



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CNC LÁSER DOBLE LADO PARA
LA ELABORACIÓN DE MICROPLACAS PCB PARA LA EMEMPRESA
INPRONIC SOLUTIONS”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTROMECÁNICO**

AUTORES:

Alajo Anchatuña Jaime Fernando

Calvopiña Herrera Alvaro Julio

TUTOR:

Ing. Navarrete López Luis Miguel

Latacunga, marzo 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA


Nosotros, Alajo Anchatuña Jaime Fernando y Calvopiña Herrera Alvaro Julio declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CNC LÁSER DOBLE LADO PARA LA ELABORACIÓN DE MICROPLACAS PCB PARA LA EMEMPRESA INPRONIC SOLUTIONS”**, siendo el Ing. Navarrete López Luis Miguel tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica son de nuestra exclusiva responsabilidad.



.....
Alajo Anchatuña Jaime Fernando

C.I.: 0504439407



.....
Calvopiña Herrera Alvaro Julio

C.I: 0550192256

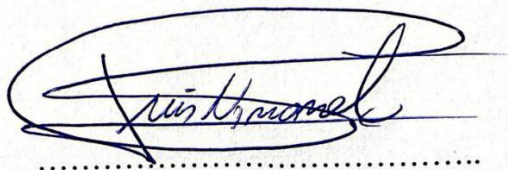
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el Título:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CNC LÁSER DOBLE LADO PARA LA ELABORACIÓN DE MICROPLACAS PCB PARA LA EMEMPRESA INPRONIC SOLUTIONS”, de Alajo Anchatuña Jaime Fernando y Calvopiña Herrera Alvaro Julio de la Carrera de Ingeniería en Electromecánica, considero que dicha propuesta tecnológica cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico - técnico suficientes para ser sometidos a la evaluación del tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2025

Tutor:



Ing. Luis Miguel Navarrete López

C.I.: 1803747284

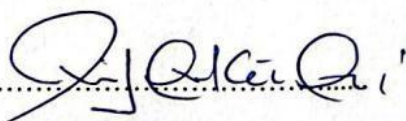
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente Propuesta Tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de ciencias de la Ingeniería y Aplicadas por cuanto los postulantes: Alajo Anchatuña Jaime Fernando y Calvopiña Herrera Alvaro Julio, con el título de Proyecto de investigación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CNC LÁSER DOBLE LADO PARA LA ELABORACIÓN DE MICROPLACAS PCB PARA LA EMEMPRESA INPRONIC SOLUTIONS**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar el CD correspondiente, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo 2025

Para constancia firman:



Lector 1 (presidente)

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.

C.C.: 050259517-6



Lector 2

Ing. Carlos Francisco Pacheco Mena M.Sc

C.C.: 050307290-2



Lector 3

Ing. Efrén Damían Alban Andrade M.Sc

C.C.: 050252951-4

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la fortaleza y la perseverancia para alcanzar esta meta. A mi padre Hugo Calvopiña y mi madre Ana Herrera quienes con su sacrificio, apoyo y amor incondicional han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

A mis amigos y compañeros de carrera, gracias por cada palabra de aliento, cada consejo y cada momento compartido. A mi tutor de tesis, por su paciencia y orientación, sin la cual este trabajo no habría sido posible. A todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron a este logro, mi más sincero agradecimiento.

Alvaro Calvopiña

AGRADECIMIENTO

Agradezco de todo corazón a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido mi mayor fuente de motivación. Gracias por creer en mí, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño logro en este camino.

A mi tutor de tesis, por su paciencia, dedicación y orientación, que han sido clave para el desarrollo de este trabajo. A mis amigos y compañeros, por su apoyo, consejos y momentos compartidos, que hicieron este proceso más llevadero. Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de esta etapa, les expreso mi más sincero agradecimiento.

Jaime Alajo

DEDICATORIA

A Hugo Calvopiña y Ana Herrera, quien ha estado a mi lado en cada momento, brindándome su amor, comprensión y apoyo inquebrantable. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

Dedico este logro también a la perseverancia y al esfuerzo, porque han sido mis mejores aliados en este camino lleno de retos. Que esta tesis sea un testimonio de que con determinación y dedicación, todo es posible.

Alvaro Calvopiña

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud a mis padres Jaime Alajo y Digna Anchatuña, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional en cada paso de mi vida. Su esfuerzo, sacrificio y confianza en mí me han dado la fuerza para seguir adelante y alcanzar esta meta.

También dedico esta tesis a mis profesores y mentores, quienes con su paciencia, conocimientos y motivación me han guiado en este proceso de aprendizaje, ayudándome a crecer tanto profesional como personalmente.

Jaime Alajo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

Título:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CNC LÁSER DOBLE LADO PARA LA ELABORACIÓN DE MICROPLACAS PCB PARA LA EMEMPRESA INPRONIC SOLUTIONS”

Autores:

Alajo Anchatuña Jaime Fernando

Calvopiña Herrera Alvaro Julio

RESUMEN

La presente propuesta tecnológica tiene como objetivo el diseño e implementación de una máquina CNC láser doble lado para la elaboración del ruteado de PCB's para la empresa Inpron Solutions. Se planteó una metodología basada en 6 fases para la ejecución de la propuesta que van desde el análisis de las variables y requerimientos técnicos, hasta el diseño, simulación, montaje e integración de cada uno de los módulos mecánicos y electrónicos que conforman el sistema. Para la construcción se realizó la impresión de los componentes en impresión 3D con el material PLA y un refuerzo de resina que permite incrementar la resistencia a la tracción y deformación del material. Se implementó un controlador Makerbase y se integraron 2 cabezales láser con el objetivo de reducir tiempos de ruteado en placas de PCB. Se realizó un análisis estático de la estructura diseñada con el objetivo de verificar las tensiones y factor de seguridad para comprobar que posee resistencia y durabilidad en base al trabajo que debe realizar la máquina. Se realizaron pruebas de funcionamiento en donde se evaluó la repetibilidad para el eje x con un valor de 0,0107, 0,0113 para el eje y, 0,0308 en el eje z, consiguiendo una desviación mínima en los patrones de ruteado. Finalmente se demostró que el equipo es una solución accesible para el proceso de ruteado PCB, ofreciendo los parámetros planteados lo cual convierte esta propuesta en una herramienta ideal para la manufactura de circuitos electrónicos de pequeña escala.

Palabras clave: CNC, PLA, Makerbase, PCB, Cabezal Láser, Repetibilidad

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

THEME:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DOUBLE SIDE CNC FOR PRODUCTION OF PCB
MICROPLATES FOR THE COMPANY INPRONINC SOLUTIONS

Authors:

Alajo Anchatuña Jaime Fernando
Calvopiña Herrera Álvaro Julio

ABSTRACT

This technological proposal aims to design and implement a double-sided CNC laser machine for PCB routing for Inproninc Solutions. A six-phase methodology was proposed for the execution of the proposal, ranging from the analysis of technical variables and requirements to the design, simulation, assembly, and integration of each of the mechanical and electronic modules that make up the system. For construction, the components were 3D printed using PLA material and a resin reinforcement that increases the material's tensile strength and deformation. A Makerbase controller was implemented, and two laser heads were integrated to reduce routing times on PCB boards. A static analysis of the designed structure was performed to verify the stresses and safety factor to ensure its strength and durability based on the work the machine must perform. Functional tests were performed, evaluating repeatability for the x-axis with a value of 0,0107, 0,0113 for the y-axis, and 0,0308 for the z-axis, achieving minimal deviation in the routing patterns. Finally, it is demonstrated that the equipment is an affordable solution for the PCB routing process, offering the proposed parameters, which makes this proposal an ideal tool for the manufacture of small-scale electronic circuits.

Keywords: CNC, PLA, Maker base, PCB, Laser Head, Repeatability

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
ÍNDICE GENERAL	xi
ÍNDICE DE FIGURAS:	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
1. INFORMACIÓN GENERAL	19
2. INTRODUCCIÓN	20
2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	21
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	23
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	23
2.3.1. Objeto de investigación.....	23
2.3.2. Campo de acción.....	23
2.4. BENEFICIARIOS.....	23
2.4.1. Beneficiarios directos	23

2.4.2. Beneficiarios indirectos	23
2.5. JUSTIFICACIÓN	23
2.6. OBJETIVOS	24
2.6.1. Objetivo general.....	24
2.6.2. Objetivos específicos	25
2.7. SISTEMA DE TAREAS	25
3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA	26
3.1. ANTECEDENTES	26
3.2. CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO CNC	27
3.2.1. Tipos de sistemas CNC computarizado	28
3.2.2. Campos de aplicación	28
3.2.3. Funcionamiento.....	29
3.2.4. Mecanizado basado en máquinas CNC	29
3.3. MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA	30
3.3.1. Tipos de máquinas	30
3.3.2. Estructura de la máquina.....	30
3.3.3. Mecanismos de transmisión del movimiento la máquina.....	31
3.3.4. Funcionamiento de la máquina CNC.....	34
3.3.5. Ventajas de la inclusión de una CNC en la Industria	35
3.3.6. Campos de aplicación del Equipo.....	35
3.4. LÁSER.....	35

3.4.2.	Tipos de láser	37
3.4.3.	Características de una CNC Láser	37
3.4.4.	Componentes básicos de una CNC láser	38
3.5.	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (PCB).....	39
3.5.1.	Tipos de placas	39
3.6.	MÉTODOS MANUALES PARA RUTEADOS DE PLACAS PCB.....	40
3.6.1.	Ruteado en húmedo	40
3.6.2.	Método del planchado.....	40
3.6.3.	Método por acetato	41
3.7.	FILAMENTOS DE IMPRESIÓN 3D	41
3.7.1.	Polímero Plástico Biodegradable (PLA)	42
3.7.2.	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)	42
3.7.3.	Fibra de carbono	42
3.7.4.	Filamento de nylon	42
3.7.5.	Filamento de titanio	42
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	43
4.1.	DEFINICIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA	44
4.2.	ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO	47
4.3.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA.....	49
4.3.1.	Diseño Mecánico	50
4.3.2.	Selección de Materiales	58

