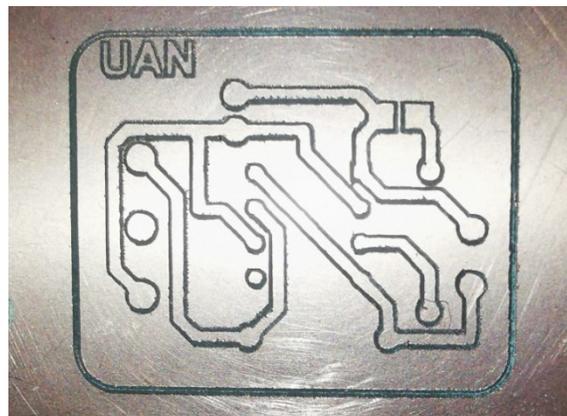


Fuente: Autores

Como se observa en la figura anterior, la CNC es capaz de realizar pistas de un ancho aproximado de 0.1mm, las pistas que sean de un tamaño inferior pueden llegar a presentar errores de continuidad.

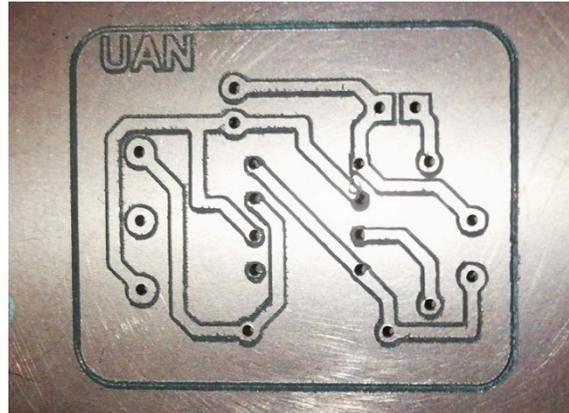
También se realizó un circuito de prueba, como se puede apreciar en la siguiente figura, el resultado obtenido es óptimo, y de ese modo se concluye que los parámetros designados en la CNC son los adecuados.

Figura 34, Prueba de Funcionamiento - Pistas.



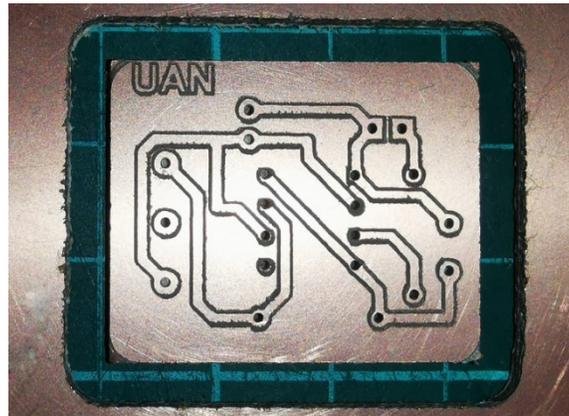
Fuente: Autores.

Figura 35, Prueba de Funcionamiento - Perforación.



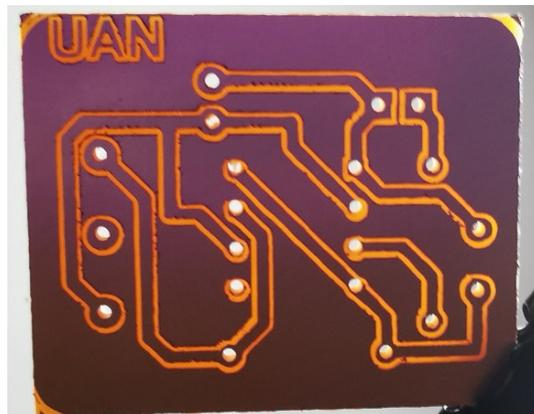
Fuente: Autores.

Figura 36, Prueba de Funcionamiento - Corte.



Fuente: Autores.

Figura 37, Prueba de Funcionamiento - Resultado.

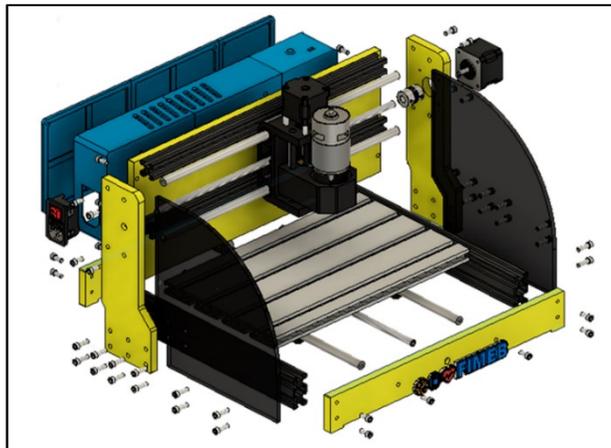


Fuente: Autores.