4.3.3.	Simulación y Modelado de la Estructura	58
4.3.4.	Diseño Electrónico y Control	63
4.4.	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL PROTOTIPO	70
4.5.	INTEGRACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA	74
4.5.1.	Configuración y Calibración.....	74
4.5.2.	Software para Ruteado Laser	77
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	78
5.1.	ANÁLISIS CAE DE LA CNC LASER.....	78
5.2.	ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN PIEZAS FABRICADAS.....	80
5.2.1.	Condiciones de funcionamiento.....	80
5.3.	ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD	84
5.3.1.	Repetibilidad en el eje x	84
5.3.2.	Repetibilidad en el eje y	85
5.3.3.	Repetibilidad en el eje z.....	87
5.4.	REPETIBILIDAD EN SUPERPOSICIÓN DE CABEZALES	88
5.5.	RESULTADOS DE RUTEADO LÁSER	90
5.5.1.	Pruebas de Repetibilidad del Prototipo.....	91
5.5.2.	Resolución de Ruteado	93
5.5.3.	Análisis de los bordes de las pistas y su alineación.....	94
5.6.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	96
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99

6.1. CONCLUSIONES	99
6.2. RECOMENDACIONES	101
7. REFERENCIAS.....	101
ANEXOS	106
ANEXO 1	106
ANEXO 2	108
ANEXO 3	110
ANEXO 4	112
ANEXO 5	114
ANEXO 6	142
ANEXO 7	142
ANEXO 8	143

ÍNDICE DE FIGURAS:

FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE ISHIKAWA DE MÁQUINA CNC LÁSER [14].....	22
FIGURA 3.1. FUNCIONAMIENTO CNC [7].....	29
FIGURA 3.2. ESTRUCTURA DE LA CNC [12]	31
FIGURA 3.3. PROPIEDADES DEL LÁSER [10].....	37
FIGURA 3.4. RUTEADO EN HÚMEDO	40
FIGURA 3.5. MÉTODO DEL PLANCHADO	41
FIGURA 3.6. MÉTODO POR ACETATO.....	41
FIGURA 4.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA PARA LA PROPUESTA	43
FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA	46
FIGURA 4.3 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE BANDA	53
FIGURA 4.4. DIMENSIONES Y NÚMERO DE DIENTES DEL PIÑÓN	54
FIGURA 4.5. DISPOSICIÓN DE CARGAS APLICADAS A LA ESTRUCTURA	59
FIGURA 4.6. UBICACIÓN DE SUJECCIÓN FIJA	59
FIGURA 4.7. UBICACIÓN CARGA 15 N	60
FIGURA 4.8. UBICACIÓN DE ESFUERZO CORTANTE.....	60
FIGURA 4.9. ESFUERZO DE VON MISES ESTRUCTURAL	61
FIGURA 4.10. FACTOR DE SEGURIDAD DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE	62
FIGURA 4.11. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE CONTROL Y MOVIMIENTO	63
FIGURA 4.12. CUERPO LIBRE DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN [19]	66
FIGURA 4.13. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO [21].....	70
FIGURA 4.14. PLANIMETRÍA DEL SISTEMA DISEÑADO.....	71
FIGURA 4.15. IMPRESIÓN EN PLA DEL DISEÑO MECÁNICO	72
FIGURA 4.16. UNIÓN DE PERFILES	72
FIGURA 4.17. INSTALACIÓN RIELES.....	73
FIGURA 4.18. INSTALACIÓN DE MOTORES Y TRANSMISIÓN	73
FIGURA 4.19. CABLEADO Y CONEXIÓN	74
FIGURA 4.20. UNIVERSAL G-CODE SENDER.....	74
FIGURA 4.21. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN EN UNIVERSAL G-CODE SENDER	75
FIGURA 4.22. DIAGRAMA DE FLUJO DE LIBRERÍA GRBL 1.1	76
FIGURA 4.23. CONFIGURACIÓN DE NÚMERO DE PASOS	77
FIGURA 4.24. INTERFAZ DE SOFTWARE LASER GRBL.....	77
FIGURA 5.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE ENSAMBLE	78
FIGURA 5.2. ANÁLISIS DE ESFUERZO POR VON MISES	79
FIGURA 5.3. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN EN SOLIDWORKS (EDUCATIVO).....	79
FIGURA 5.4. ANÁLISIS DE FACTOR DE SEGURIDAD EN SOLIDWORKS (EDUCATIVO)	80
FIGURA 5.5. UBICACIÓN DE CARGAS SOBRE SOPORTE IMPRESOS EN 3D	81
FIGURA 5.6. UBICACIÓN DE SOPORTES DE RESTRICCIÓN.....	81
FIGURA 5.7 ESFUERZO DE VON MISES	82

FIGURA 5.8. DEFORMACIÓN UNITARIA	82
FIGURA 5.9. FACTOR DE SEGURIDAD.....	83
FIGURA 5.10. PRUEBAS DE REPETIBILIDAD EN EL EJE X	84
FIGURA 5.11. ERROR EN DESPLAZAMIENTO DEL EJE X.....	85
FIGURA 5.12. PRUEBAS DE REPETIBILIDAD EN EL EJE X	86
FIGURA 5.13. ERROR EN DESPLAZAMIENTO DEL EJE Y	86
FIGURA 5.14. PRUEBAS DE REPETIBILIDAD EN EL EJE Z.....	87
FIGURA 5.15. ERROR EN DESPLAZAMIENTO DEL EJE Z	88
FIGURA 5.16. PRUEBA DE REPETIBILIDAD EN SUPERPOSICIÓN	88
FIGURA 5.17. ERROR EN DESPLAZAMIENTO DEL EJE Z	89
FIGURA 5.18. A) RUTEADO LÁSER ENTRE XTOOL VS B) CNC DOBLE CARA.....	90
FIGURA 5.19. RUTEADO LASER	91
FIGURA 5.20. SECUENCIA DE COMANDOS PARA EL TRAZADO DE PISTA DE LA PLACA PCB	92
FIGURA 5.21. PRUEBAS DE REPETIBILIDAD DE LA MÁQUINA CNC	93
FIGURA 5.22. RUTEADO DE PISTA A UNA SOLA PASADA	94
FIGURA 5.23. SERIGRAFIADO DE ELEMENTOS.....	94
FIGURA 5.24. RUTEADO Y FUNCIONAMIENTO DEL CABEZAL SUPERIOR.....	95
FIGURA 5.25. RUTEADO Y FUNCIONAMIENTO DEL CABEZAL INFERIOR	95
FIGURA 5.26. PATRÓN DE SERIGRAFIA PARA PLACA PCB.....	96

ÍNDICE DE TABLAS:

TABLA 2.1. SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS	25
TABLA 3.1. COMPARACIÓN DE MÁQUINAS CNC LÁSER BASADA EN VARIOS CRITERIOS TÉCNICOS	36
TABLA 4.1. MATRIZ DE RELACIÓN DE DEPENDENCIA DE VARIABLES	45
TABLA 4.2. MATRIZ DE VARIABLES ENTRADA.....	45
TABLA 4.3. MATRIZ DE VARIABLES DE SALIDA	45
TABLA 4.4. COEFICIENTES DE FRICCIÓN PARA CORREAS DENTADAS	51
TABLA 4.5. FACTOR DE SEGURIDAD SEGÚN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CORREA	52
TABLA 4.6. DATOS PARA EL EJE Y	54
TABLA 4.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS TORNILLOS DE POTENCIA	56
TABLA 4.8. COEFICIENTE DE FRICCIÓN PARA TORNILLO DE POTENCIA	57
TABLA 4.9. SELECCIÓN MATERIAL DE IMPRESIÓN 3D.....	58
TABLA 4.10. PROPIEDADES DEL MATERIAL CONSTRUCTIVO.....	59
TABLA 4.11. RESUMEN DE RESULTADOS	63
TABLA 4.12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MOTOR	65
TABLA 4.13. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CABEZAL LÁSER	67
TABLA 4.14. CONSUMO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS	68
TABLA 4.15. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN	69

TABLA 5.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIAL DE ABS FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D.....	80
TABLA 5.2. RESUMEN DE RESULTADOS.....	83
TABLA 5.3. VALORES ESTÁNDARES PARA RUTEADO MEDIANTE LÁSER DE PISTAS EN PLACAS PCB.....	91
TABLA 5.4. RESULTADOS DE VARIABILIDAD OBTENIDA.....	92
TABLA 5.5. COMPARATIVA DE VALORES MEDIDOS.....	93
TABLA 5.6. DESCRIPCIÓN DE GASTOS DIRECTOS.....	96
TABLA 5.7. GASTOS INDIRECTOS.....	97
TABLA 5.8. GASTO TOTAL DE CNC LASER DOBLE LADO.....	97

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del Proyecto: Diseño y construcción de una CNC láser doble lado para el ruteado de microplacas PCB para la Empresa INPRONIC SOLUTIONS.

Modalidad de titulación:

Propuesta Tecnológica

Proyecto de Investigación

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Equipo de trabajo de titulación:

Alajo Anchatuña Jaime Fernando Estudiante

Calvopiña Herrera Álvaro Julio Estudiante

Ing. Navarrete López Luis Miguel Tutor

Área de conocimiento: Ingeniería, industria y construcción

Subárea del conocimiento: Ingeniería y profesiones a fines.

Subárea específica del conocimiento: Electrónica y automatización

Línea de investigación: Tecnologías de la información y las comunicaciones, robótica, automatización y optimización de sistemas.

Sub líneas de investigación de la carrera: Automatización de los procesos e inteligencia que va a estar aplicando a todos los procesos electromecánicos. Se realizará un diseño, construcción y mantenimiento de todos los elementos, prototipos y los sistemas electromecánicos.

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la elaboración del ruteado de placas PCB constituye un pilar fundamental en el desarrollo de dispositivos electrónicos de alta precisión y funcionalidad por lo que permiten la conexión de aparatos y componentes electrónicos de manera efectiva optimizando así los procesos de manufactura e impulsando la innovación tecnológica en el ámbito industrial. En este contexto la tesis titulada “Diseño y construcción de una CNC láser doble lado para el ruteado de microplacas PCB para la empresa Inpronics Solutions” se plantea como una solución tecnológica que combine la precisión del ruteado láser con la automatización de una máquina CNC, permitiendo operar en ambas caras de la placa mejorando así la calidad de ruteado.

Este proyecto nace con el propósito de superar las restricciones que presentan los métodos manuales en el proceso de ruteado de PCB que suelen requerir procesos tediosos y múltiples intervenciones por la inadecuada transferencia de tinta hacia la placa, por lo que la funcionalidad del doble láser propuesto ofrece ventajas significativas respecto a los métodos antes mencionados, ya que disminuye de manera significativa el tiempo de rutero y minimiza los errores en este procedimiento que es parte de la producción de placas electrónicas. De esta forma se ha integrado un sistema de control automatizado y basado en un software de diseño asistido se ha planteado la implementación del sistema propuesta para conseguir la mejora de los procesos de ruteado de PCB a pequeña escala.

Considerando estos aspectos, la CNC propuesta combina el análisis teórico de los componentes con el diseño asistido por computador y la simulación con la validación experimental del prototipo, utilizando herramientas de modelado digital, sistemas de control automatizado y técnicas de retroalimentación las cuales aseguran la correcta ejecución de cada tarea de la máquina, garantizando que esta cumpla con los requerimientos de precisión mínimos demandados por la industria, dando como resultado un aporte innovador para Inpronics Solutions, mejorando los procesos de fabricación de PCB's se logrará alcanzar la eficiencia y competitividad en el mercado del sector.

Finalmente, el proceso de ruteado de placas PCB se considera como una tecnología revolucionaria que permita innovar los procesos de fabricación de circuitos electrónicos. Su implementación permitirá establecer una base tecnológica sólida, lo que facilitará a las empresas del sector el fortalecimiento de sus equipos y la optimización de sus procesos de producción. Esto contribuirá a la mejora de la industria, garantizando sistemas de alta calidad y mayor competitividad en el mercado del sector.

2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En la ciudad de Latacunga se encuentra ubicada la empresa INPRONIC SOLUTIONS, la misma que enfrenta desafíos con el desarrollo y elaboración de diversos tipos de placas PCB.

La falta de automatización en el ruteado de las placas ha ocasionado dificultades como retrasos en la entrega de productos, los costos de la producción han incrementado, el aumento en la probabilidad de errores en el diseño placas defectuosas que afectan el funcionamiento de los circuitos electrónicos.

Estas deficiencias afectan negativamente en la competitividad de la empresa, generando pérdidas económicas y el riesgo de disminuir el número de clientes. Además, el no tener un sistema automatizado impide una producción más ágil y, limitando la capacidad de la empresa para atender mayor demanda.

Actualmente, los métodos de ruteado de las placas empleados en la empresa son manuales, los mismos que son catalogados poco eficientes ya que generan procesos repetitivos, un esfuerzo considerable y pérdida de tiempo significativa. Por lo que al no contar con una máquina láser que ayude al ruteado de PCB, y no existir una automatización y mejoramiento en el desarrollo de placas puede ocasionar problemas relacionados con la pérdida de clientes, además de placas mal diseñadas que produzcan complicaciones durante su uso e implementación.

La Figura 2.1 permite identificar el esquema de Ishikawa, el cual indica las causas y efectos tomando en cuenta puntos cruciales relacionados al diseño y construcción de la máquina y al problema en cuestión.

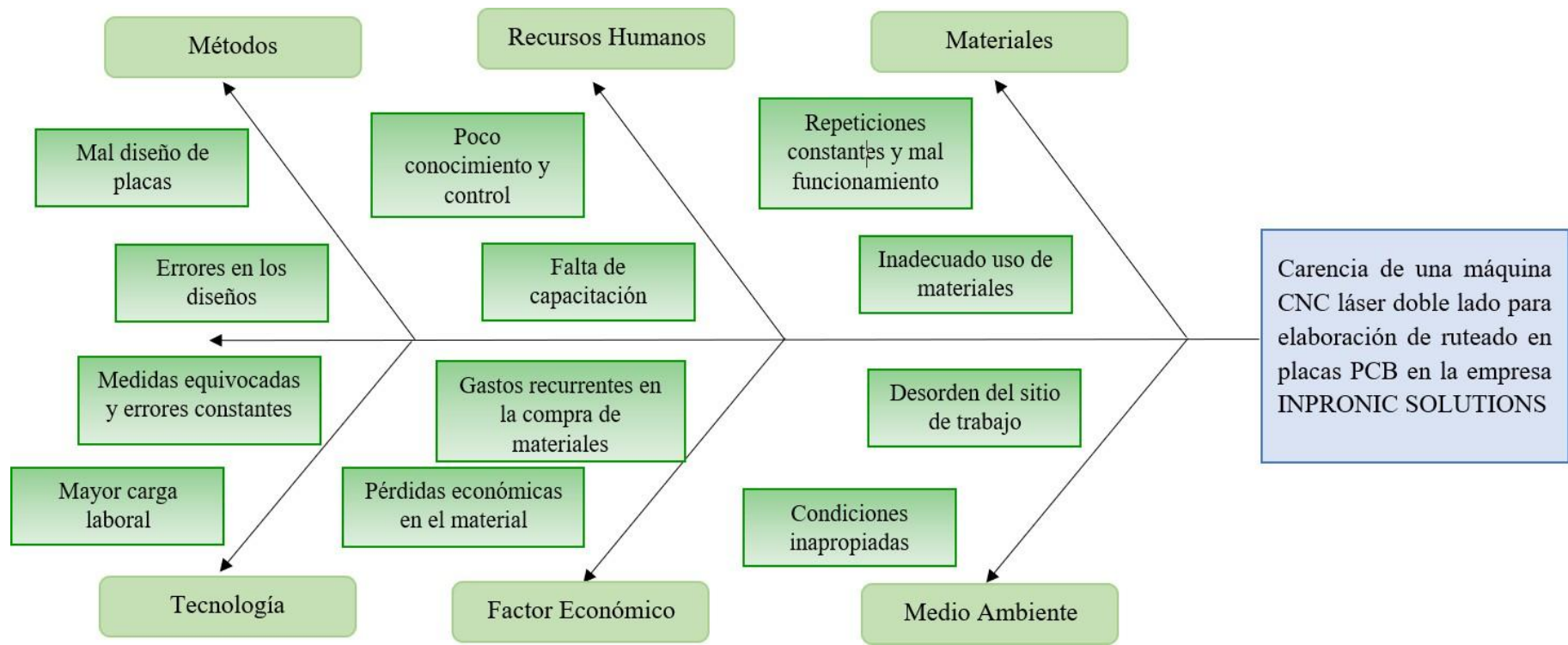


Figura 2.1. Diagrama de Ishikawa de máquina CNC láser [14]

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Dificultad en el proceso de ruteado de las placas PCB en la empresa INPRONIC SOLUTIONS PCB debido al uso de métodos manuales como dibujar y semiautomatizados que generan imprecisiones en el ruteado, tiempos prolongados y baja repetibilidad.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de investigación

Máquina CNC láser doble lado para el ruteado de placas PCB.

2.3.2. Campo de acción

Control y automatización de máquinas e impresiones de placas

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Beneficiarios directos

Los beneficiarios con el diseño y construcción de la CNC doble lado serán los propietarios de la empresa INPRONIC SOLUTIONS, quienes podrán optimizar el tiempo de ruteado de PCB, ofertando así productos de calidad y llegando a ser una empresa competitiva en el mercado.

2.4.2. Beneficiarios indirectos

El presente proyecto tubo como beneficiarios indirectos a los clientes de la empresa, los mismos que tendrán placas ruteadas de mayor calidad de acuerdo a sus necesidades y diseños establecidos, logrando así el cumplimiento y satisfacción de dichos clientes.

2.5. JUSTIFICACIÓN

La implementación y uso eficiente de máquinas CNC láser constituye un factor determinante para el sector industrial ya que aporta a la innovación y optimización de los procesos de ruteado de microplacas PCB dentro de la industria electrónica, especialmente para la empresa como INPRONIC SOLUTIONS, que busca mantenerse competitiva en un mercado altamente exigente. El proceso de ruteado tradicional de PCB a menudo involucra procesos manuales secuenciales que requieren múltiples intervenciones manuales, lo que genera un incremento en los tiempos de producción y un mayor riesgo a generar errores. En este contexto, el diseño y construcción de una CNC láser doble lado se presenta como una solución integral que permite trabajar de manera simultánea en el ruteado de ambas caras de la placa, reduciendo

significativamente los tiempos de procesamiento y minimizando la posibilidad de imprecisiones.

Por lo que la integración de tecnología láser en una máquina CNC aporta ventajas determinantes en cuanto a la precisión y calidad del ruteado. La capacidad de realizar operaciones en doble cara en una única etapa mejora la producción y permite optimizar el uso de materiales disminuyendo los costos operativos, evitando la realización de ensayos posteriores. Esto resulta relevante dentro del proceso de ruteado de placas PCB, donde la exactitud en el posicionamiento de las pistas y cada uno de sus componentes es fundamental para tener un producto en óptimas condiciones.

Desde un punto de vista técnico, el proyecto impulsa el desarrollo y aplicación de sistemas de control automatizados, integración de software de diseño asistido y simulación digital, elementos que potencian la calidad y consistencia del producto manufacturado. Estos avances tecnológicos permiten que INPRONIC SOLUTIONS mejore sus procesos internos y también fortalezca su capacidad para adaptarse a futuras demandas del mercado.

Asimismo, la implementación de una CNC láser doble lado tiene un impacto directo en la reducción de desperdicios y en la mejora de la sostenibilidad del proceso productivo, aspectos cada vez más valorados en un entorno global enfocado en el cuidado del medio ambiente. La automatización del proceso y la reducción en la intervención manual favorecen la estandarización y reproducibilidad de los resultados, asegurando productos de alta calidad que cumplan con las exigencias de precisión y durabilidad requeridas en aplicaciones electrónicas como el proceso de ruteado de placas.

En definitiva, el presente proyecto se enfocó en proveer a la empresa INPRONIC SOLUTIONS un sistema de alta tecnológica que permita optimizar el proceso de ruteado en placas PCB, incrementando la competitividad en el mercado, y abriendo puertas a futuras mejoras e innovaciones en el campo de la manufactura electrónica.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. Objetivo general

Desarrollar una CNC láser doble lado mediante la implementación de sensores y materiales adecuados que contribuyan al proceso de ruteado en placas de PCB en la empresa INPRONIC SOLUTIONS

2.6.2. Objetivos específicos

- Investigar las normas técnicas para el diseño y fabricación de una CNC doble lado para el proceso de ruteado de placas PCB.
- Diseñar una máquina CNC mediante un sistema automatizado para el proceso de ruteado en placas PCB a doble lado que permitan optimizar el proceso manual.
- Validar el desempeño del prototipo mediante pruebas de precisión y tiempos de operación, asegurando su viabilidad técnica para la empresa INPRONIC SOLUTIONS

2.7. SISTEMA DE TAREAS

En la Tabla 2.1 se describe las tareas planteadas para el desarrollo del presente trabajo indicando las actividades y resultados obtenidos.