3. Resultados

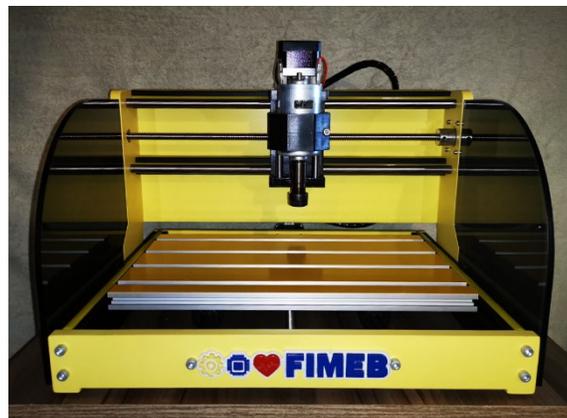
Como resultado de lo desarrollado en este trabajo de grado, se obtiene una maquina CNC con la capacidad de fabricar placas de circuito impreso, esta funciona con el software libre 'grbl', para la fabricación de las PCB y utiliza el programa de código abierto 'FlatCAM' para generar los códigos G; además, se desarrolla una guía práctica de funcionamiento en la cual se aborda el diseño y fabricación de un oscilador astable utilizando en microcontrolador 555, esto con el fin de instruir al usuario de cómo se debe realizar el manejo de la maquina CNC.

Figura 38, Vista Explosionada CNC.



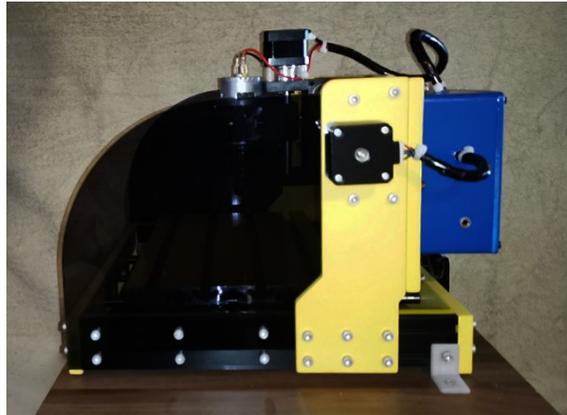
Fuente: Autores.

Figura 39, Vista Frontal CNC.



Fuente: Autores.

Figura 40, Vista Lateral Izquierda CNC.



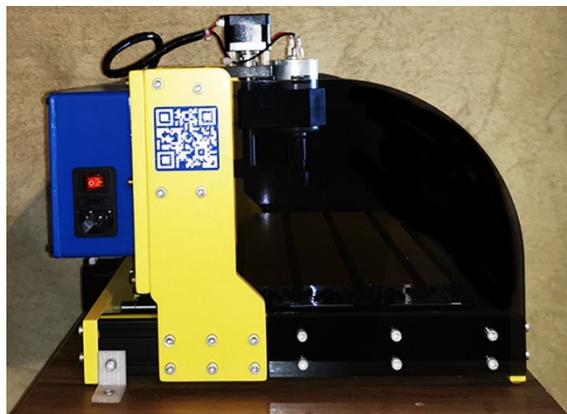
Fuente: Autores.

Figura 41, Vista Posterior CNC.



Fuente: Autores.

Figura 42, Vista Lateral Derecha CNC.



Fuente: Autores.

En la Figura 40, se observa que la maquina dispone en su parte posterior una caja donde van almacenados los componentes de potencia y la placa de control, las dos partes están divididas, se realizó de este modo para en caso de realizar alguna revisión o recambio de piezas, no hubiera necesidad de dejar al descubierto todos los componentes y que se pudiese trabajar únicamente en la zona requerida.

En la parte lateral se encuentra una entrada para el 'Z-probe', esto es de utilidad para que el software pueda determinar el punto cero en 'Z', si no se realizara esta comprobación el equipo trabajaría de una forma incorrecta. Este se encuentra compuesto por dos conectores, uno deberá ir conectado a la broca y la otra en la baquelita o algún punto que haga contacto con ella.

Figura 43, Z-Probe.



Fuente: Autores.

Figura 44, Conexión Z-probe.

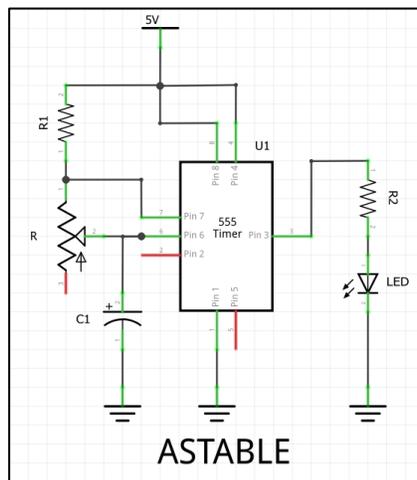


Fuente: Autores.

3.1. Guía práctica de funcionamiento

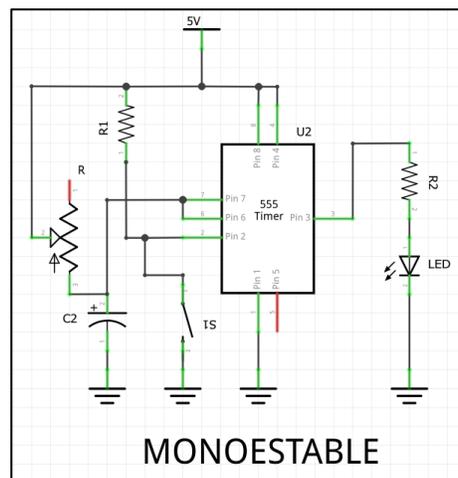
Se realizó una guía práctica de funcionamiento (la cual se encuentra alojada en la carpeta drive creada para este proyecto), para introducir al estudiante de manera clara y sencilla al diseño de PCB y el cómo se debe manipular la CNC para la fabricación de circuitos. Por lo cual, se plantea el diseño e implementación de un circuito temporizador astable y monoestable operado mediante el microcontrolador IC 555.

Figura 45, Diagrama esquemático - Astable.



Fuente: Autores.

Figura 46, Diagrama esquemático - Monoestable.



Fuente: Autores.

A continuación, se enumera lo desarrollado en la guía.

Se plantea diseñar un circuito temporizador variable de tipo astable con una frecuencia de salida de 1,4 Hz y un ciclo de trabajo del 53,5%, y un circuito temporizador variable de tipo monoestable con un periodo de activación de 1 segundo.

- a. Se realizan los cálculos para el cálculo de las resistencias y capacitores de los respectivos circuitos.

Las ecuaciones que se emplean son las siguientes:

$$f = \frac{1.44}{(R1 + 2 * R)C1} \quad (6)$$

$$DT = \frac{R1 + R}{(R1 + 2 * R)} * 100\% \quad (7)$$

$$T = 1,1(R * C) \quad (8)$$

Para calcular el valor de R, se despeja la ecuación (6).

$$DT(R1 + 2R) = 100(R1 + R)$$

$$DT * 2R - 100R = 100R1 - DT * R1$$

$$R(DT * 2 - 100) = 100R1 - DT * R1$$

$$R = \frac{100 * R1 - DT * R1}{DT * 2 - 100}$$

$$R = \frac{100(15k) - 53.5 * 15k}{53,5 * 2 - 100} = 99,64k \approx 100k \Omega$$

Para R, se calcula un valor de 99,64k Ω , comercialmente es un valor que no se consigue, así que se emplea una resistencia de 100k Ω .

Para el cálculo del capacitor C1, se despeja la ecuación (7).

$$1,4Hz = \frac{1.44}{(15k + 2 * 100k) * C1}$$

$$C1 = \frac{1.44}{(15k + 2 * 100k) * 1,4Hz}$$

$$C1 = 4,88\mu F$$

Para el cálculo del capacitor C2, se despeja la ecuación (8).