Tabla 2.1. Sistema de tareas en relación con los objetivos

OBJETIVOS	ACTIVIDADES	RESULTADOS OBTENIDOS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Investigar las normas técnicas para el diseño y creación de una CNC doble lado para el ruteado correcto de placas PCB.	Búsqueda de información sobre las normas técnicas para el diseño y creación de una CNC. Selección de los materiales para la creación de la CNC	Información detallada sobre la CNC láser y sus normas técnicas. Materiales y componentes correctos para la implementación de la CNC.	Libros y fuentes bibliográficas que abalicen la fabricación de la maquinaria.

Diseñar una máquina mediante un sistema automatizado para el proceso de ruteado en placas de PCB a doble lado que permitan optimizar los procesos de fabricación	Investigación útil que ayude al diseño de la CNC tomando en cuenta parámetros claros de construcción. Desarrollo del diseño de acuerdo a los requerimientos de la empresa.	Diseño correcto del prototipo de CNC que cumpla con las expectativas de la empresa. Construcción de la maquinaria que ayudará al proceso de ruteado de placas PCB.	Equipos y programas de diseño que ayuden a la creación del prototipo
Validar el desempeño del prototipo mediante pruebas de precisión y tiempos de operación, asegurando su viabilidad técnica en la empresa INPRONIC SOLUTIONS	Desarrollo de pruebas que validen el buen funcionamiento de la CNC láser. Capacitación necesaria al personal técnico encargado de operar la CNC láser a fin de evitar errores.	Maquinaria en condiciones de funcionamiento. Personal técnico capacitado para el uso de la CNC láser.	Pruebas de funcionamiento que abalicen la construcción de la CNC láser.

3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

3.1. ANTECEDENTES

La tecnología láser ha revolucionado las industrias, posicionándose como técnica muy utilizada dentro del sector industrial, es por esto que con el pasar del tiempo se han ido implementado tecnologías que permitan hacer el trabajo más sencillo para tener un resultado deseado, de tal manera que Santiago David y Sánchez Luna de la Universidad de México en su tema “Rediseño de una máquina láser CNC” mencionan que una máquina láser CNC en la actualidad es muy

buena opción para llevar a cabo el maquinado y ruteado de diferentes piezas y modelos en placas PCB sin importar sus procesos o la complejidad de los diseños, por lo que dicha herramienta es catalogada como factible, además de brindar la oportunidad de trabajar en todo tipo de prácticas de diseño, fomentando a la vez la rapidez y el correcto ruteado de placas [1].

De acuerdo con Minchala Byron y Silva Edwin en su investigación establecen que una máquina láser dispone de un sistema eficaz dentro del proceso de manufactura para obtener ruteados de calidad reduciendo el mínimo de errores. Por lo que un sistema láser comprende una visión extensa debido aún recurso tecnológico que puede ser operado tanto de manera manual como automática teniendo como finalidad la eliminación del humano en procesos de ruteado láser, además de ayudar a la empresa a aumentar su productividad sin tener que realizar o repetir procesos simultáneos varias veces para obtener un acabado de calidad de acuerdo a las condiciones que solicita el cliente [2].

Delgado Ignacio y Salinas Jaime de Escuela Politécnica del Litoral en su investigación plantean que, las máquinas CNC láser son utilizadas en diversos sectores y para diferentes aplicaciones de corte o ruteado sea en materiales como acrílico, madera y placas PCB, estas permiten tallar cualquier diseño o modelo sobre la superficie de la placa o material simplificando y realizando de manera más rápida, sofisticada y efectiva cualquier tipo de corte o ruteado de pistas. Las máquinas CNC se enfocan en el diseño de figuras lo cual es constituye un método muy eficaz en la manufactura sirviendo para mejor la producción y disminuir tiempos de operación sin necesidad del factor humano para los procesos repetitivos. [3]

Considerando las terminologías anteriores se puede establecer que una CNC láser es una máquina que aporta significativamente al desarrollo, diseño y elaboración de placas y ruteados PCB que permiten ejecutar un trabajo de calidad y de manera más rápida logrando así optimizar el tiempo y, sobre todo aumentando el desarrollo productivo de las empresas dedicadas a la industria electrónica. Esta investigación se tuvo como finalidad reducir errores durante el proceso de la creación de una placa, cuando es realizada de forma manual y sin tener un adecuado control y manejo de los elementos que ayudan a su diseño y creación.

3.2. CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO CNC

La gestión del movimiento de los componentes de una máquina se realiza mediante la incorporación de instrucciones codificadas en datos numéricos, lo que define el método CNC. Este sistema tiene sus orígenes en las décadas de 1940 y 1950, época en la que se desarrollaron las primeras máquinas de control numérico. Estas primeras versiones se basaban en equipos

preexistentes, equipados con motores que interpretaban los números y los convertían en instrucciones a través de tarjetas perforadas utilizadas en los microscopios [4].

De manera similar, el sistema de control numérico computarizado (CNC) supervisa de forma continua la posición de un elemento físico, que generalmente es una herramienta acoplada a una máquina, y opera mediante programas informáticos. El CNC es una técnica que automatiza la operación de las máquinas utilizando software incorporado, lo que ofrece una mayor precisión y rapidez, independientemente de la complejidad y la repetición del diseño que se esté implementando [5].

Mencionar que el CNC es un sistema basado en la automatización y la programación de elementos que ayudan al desarrollo y control de máquinas para la creación de cortes y diseños de acuerdo a las necesidades del operador sin tomar en cuenta la complejidad del diseño a desarrollarse.

3.2.1. Tipos de sistemas CNC computarizado

3.2.1.1. Sistema de control punto a punto

Las operaciones de taladrado, punzonado y fresado son las principales aplicaciones del sistema punto a punto, donde el posicionamiento y la ejecución de la tarea se realizan de manera secuencial. En este sistema, cada eje del CNC se activa de manera independiente usando tornillos de avance, los cuales operan a varias velocidades esto depende de la operación específica que se esté llevando a cabo.

3.2.1.2. Sistema de control de trayectoria continua

El control preciso y la sincronización de velocidades y movimientos son esenciales en este proceso, ya que el sistema opera según la trayectoria preestablecida. En otras palabras, a lo largo de trayectorias reguladas a distintas velocidades, el sistema gestiona tanto el posicionamiento como la ejecución de las operaciones [6].

3.2.2. Campos de aplicación

En el ámbito industrial, el CNC se emplea en una variedad de aplicaciones, tanto en procesos de pequeña como de gran escala. Este sistema es crucial en áreas que requieren el uso de máquinas CNC, incluyendo la extracción y fabricación de metales, el mecanizado por descarga eléctrica, la industria maderera, y cualquier otra aplicación que demande un control preciso de movimientos asociados al fresado, taladrado, cizallado, punzonado o tallado de puntos.

3.2.3. Funcionamiento

El funcionamiento del CNC se basa en un control preciso del posicionamiento a lo largo de los 3 ejes como se presenta en la Figura 3.1, donde su posicionamiento se realiza mediante la manipulación cartesiana. Esta cuenta con articulaciones prismáticas que se alinean con cada uno de los ejes, formando ángulos agudos de 90° entre ellos.

De tal manera el funcionamiento CNC facilita el diseño de modelos y está asociada a la dirección de los movimientos de los ejes de la máquina teniendo como limitaciones el área de trabajo en relación al tamaño de la máquina [7].

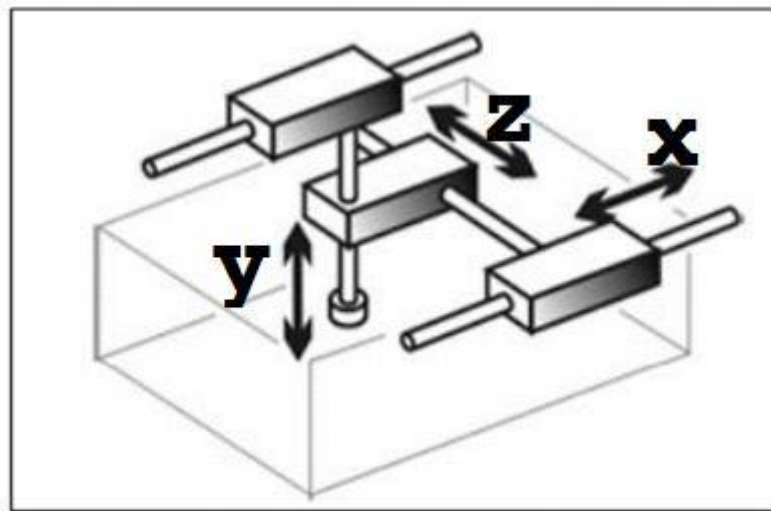


Figura 3.1. Funcionamiento CNC [7]

3.2.4. Mecanizado basado en máquinas CNC

El mecanizado de piezas mediante CNC se lleva a cabo utilizando un sistema de coordenadas que define los movimientos en relación con los ejes, a través de un programa informático gestionado por un ordenador. El control de los movimientos de sus ejes en la máquina de control se realiza mediante lazos de control que incluyen encoders o guías lineales y una unidad central, garantizando que un lazo de control específico regule cada eje.

Mediante el uso de un programa ejecutado, estas coordenadas de la máquina ayudan a gestionar los movimientos del eje X, lo que a su vez facilita el control de los movimientos de los ejes de la máquina [7].

3.3. MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA

Para mantener un control estable durante el desarrollo y ruteado de piezas, el control numérico computarizado es una de las aplicaciones más importantes, ya que gestiona los movimientos de los ejes de la máquina. Además, estas máquinas mejoran considerablemente la repetibilidad de los modelos de impresión, los tiempos de producción, la precisión y la exactitud. En el proceso de transformación de materiales para la fabricación de productos finales, las máquinas CNC, que son herramientas convencionales, desempeñan un papel fundamental [8].