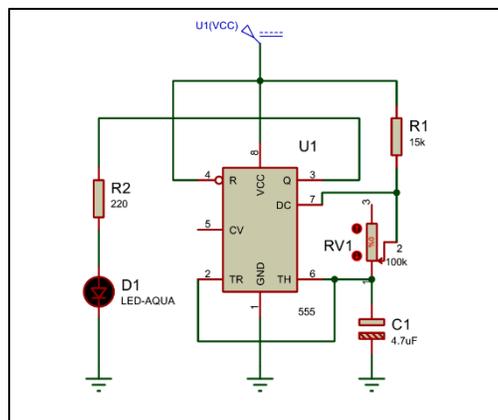
$$1s = 1,1(100k * C2)$$

$$C2 = \frac{1}{1,1 * 100k} = 9,09\mu F$$

El valor calculado del condensador C1 es 4,88 μ F y para C2 es 9,09 μ F, comercialmente estos valores no se encuentran, así que se emplea un condensador de 4,7 μ F y de 10 μ F, respectivamente.

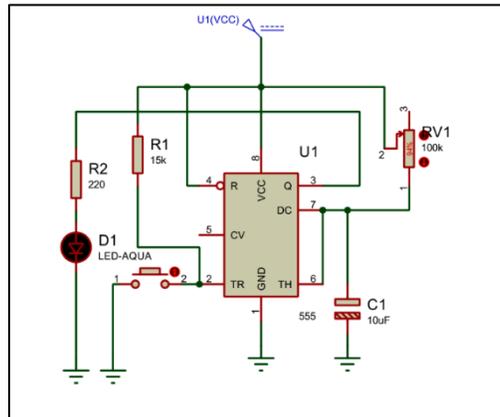
b. Simulación circuito en software de diseño electrónico (proteus).

Figura 47, Simulación Circuito Astable.



Fuente: Autores.

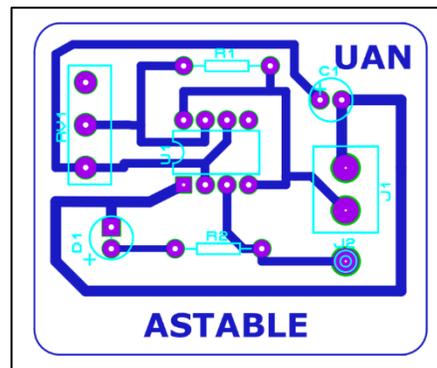
Figura 48, Simulación Circuito Monoestable



Fuente: Autores.

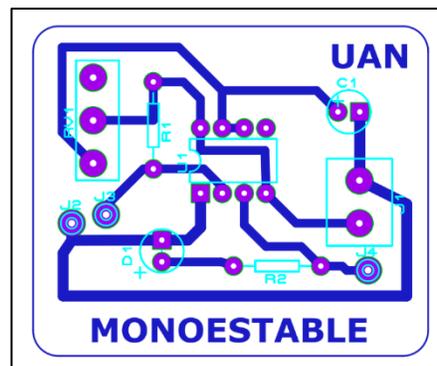
c. Diseño placa de circuito impreso (PCB).

Figura 49, Diseño PCB – Astable.



Fuente: Autores.

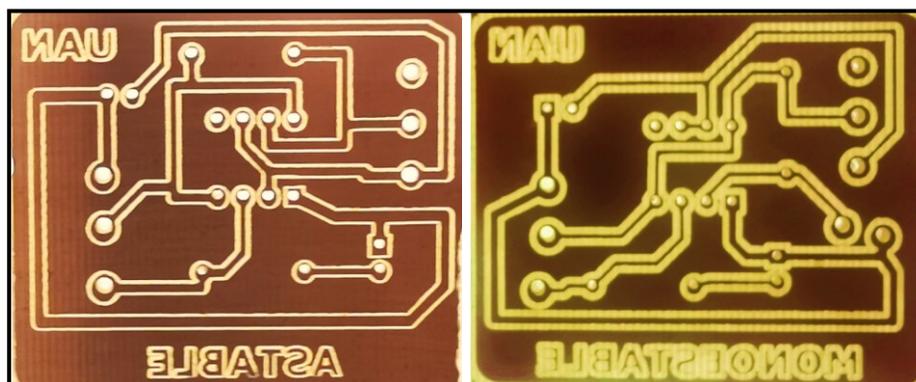
Figura 50, Diseño PCB- Monoestable.



Fuente: Autores.

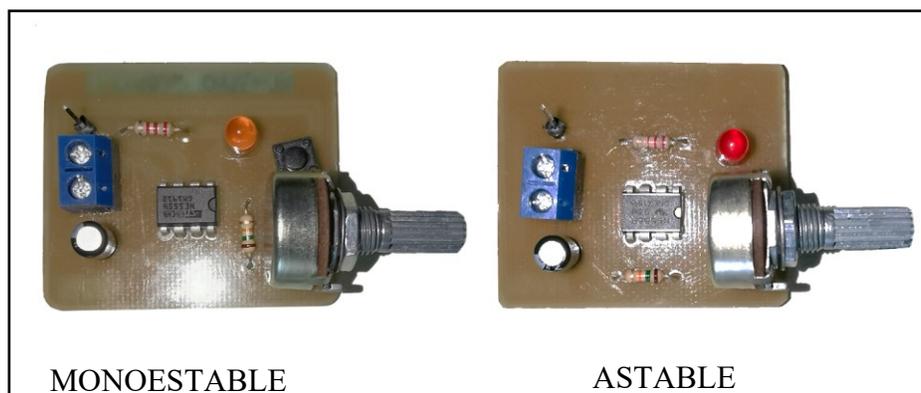
Se realizó la fabricación e implementación del diseño realizado anteriormente de los circuitos astable y monoestable .

Figura 51, Circuitos en Baquelita.



Fuente: Autores.

Figura 52, Montaje de componentes.



Fuente: Autores.

Por último, se desarrollaron las actividades de operación planteados en la guía de funcionamiento, esto con el fin de comprobar el funcionamiento y diseño de los circuitos astables y monoestables

Para el cálculo de la frecuencia del circuito monoestable, se acciona el pulsador para encender el led y con la ayuda de un cronometro se mide el tiempo que tarda en apagarse. Para obtener un valor más cercano a la realidad, se realizaron cinco mediciones en las cuales se obtuvieron tiempos de 89ms, 1s, 1,13s, 1,2s y 1,17s.

$$t = \frac{0,89 + 1 + 1,13 + 1,2 + 1,17}{5} \quad (9)$$

$$t = 1,078 \text{ s}$$

Se calcula un tiempo promedio empleando la ecuación (9), obteniendo un resultado de 1,078 s. Ahora, se haya el porcentaje de error entre el valor experimental y teórico, para ello, se utilizará la ecuación (10).

$$Error = \frac{Valor \ Teórico - Valor \ Expeimental}{Valor \ Teórico} * 100 \quad (10)$$

$$Error = \frac{|1 - 1,078|}{1} * 100 = 7,8\%$$

Para el circuito astable, la frecuencia se calcula contando el número de parpadeos en un periodo determinado, en este caso se estableció un periodo de 10s y se contabilizo un total de 15 parpadeos en ese transcurso de tiempo.

$$f = \frac{n^{\circ} \text{ de parpadeos}}{T} \quad (11)$$

$$f = \frac{15}{10} = 1,5Hz$$

Utilizando la ecuación (10), para calcular el porcentaje de error entre el valor experimental y teórico, dando como resultado:

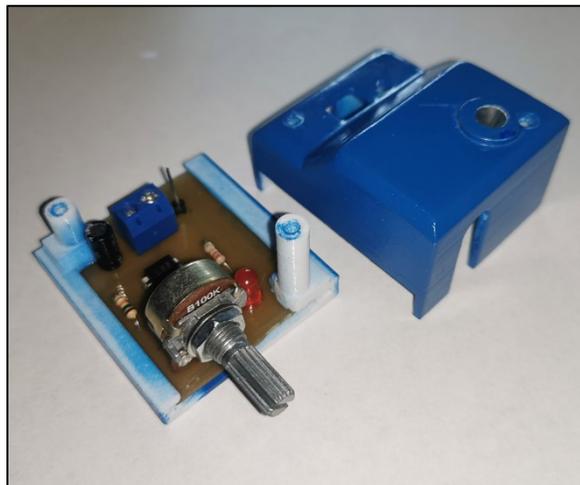
$$Error = \frac{|1,4 - 1,5|}{1,4} * 100 = 7,14\%$$

Figura 53, Circuito Monoestable - Case.



Fuente: Autores.

Figura 54, Circuito Astable - Case.



Fuente: Autores.