3.3.1. Tipos de máquinas

Las máquinas CNC son consideradas la piedra angular de la fabricación moderna de piezas industriales, las cuales han sufrido cambios desde su creación hasta su funcionamiento, entre los tipos de máquinas CNC tenemos:

- **Máquina CNC router:** Se caracteriza por estar equipada con varios motores en sus ejes haciendo del trabajo la fabricación de piezas industriales de manera rápida, por lo que su mecanismo consiste en varios cortes o ruteados dentro del material objetivo, la máquina CNC router tiene un ordenador fácil de operar y manejar ya que puede trabajar en materiales mecánicos y de madera.
- **Máquina CNC láser:** Consiste en una intervención muy reciente por lo que se caracteriza en el ruteado y corte de piezas a través de una luz que permite acabados exactos en poco tiempo y sin complicaciones. El láser de la máquina permita tener facilidad al usuario para el desarrollo y modelado de piezas cumpliendo los márgenes de complejidad y aceptabilidad [9].

3.3.2. Estructura de la máquina

Una CNC consta de seis componentes, como se muestra en la Figura 3.2, entre ellos se incluyen:

- **Dispositivos de entrada:** Se emplean para acceder a la máquina CNC a través de su programa. Los tres dispositivos de entrada más comunes incluyen el lector de cinta perforada, el lector de cinta magnética y la computadora, que se conecta mediante la comunicación RS-232-C.
- **Unidad de control:** Se considera el corazón de la máquina, ya que es responsable de ejecutar el control de la misma.
- **Máquina o herramienta:** Es la estructura o máquina deslizante que alberga el husillo, encargado de regular la posición y la velocidad de los ejes coordinados X, Y, Z.

- **Sistema de conducción:** Incluye circuitos amplificadores, motores de accionamiento y un husillo de bolas que se activan según las señales de control enviadas al dispositivo de control.
- **Dispositivos de retroalimentación:** Estos dispositivos incluyen transductores que funcionan como sensores, monitoreando constantemente la posición y velocidad de la herramienta o ruteado en todo momento. También se les conoce como sistemas de medición, pues los transductores envían señales a la unidad de control, la cual a su vez genera señales de control que permiten determinar la velocidad y posición de la máquina [23], [24].
- **Monitor o unidad de visualización:** Se emplea para exhibir los programas, comandos y otros datos relevantes de la CNC.

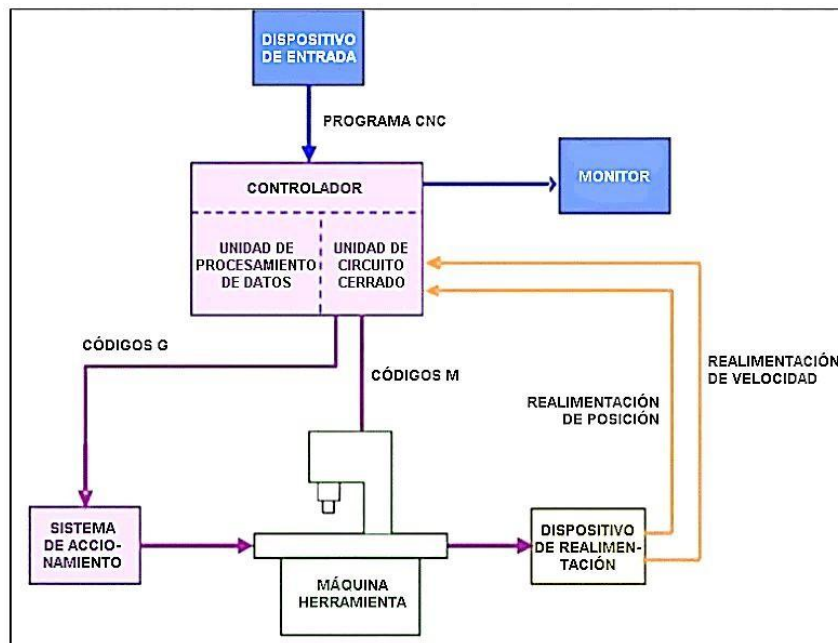


Figura 3.2. Estructura de la CNC [12]

3.3.3. Mecanismos de transmisión del movimiento la máquina.

Los mecanismos de transmisión son el conjunto de elementos y dispositivos encargados de transferir la potencia generada por los actuadores hacia los diferentes compoentes móviles de la máquina, además cumplen con la función de convertir movimientos circulares en líneas entre otros. Algunos de los componentes más utilizados en las máquinas CNC serán abordados a continuación [25].

3.3.3.1. Sistema Piñón-Cremallera

El sistema de piñón y cremallera consiste en un engranaje dentado, conocida como piñón, que se acopla con una barra dentada llamada cremallera. Cuando el piñón gira, produce un movimiento lineal en la cremallera, facilitando así la transmisión de fuerza y el desplazamiento dentro de un sistema [26], [27].

- **Aplicaciones en Maquinas CNC Cartesianas**

Los sistemas de transmisión por piñón-cremallera se utilizan en robots CNC cartesianos debido a su:

- Alta eficiencia mecánica.
- Precisión y repetibilidad.
- Capacidad para transmitir altas cargas sin pérdidas significativas de energía [29].

- **Tipos de Transmisión Piñón-Cremallera**

- Piñón-cremallera de dientes rectos: Adecuado para aplicaciones de alta velocidad y baja carga [30].
- Piñón-cremallera helicoidal: Reduce el ruido y permite una transmisión más suave [31].
- Piñón-cremallera con engranaje planetario: Mejora la distribución de carga y reduce la holgura mecánica.

- **Fórmulas Fundamentales**

Las características se muestran en las ecuaciones desde la 3.1 a la 3.5 respectivamente.

- **Velocidad Lineal:**

$$v = \omega \cdot r_p \quad [\text{m/s}] \quad (3.1)$$

Donde:

- ω : Velocidad angular del motor (rad/s).
- r_p : Radio primitivo del piñón (m).

- **Torque del Motor:**

$$T = F_t \cdot r_p \quad [\text{Nm}] \quad (3.2)$$

Donde:

- F_t : Fuerza tangencial (N), calculada como:

$$F_t = m \cdot a + \mu \cdot m \cdot g \quad (\text{ejes horizontales}) \quad (3.3)$$

Donde:

- m : Masa móvil (kg)
- a : Aceleración (m/s²)
- μ : Coeficiente de fricción.

3.3.3.2. Tornillo de Potencia

A través de una rosca helicoidal, el movimiento rotacional se transforma en movimiento lineal mediante un tornillo de potencia. Es utilizado en máquinas CNC para desplazar cargas con gran precisión [28].

- **Eficiencia Mecánica**

La eficiencia (η) de un tornillo de potencia se describe como la proporción entre la potencia útil de salida y entrada, representada en la ecuación 3.4.:

$$\eta = (F v) / (T \omega) \quad (3.4)$$

Donde:

F es la fuerza axial transmitida,

v es la velocidad lineal,

T es el torque,

ω velocidad angular [31].

- **Relación de Avance**

La relación de avance (L) indica la distancia lineal por cada vuelta completa:

$$L = n P \quad (3.5)$$

Donde n es el número de entradas de la rosca y P es el paso de la misma [29].

- **Tipos de Tornillos de Potencia**

Existen varios tipos de tornillos, entre los más usados en CNC:

- Tornillo trapezoidal: Alta capacidad de carga, menor eficiencia.
- Tornillo de bolas: Baja fricción, alta precisión.
- Tornillo ACME: Uso general, moderada eficiencia [32].

3.3.4. Funcionamiento de la máquina CNC

El funcionamiento de una máquina CNC se realiza a través de un controlador que recibe instrucciones en forma de códigos de una computadora. Este controlador utiliza un software para transformar estas instrucciones en señales eléctricas que activan los motores que operan el sistema de la CNC, el cual desempeña diversas funciones como:

- **Control de movimiento:** Las CNC posee 2 o más direcciones de movimiento estas son programables, conocidas como ejes, que pueden ser lineales o rotativos, es decir, siguen trayectorias lineales o circulares. El control de estos movimientos se lleva a cabo a través de dos sistemas que pueden operar de manera independiente o en conjunto. Estos sistemas son:
 - Valores Absolutos (código G90): Esta considera las coordenadas desde el punto de destino-origen, utilizando las variables X y Z. La variable X se refiere al diámetro final, mientras que Z alude a la medida en la dirección de giro del husillo paralela al eje.
 - Valores Incrementales (código G91): La medida en dirección paralela al eje de giro del husillo está representada por W, mientras que la distancia radial está indicada por U. Utilizando las variables U y W, estas son las coordenadas desde el punto de destino hasta el punto actual.
- **Accesorios programables:** Son aquellos sensores, módulos y materiales apropiados que pueden programarse en función requerida la máquina CNC entre estos están la velocidad y activación del husillo la cual puede disminuir o aumentar dependiendo las necesidades del operador.
- **Programa CNC:** Se trata de una secuencia de instrucciones que la máquina seguirá para fabricar la pieza, incluyendo toda la información necesaria para su elaboración. El programa CNC está redactado en un lenguaje conocido como G y M, que son códigos y valores secuenciales utilizados para dirigir los movimientos de los elementos del CNC.
- **Trabajo de la máquina:** La maniobra de la máquina se basa en el programa preparado, el cual incluye comandos de movimiento y se apoya en el sistema de conducción que regula el control del movimiento y la velocidad de la máquina. Por otro lado, el trabajo

de la máquina también consiste en registrar las señales de referencia permitiendo corregir errores y enviar nuevas señales para que se desarrolle un trabajo correcto.

- **Programa Parcial:** Es una serie de instrucciones que detallan el trabajo a realizar en una pieza bajo el control del CNC, esencialmente consiste en preparar una hoja de programa a partir de un dibujo técnico [10].

3.3.5. Ventajas de la inclusión de una CNC en la Industria

La incorporación de las máquinas CNC dentro de la industria ha permitido contribuir significativamente al desarrollo de los procesos de fabricación, ruteado y elaboración de piezas. De tal manera que contar con una máquina CNC ofrece múltiples ventajas, como:

- Optimiza los procesos de trabajo de las personas de la empresa
- Mejora la precisión y el modelo de la pieza
- Tiene mayor uniformidad en la producción
- Reduce la fatiga y el trabajo del operador
- Posibilita la simulación de procesos de modelado, corte y mecanizado.

3.3.6. Campos de aplicación del Equipo

Las máquinas CNC son empleadas en múltiples aplicaciones dentro del sector industrial, tanto en procesos pequeños como en gran escala. Las áreas industriales que requieren el uso de estas máquinas incluyen la extracción y fabricación de metales, el mecanizado por descarga eléctrica, y las industrias madereras, entre otras que necesitan un control preciso de movimientos. Los CNC que se especializan en mecanizado pueden incluir equipos como fresadoras, taladros, sierras, centros de mecanizado, cizalladoras, punzonadoras y prensas [18].

3.4. LÁSER

Es un aparato que emite un haz de luz extremadamente concentrado y coherente a través de un proceso de emisión estimulada de radiación. A diferencia de otras fuentes de luz, el láser emite un rayo que es monocromático, direccional y de alta intensidad, esto permite su implementación en una amplia variedad de áreas como la medicina, la industria, las comunicaciones y la investigación científica [11], [12].

El láser es un dispositivo que se encarga de generar luz intensa a través de la radiación permitiendo su uso en diferentes aplicaciones en especial en la industria.

3.4.4. Comparación de Máquinas CNC Láser

Tabla 3.1. Comparación de máquinas CNC láser basada en varios criterios técnicos.

Tipo de Láser	Longitud de Onda de Emisión	Potencia de	Régimen de Emisión	de Medio Activo
Láser de CO2	10,6 μm	20-100 Watts	Continuo	Gas CO2
Láser de Fibra	1060 nm	500 Watts - 5 kW	Pulsado o continuo	Dopado con elementos de tierras raras (Yb)
Láser de Diodo	445 nm	1-5 Watts	Pulsado	Semiconductor de GaN

En la Tabla 3.1 se detallan las características de diferentes tipos de máquinas CNC láser, incluyendo láser de CO2, láser de fibra y láser de diodo, evaluadas según la longitud de onda de emisión, potencia, régimen de emisión y características del medio activo. Esta información es esencial para seleccionar el tipo de láser más adecuado para el desarrollo de la investigación, considerando factores como la capacidad de corte, velocidad de operación.

3.4.1. Propiedades del láser

Un dispositivo láser confiere a la luz características específicas que se consideran en el momento de su implementación como se muestra en la Figura 3.3, entre estas propiedades tenemos:

- **Es monocromática:** La radiación está formada por ondas que comparten la misma extensión de onda.
- **Es coherente:** Las ondas conservan su fase relativa mientras se propagan, como se indica en la. Figura 3.3, el resto se las llama incoherentes.
- **Es direccional:** La dispersión de la radiación es mínima a medida que se aleja de la fuente.

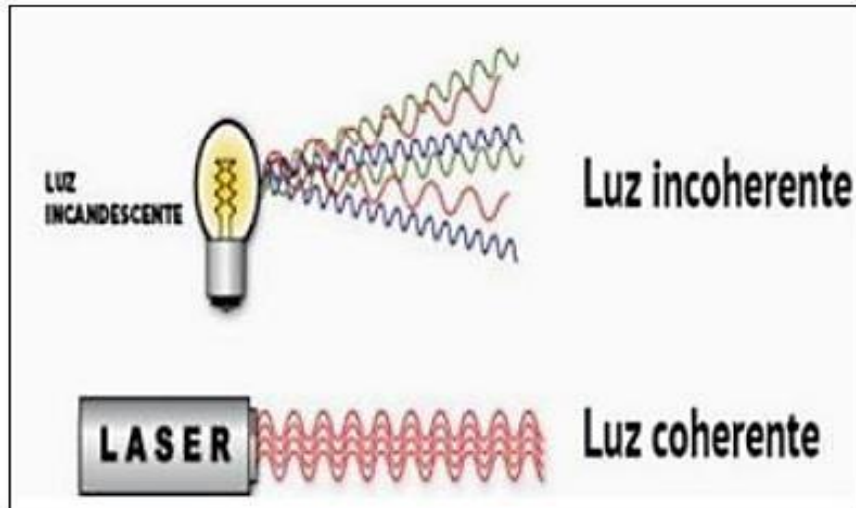


Figura 3.3. Propiedades del láser [10]

3.4.2. Tipos de láser

Existen diversos tipos de láser, los cuales se clasifican según cuatro características principales como:

- Por su longitud de onda de emisión
- Por su potencia
- Por su régimen de emisión
- Por las características de su medio activo

El último tipo de láser considera la estimulación de electrones alrededor del núcleo, lo que se refiere a la carga de átomos en estados sólido, gaseoso o líquido.

3.4.3. Características de una CNC Láser

Las máquinas CNC láser se caracterizan por trabajar a velocidades de tiempo real con alta precisión de corte o ruteado, como toda máquina presenta tiene una interfaz fácil de utilizar para los operadores de esta, además por tres aspectos muy importantes durante su uso:

- **Precisión de los ejes:** Determina la calidad del trabajo mediante la trayectoria del eje la cual es determinada por el tipo de motor que tiene la máquina
- **Láser:** Varía dependiendo el material en el que se desea cortar o grabar, por lo que se puede usar láseres infrarrojos o versátiles.

- **Controlador CNC:** Permite la comunicación entre una interfaz gráfica de una computadora y demás elementos que forman la máquina

3.4.4. Componentes básicos de una CNC láser

Las máquinas CNC láser constituyen parte fundamental en el desarrollo de la electrónica ya que aportan significativamente al cumplimiento de las actividades relacionadas con el ruteado de placas, figuras y demás funciones que la caracterizan. De tal manera que las máquinas láser están compuestas por diversos elementos o componentes que contribuyen a su adecuado funcionamiento, entre estos componentes tenemos:

3.4.4.1. Drivers

El tipo más reciente de láser se basa en la estimulación de electrones alrededor del núcleo, relacionándose con la carga de átomos en formas sólida, gaseosa o líquida [13].

3.4.4.2. Motores paso a paso

Estos dispositivos están diseñados para suministrar energía mecánica a los diversos ejes de la máquina, estos convierten los pulsos electrónicos en movimientos angulares y se pueden mover hasta un rango de 90°.

3.4.4.3. Fuente de poder

Son responsables de suministrar corriente tanto a la interfaz como a los motores, la mayor parte de fuentes están diseñadas para funcionar con un voltaje bajo a fin de que no se quemen o dañen otros dispositivos.

3.4.4.4. Varilla roscada

Se caracteriza por ayudar al sistema de transmisión de la máquina CNC, estas van conectadas directamente al motor para dar pasos o movimientos de acuerdo a las necesidades del operador.

3.4.4.5. Husillo

Es un sistema preciso que lleva la dirección del corte o ruteado este se rige por la velocidad dada por parte del operador, se caracteriza por ser la parte fundamental de la máquina ya que se encarga de desarrollar el trabajo deseado.

3.5. PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (PCB)

Es una placa de circuito impreso que sostiene y enlaza los componentes electrónicos a través de pistas o caminos de cobre, permitiendo el correcto funcionamiento de un circuito o dispositivo, se caracteriza por ser un componente básico de los productos electrónicos que consisten en una superficie plana hecha de un material aislante como fibra de vidrio a la que se une una fina capa de cobre, formando una línea conductora que conecta los componentes.

Las placas PCB son esenciales, ya que proporcionan una forma eficiente y confiable de conectar componentes electrónicos. Su uso es esencial para el desarrollo de dispositivos electrónicos, permitiendo diseños más compactos y eficientes [14].

3.5.1. Tipos de placas

- **PCB de una cara:** Se distingue por su simplicidad, ya que cuenta con un solo lado del sustrato recubierto con una capa de cobre, donde se conectan eléctricamente los componentes. La placa de circuito impreso de una sola cara es económica y de fácil fabricación; sin embargo, tiene restricciones en el diseño del circuito, debido a que las rutas conductoras no pueden interceptarse ni superponerse.
- **PCB de doble cara:** Tiene capas de cobre en los 2 lados de la placa. Por lo que los componentes se pueden unir, especialmente se caracteriza por ser flexible y compacta.
- **PCB multicapa:** Está formada por más de dos capas conductoras, donde dos de ellas se encuentran en las superficies exteriores y las restantes están incrustadas entre capas aislantes. La cantidad de capas en la PCB indica el número de capas de cobre conductoras independientes. Por lo general, las capas superior e inferior corresponden a PCBs de un solo lado, mientras que las capas internas son de doble cara. Todas estas capas se fusionan mediante un proceso de laminado a alta temperatura y presión, creando una única placa.
- **PCB rígido:** Sus materiales son sólidos, como la fibra de vidrio, lo que impide que se doble o pliegue. La placa de circuito impreso rígida puede ser de una cara, de doble cara o multicapa, dependiendo de los requerimientos.

3.6. MÉTODOS MANUALES PARA RUTEADOS DE PLACAS PCB

El ruteado de placas PCB es el proceso en el que se elimina el cobre no deseado y se deja únicamente las pistas del diseño en la capa de cobre del material, existen 2 tipos de ruteado de pistas, entre ellos están las técnicas de ruteado en húmedo y ruteado en seco [15].

3.6.1. Ruteado en húmedo

Este proceso consta en rutear las placas de PCB mediante productos químicos ácidos o alcalinos. El ruteado por ácido utiliza cloruro férrico y cloruro cúprico, este ácido no reacciona con el fotoprotector y tampoco daña la parte deseada sin embargo es mucho más lento que el ruteado mediante producto alcalino, este ruteado alcalino elimina la capa de cobre no deseada según el diseño realizado con precisión, sin embargo, este resulta ser más caro que el ácido. Su proceso trata de ubicar las pistas con sobre el cobre con un material protector y posterior a ellos ubicarlo en un recipiente con el compuesto ya sea ácido o alcalino hasta que el cobre no deseado se elimine como se muestra en la Figura 3.4 [15].



Figura 3.4. Ruteado en húmedo

3.6.2. Método del planchado

El proceso del planchado consiste en transferir una tinta de tóner a una placa PCB para posterior a ello ingresarla al compuesto químico, primero se debe diseñar el circuito e imprimirlo en papel couche para luego este papel ubicarlo en la placa de baquelita o PCB de modo que la capa de cobre haga contacto con la tinta del impreso que se encuentra en el papel couche, posterior a ello se procede a aplicar calor con una plancha sobre el papel como se presenta en la Figura 3.5 lo cual permitirá que la tinta de las pistas se quede pegado en la capa de cobre para

finalmente ingresar esta placa en el compuesto químico hasta que se elimine el cobre siendo la tinta el material protector de las pistas [16].