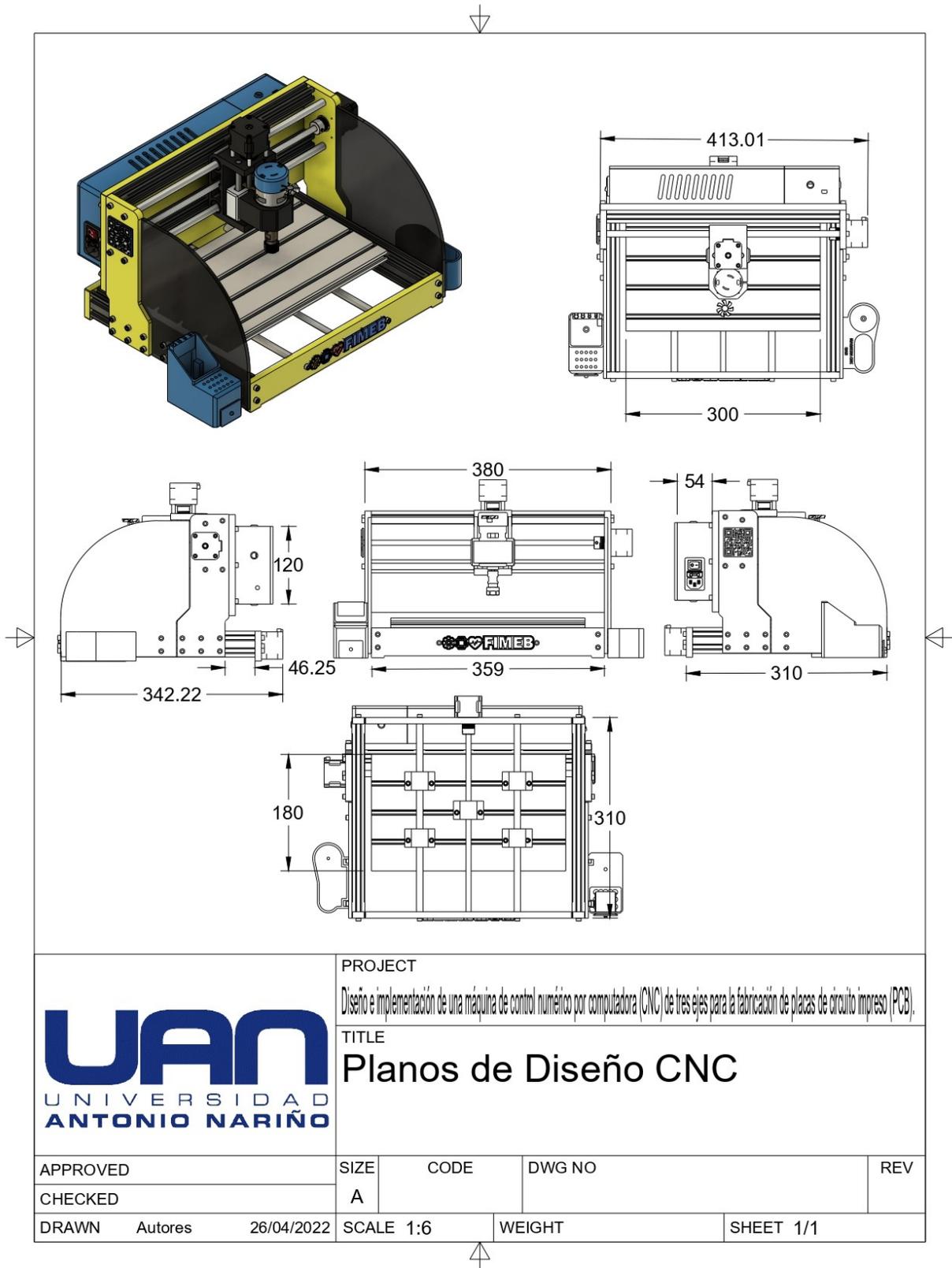
4. Conclusiones

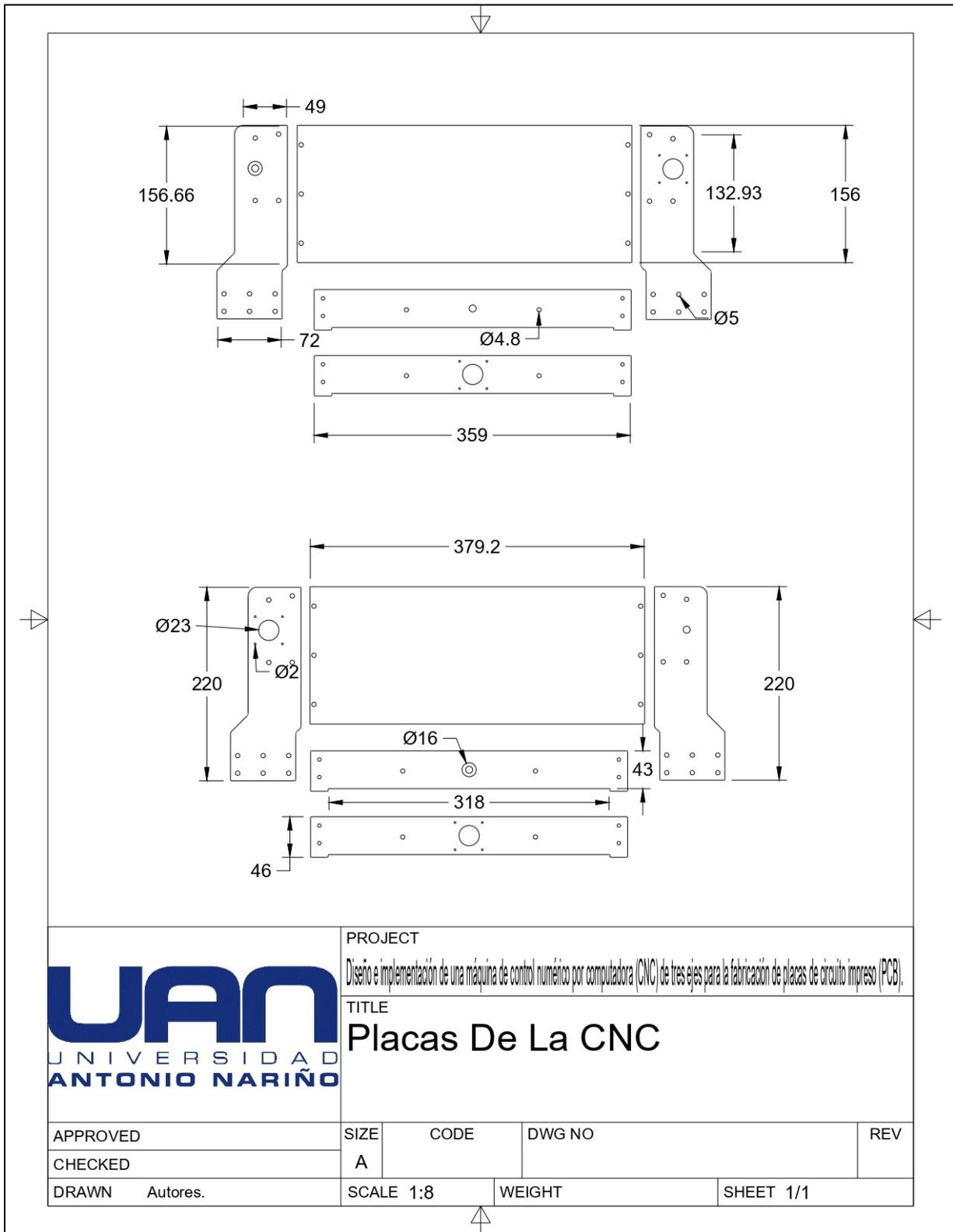
- Se determinaron los parámetros físicos y electrónicos óptimos con los cuales la maquina CNC pude llevar a cabo la fabricación de placas de circuito impreso (PCB), esto se comprobó a través del desarrollo de este trabajo de grado, en el cual, se realizaron pruebas de funcionamiento, fiabilidad y operabilidad.
- Se comprobó la estabilidad estructural y el funcionamiento de la maquina por extensos periodos de tiempo para descartar posibles sobrecalentamientos o problemas con la fuente, placa de control y motores.
- Se selecciono el software teniendo en consideración que el mismo fuera gratuito (Software libre), de fácil adquisición, instalación y operación, por tales razones, se emplean los programas 'FlatCam' y 'GRBL Candle'. Por otra parte, el modo de transmisión de datos entre la Computadora y la maquina CNC, es el 'Universal Serial Bus' (USB) ya que es el tipo de conexión más usada para la comunicación entre dispositivos o periféricos electrónicos.
- Se calibraron los controladores (A4988) de los motores encargados del movimiento cartesiano, para comprobar su correcto funcionamiento, se desarrollaron pruebas, tales como el desplazamiento en los ejes X,Y y Z, fresado, perforación y corte de las PCB, esto con el fin de comprobar que los motores no pierden potencia al realizar movimientos sobre sus respectivos ejes y que la relación de tamaños entre la PCB diseñada y fabricada se mantiene igual.
- Se implemento la parte mecánica y electrónica para realizar pruebas y ajustes, lo cual permitió dar solución a inconvenientes presentados durante el desarrollo, tales como

saltos de pasos, mal contacto de los conectores y cables, incorrecto fresado de las pistas y reducir vibraciones.