Figura 3.5. Método del planchado

3.6.3. Método por acetato

Este método consiste en imprimir el diseño eléctrico y ubicarlo sobre la placa PCB para posterior a ellos ubicar manualmente la acetona hasta que la tinta laser se transfiera a la capa de cobre como se presenta en la Figura 3.6, finalmente ubicar la placa al compuesto químico, siendo la tinta el protector de las pistas [17].



Figura 3.6. Método por acetato

3.7. FILAMENTOS DE IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D ha sublevado la forma en fabricación de objetos ya que tiene aplicación para cada industrias y aplicaciones, su amplia variedad de materiales incluye distintos filamentos como: polímero, fibra de carbono, metales de titanio, termoplástico biodegradables, nylon, entre otros.

3.7.1. Polímero Plástico Biodegradable (PLA)

El PLA es un filamento biodegradable de uso frecuente en la impresión 3D. Se produce a partir de fuentes naturales como el almidón de maíz, ofreciendo una opción sostenible frente a los plásticos de origen petroquímico. Además, es fácil de imprimir, con una temperatura de 190-210 °C, baja emisión de olores y disponible en diversos colores y acabados, también este se usa en múltiples aplicaciones, aunque no es adecuado para uso prolongado en exteriores [18].

3.7.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

El filamento ABS es un termoplástico ampliamente utilizado en impresión 3D por su alta resistencia, durabilidad y tolerancia a altas temperaturas, para ser impreso este filamento requiere una cama caliente para evitar deformaciones y se imprime entre 230 y 260 °C. Se usa en prototipos y piezas funcionales gracias a su resistencia mecánica e impacto. Sin embargo, emite vapores durante la impresión, por lo que se recomienda usarlo en áreas bien ventiladas [18].

3.7.3. Fibra de carbono

Es un material resistente y liviano empleado en impresión 3D para fabricar piezas de alto rendimiento, especialmente en los sectores aeroespacial y automotriz, gracias a su excelente resistencia a la tracción. Además, es más cara que otros filamentos, ofrece alta resistencia, estabilidad térmica y resistencia química. Es compatible con impresoras FDM, SLA y SLS, pero su impresión es difícil, genera humos tóxicos y puede presentar un acabado superficial deficiente [19].

3.7.4. Filamento de nylon

El filamento de nylon, derivado de la poliamida, es un material resistente, ligero y flexible, es ideal para piezas mecánicas como engranajes y soportes. Ofrece resistencia al desgaste, calor, químicos y humedad, con un acabado liso y brillante. Además, es propenso a la deformación, se degrada con la luz ultravioleta y requiere altas temperaturas de impresión [19].

3.7.5. Filamento de titanio

El Filamento de Titanio 64-5 es un material para impresión 3D FDM de metal, compuesto por un 80 % de titanio y un 20 % de PLA. Su aleación incluye un 6 % de aluminio y un 4 % de vanadio, lo que posee una gran resistencia a la corrosión y una alta resistencia mecánica. Capaz

de soportar temperaturas de hasta 400 °C, es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica y en las fábricas de implantes médicos [20].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

El presente capítulo tiene como finalidad la descripción, diseño, desarrollo y funcionamiento de CNC láser doble lado para el ruteado de placas PCB para la empresa Inpron Solutions. El objetivo de una CNC doble lado es reducir los tiempos de ruteado de placas, ya que esta permitirá el mecanizado simultáneo en ambas caras de la placa PCB, optimizando la eficiencia del proceso, y permitiendo eliminar la necesidad de reposicionamiento manual de la placa PCB, mejorando la precisión dimensional del producto.

El desarrollo del presente trabajo requiere de una metodología estructura para conseguir los mejores resultados dentro del diseño e implementación del equipo. Para esto se plantea la realización de 6 fases principales mismas que se visualizan en la Figura 4.1.

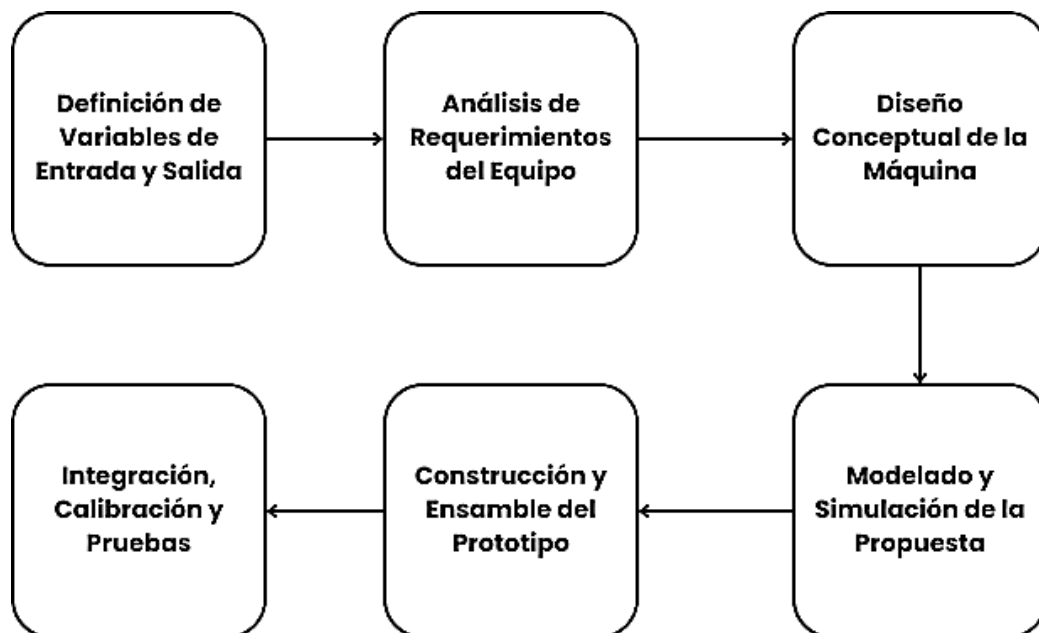


Figura 4.1. Diagrama de Bloques de la Metodología Planteada para la Propuesta

En la primera etapa se determinó las variables involucradas en el proceso definiendo las entradas que influyen en el ruteo de las placas PCB como el tipo de material, velocidad de corte tipo de alineación y potencia requerida en el láser; y las variables de salida como precisión, consumo energético, entre otras. Como segunda fase se realizó un análisis de requerimientos

del prototipo en donde visualizamos de manera detalla las necesidades de la empresa para el ruteo de PCB como por ejemplo el tipo de láser, las dimensiones del PCB, los métodos de programación y las funcionalidades más importantes del equipo.

Asimismo, en la fase 3 se realizó el diseño conceptual del prototipo en donde se seleccionan cada uno de los componentes y subsistemas del prototipo como el diseño de la estructura, selección de material constructivo, dimensionamiento de motores y del sistema de transmisión, la definición de los componentes de control y módulo electrónicos necesarios, así como los módulos de potencia para poder activar los motores.

Posteriormente, en la fase 4 se diseñó el modelado y simulación de los componentes estructurales del prototipo en donde se realiza un análisis estático en base al material seleccionado y las dimensiones definidas en la etapa de diseño para determinar el comportamiento estructural del sistema en base a pruebas de desplazamiento y tensiones comprobando que se haya diseñado la estructura de manera óptima.

La fase cinco se realizó la construcción y ensamble del sistema en donde se especificó los planos tanto estructurales como eléctricos para definir la ubicación de cada uno de los componentes y poder realizar de manera eficiente la etapa de construcción. Se realiza el montaje de los elementos estructurales, la conexión e integración de los motores y componentes electrónicos de control.

Finalmente, la última fase se desarrolló la integración del prototipo implementado con el sistema de conversión de código G, en donde se estableció la calibración y pruebas iniciales definiendo el paso en cada uno de los ejes y las velocidades correspondiente verificando que se encuentren de acuerdo con las especificaciones definidas en los requerimientos de usuario. Con estas pruebas iniciales se procedió a realizar el análisis de la calidad del ruteado, la precisión del alineado entre el número de capas y la duración del procesamiento en relación con otros métodos tradicionales. Con base a esto se determinó las mejoras alcanzadas en términos de eficiencia, precisión y reducción de errores en la fabricación de PCB's.

4.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA

La Tabla 4.1 presenta las variables independientes y dependientes la máquina CNC, lo que resulta fundamental para una comprensión más profunda y estructurada del tema. Identificar estas variables permite establecer relaciones clave y entender mejor el comportamiento del tema en estudio.

Tabla 4.1. Matriz de relación de dependencia de variables

Variables independientes	Construcción de la CNC láser doble lado
Variables dependientes	Ruteado de placas PCB

De igual manera, en la Tabla 4.2 se muestran las variables que ingresan, están relacionadas con la construcción de la CNC laser doble lado, entra ellas están la potencia del láser, velocidad de corte, tipo de material de PCB y método de alineación.

Tabla 4.2. Matriz de variables entrada

Variable	Unidad de medida	Descripción	Rango o valor
Potencia del láser	Watts (W)	Energía del láser aplicada al material	10W - 50W
Velocidad de corte	mm/s	Rapidez con la que el láser se mueve sobre el PCB	100 - 500 mm/s
Tipo de material del PCB	---	Material usado (FR4, CEM-1, etc.), afecta la absorción del láser.	FR4, CEM-1, CEM-3
Método de alineación	---	Sistema usado para alinear ambas caras del PCB (óptico, mecánico, manual).	Óptico, mecánico, manual

Por otro lado, en la Tabla 4.3 se muestran las variables de análisis junto a sus unidades de medida, descripción y rango o valores que determinan la eficiencia de la CNC láser.

Tabla 4.3. Matriz de variables de salida

Variable	Unidad de medida	Descripción	Rango o valor
Precisión del ruteado	mm	Diferencia entre el diseño original y el ruteado final.	$\pm 0,05$ - $\pm 0,2$ mm

Tiempo total de fabricación	min	Duración total del proceso de mecanizado.	5 - 30 min
Porcentaje de defectos	%	Errores en ruteado, alineación o corte respecto al diseño esperado.	0 - 10%
Consumo energético	kWh	Energía total utilizada en el proceso.	0,1 – 1,5 kWh

La Figura 4.2 presenta el diagrama de flujo donde se muestra el desarrollo de forma general de la máquina CNC láser en el cual se ingresan las variables independientes y por medio de un proceso que consta del diseño y construcción, configuración y calibración de la CNC láser y ejecución del ruteado se logra obtener las variables dependientes; precisión del ruteado, tiempo total de fabricación de la PCB, porcentaje de defectos y consumo energético.