- Se desarrollo una guía práctica, teniendo en cuenta la iniciativa CDIO, con la cual el estudiante o docente, tendrá una explicación del uso de la maquina CNC de una manera clara, rápida y sencilla.
- La máquina CNC contribuirá al desarrollo de habilidades en el diseño y fabricación de PCB, las cuales son de suma importancia en diversas áreas en las cuales el estudiante se podrá desempeñar profesionalmente.

Anexos.





Características Iniciales CNC
\$0=10
\$1=25
\$2=0
\$3=1
\$4=0
\$5=0
\$6=0
\$10=1
\$11=0.010
\$12=0.002
\$13=0
\$20=0
\$21=0
\$22=0
\$23=0
\$24=25.000
\$25=500.000
\$26=250
\$27=1.000
\$30=1000
\$31=0
\$32=0
\$100=800.000
\$101=800.000

\$102=800.000
\$110=1000.000
\$111=1000.000
\$112=600.000
\$120=30.000
\$121=30.000
\$122=30.000
\$130=200.000
\$131=200.000
\$132=200.000

Enlaces

- <https://drive.google.com/drive/folders/18ab2VCp6xBVjklbBJkUb8nCgOCItpldG?usp=sharing>
- <https://youtu.be/ds5dEaFku4E>

Referencias Bibliográficas

- Allegro MicroSystems. (2010). *A4988 Datasheet - Allegro MicroSystems*. Obtenido de ALLDATASHEET.COM: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/432263/TI/DRV8825.html>
- Aranguren, G., Etxaniz, J., & López-Nozal, L. A. (2012). *¿Diseño de circuitos impresos en la Universidad?* Bilbao: Universidad del País Vasco.
- Blundell, N. (2 de mayo de 2018). *Why Printed Circuit Boards Remain in High Demand*. Obtenido de EPSnews: <https://epsnews.com/2018/05/02/printed-circuit-board-demand/>
- Bogatin, E. (s.f.). *Practical PCB Design and Manufacture*. Obtenido de <https://sites.google.com/colorado.edu/practicalpcbdesignmanufacture/home>
- Brihuega, D. A. (2011). *Electrónica Básica*. Editorial RA-MA.
- Electro Industria. (abril de 2009). *Electro Industria*. Obtenido de Motores Nema: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1154&ni=motores-nema>
- Geng, H. (2016). *Manufacturing Engineering Handbook*. McGraw-Hill.
- Harper, C. A. (2004). *Electronic Materials and Processes Handbook, 3rd Edition*. McGraw-Hill.
- Isaac. (s.f.). *Nema 17: todo sobre el motor paso a paso compatible con Arduino*. Obtenido de Hardware Libre: <https://www.hwlibre.com/nema-17/>
- Jeon, S. (22 de enero de 2021). *github*. Obtenido de <https://github.com/grbl/grbl>
- Khandpur, R. (2006). *Printed Circuit Boards Design, Fabrication and Assembly*. McGraw-Hill.

Khandpur, R. (2006). *Printed Circuit Boards Design, Fabrication and Assembly*. McGraw-Hill.

Macias, M. d. (2018). *EVALUACIÓN DE PROCESOS INTERDISCIPLINARES APLICADOS AL DESARROLLO DE DISEÑO DE PRODUCTOS MÉDICOS CENTRADOS EN EL USUARIO*. San Luis Potosí: Universidad Autonoma de San Luis Potosi.

New Jersey Department of Health and Senior Services. (marzo de 1998). *Hoja Informativa Sobre Substancias Peligrosas*. Obtenido de OFFICIAL SITE OF THE STATE OF NEW JERSEY: <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0930sp.pdf>

RepRap. (9 de abril de 2021). *RAMPS 1.4*. Obtenido de RepRap: https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4

Sinha, S. (2010). *CNC Programming Using Fanuc Custom Macro B, 1st Edition*. McGraw-Hill.

(2004). *The CDIO™ Standards*.

Tummala, D. R. (2019). *Fundamentals of Device and Systems Packaging: Technologies and Applications, 2nd Edition*. McGraw-Hill.

Universidad Antonio Nariño. (s.f.). Obtenido de <https://www.uan.edu.co/facultad-de-ingenieria-mecanica-electronica-y-biomedica>