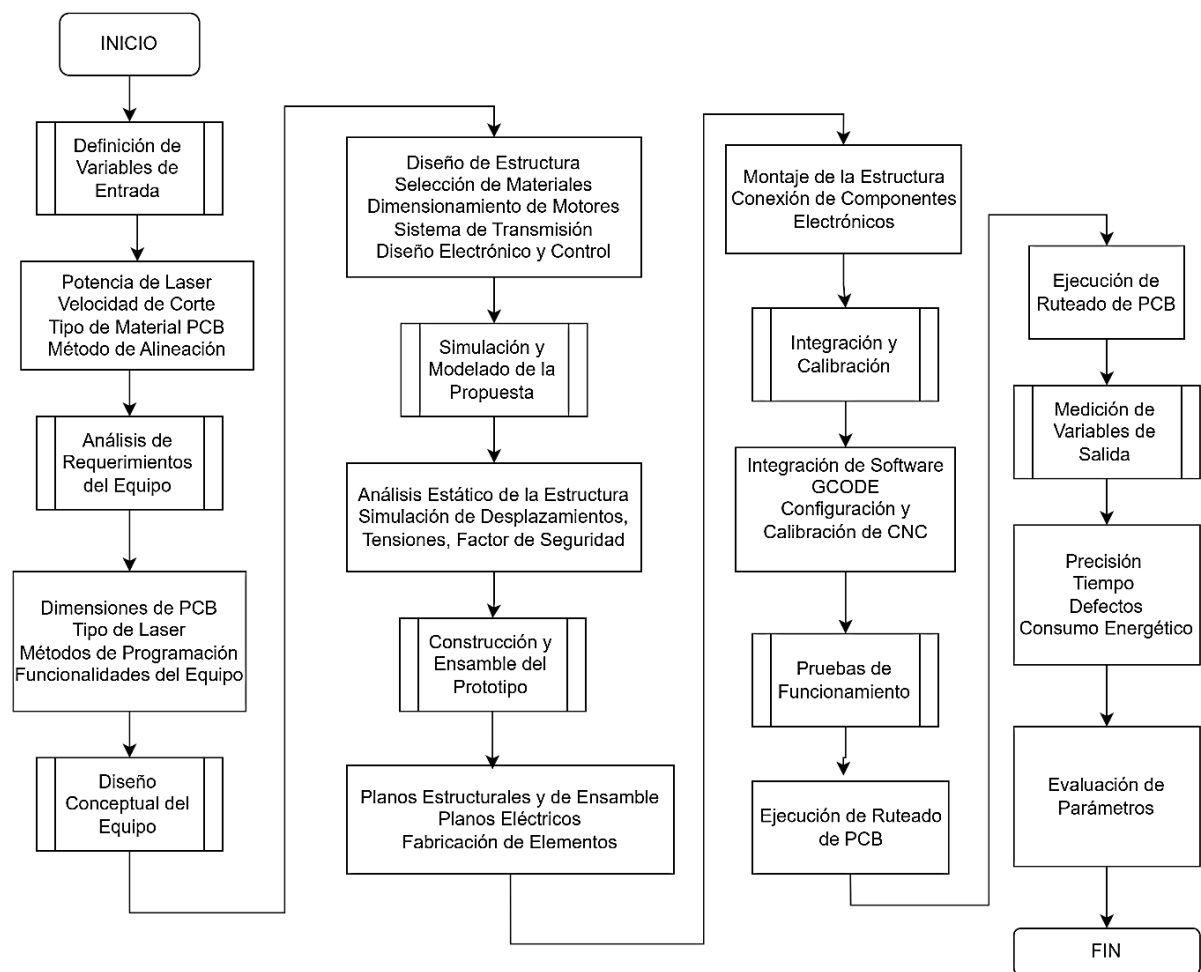


Figura 4.2. Diagrama de flujo de las variables del sistema

4.2. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO

A continuación, se presenta un esquema general basado en diversos módulos, donde se describen las funcionalidades principales, las señales de entrada y salida, y las interacciones entre los módulos. Esta descripción está referenciado a un enfoque de ingeniería concurrente, donde se integran las etapas de diseño, desarrollo y construcción de manera simultánea.

El sistema se divide en módulos funcionales, cada uno con sus respectivas entradas y salidas.

Los módulos principales son:

- Módulo de Control Principal
- Módulo de Movimiento (Ejes x, y, z)
- Módulo Láser (Doble Lado)
- Módulo de Alimentación y Sujeción de PCB
- Módulo de Interfaz de Usuario
- Módulo de Seguridad

4.2.1. Módulo de Control Principal

- **Funcionalidad:** Coordina todos los módulos de la máquina, procesa las señales de entrada y genera las señales de control.
- **Entradas:**
 - Señales de posición (ejes x,y,z).
 - Señales de estado del láser (encendido/apagado, potencia).
 - Señales de seguridad (emergencia, fallos).
 - Comandos del usuario (interfaz).
- **Salidas:**
 - Señales de control para los motores (paso a paso o servomotores).
 - Señales de control para el láser.
 - Señales de estado (pantalla o interfaz).

4.2.2. Módulo de Movimiento (Ejes x, y, z)

- **Funcionalidad:** Controla el movimiento preciso de los ejes para posicionar el cabezal láser.
- **Entradas:**
 - Señales de posición deseada (desde el control principal).
 - Señales de retroalimentación (encoders o sensores).
- **Salidas:**
 - Señales de control para motores.
 - Señales de posición actual (retroalimentación).

4.2.3. Módulo Láser (Doble Lado)

- **Funcionalidad:** Controla el láser para grabar o cortar las placas PCB en ambos lados.
- **Entradas:**
 - Señales de encendido/apagado.
 - Señales de potencia (ajuste de intensidad).
 - Señales de posición (coordenadas x,y,z).
- **Salidas:**
 - Señales de estado del láser (temperatura, potencia actual).
 - Señales de finalización de proceso.

4.2.4. Módulo de Alimentación y Sujeción de PCB

- **Funcionalidad:** Sujeta y posiciona la placa PCB para el procesado.
- **Entradas:**
 - Señales de posición (coordenadas iniciales).
 - Señales de sujeción (activar/desactivar).
- **Salidas:**
 - Señales de estado (placa sujeta, placa en posición).

4.2.5. Módulo de Interfaz de Usuario

- **Funcionalidad:** Permite al usuario interactuar con la máquina.
- **Entradas:**
 - Comandos del usuario (iniciar, pausar, detener).
 - Parámetros de diseño (archivos Gerber, coordenadas).
- **Salidas:**
 - Señales de estado (progreso, errores).
 - Visualización en pantalla.

4.2.6. Módulo de Seguridad

- **Funcionalidad:** Monitorea y protege la máquina y al usuario.
- **Entradas:**
 - Señales de emergencia (botón de parada).
 - Señales de fallos (sobrecalentamiento, obstrucción).
- **Salidas:**
 - Señales de parada de emergencia.
 - Señales de alarma (sonido, luces).

4.2.7. Interconexión de Módulos

- El **Módulo de Control Principal** actúa como el núcleo del sistema, recibiendo entradas de los demás módulos y da señales de control necesarias.
- Los módulos de movimiento, láser y alimentación están interconectados para garantizar un procesado preciso de las placas PCB.
- El módulo de seguridad supervisa todo el sistema y puede detener la operación en caso de fallos.

4.3. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA

Se enfoca en las funciones primarias y secundarias de los parámetros definidos por la empresa Inpron Solutions, con el objetivo de lograr un dimensionamiento adecuado de la estructura metálica. Asimismo, se considera la disponibilidad de los componentes que integrarán el

sistema de control dentro del mercado nacional, permitiendo así una selección óptima de elementos de alta calidad.

El procedimiento del diseño y construcción de la CNC láser doble lado se detalla en varias secciones, se inició por el diseño mecánico, selección de materiales, sistema electrónico y control.

4.3.1. Diseño Mecánico

En cada eslabón de la máquina se emplearon tipos de transmisiones específicos, según lo detallado en los parámetros de diseño. La generación del movimiento en los eslabones es responsabilidad de los sistemas de transmisión, conforme a lo expuesto en la fundamentación teórica. En esta sección, se procedió al diseño y selección de los sistemas de transmisión para cada eje.

4.3.1.1. Diseño Sistema de Transmisión para el eje x

Las transmisiones mediante correas dentadas se distinguen por la ausencia de contacto metálico y por evitar el deslizamiento, a diferencia de las correas de fricción. Entre sus principales ventajas se encuentra la eliminación de la tensión de montaje y la falta de necesidad de lubricación.

4.3.1.2. Cálculo de la Fuerza Periférica

Para determinar la correa adecuada, fue necesario considerar el peso total del conjunto compuesto por el tornillo del eje z y el cabezal láser.

Según la Tabla 4.4, el coeficiente de fricción correspondiente es 0,8 cuando la banda está en contacto con una superficie de aluminio, lo que permite determinar el valor de μ :

$$\mu = 0,8$$

$$a = 0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = 14,662\text{Kg}$$

Se calculó que la estructura tiene un peso de 1,034 kg, lo que resulta en un peso total de la barra en el eje Y de 14,662 kg.

4.3.1.3. Obtención de la Fuerza Periférica

$$Fu = (14,662 * 0,2) + (14,662 * 9,8 * 0,8)$$

$$F_u = 117,9N$$

Tabla 4.4. Coeficientes de Fricción para Correas Dentadas

Fricción deslizante en una superficie seca	Poliuretano / acero liso	$\mu = 0,5$
	Poliuretano / acero rugoso	$\mu = 0,7$
	Poliuretano / acero abrasivo	$\mu = 0,9$
	Poliuretano NFT/ acero liso	$\mu = 0,25$
	Poliuretano NFT/ acero rugoso	$\mu = 0,35$
	Poliuretano NFT/ acero abrasivo	$\mu = 0,6$
	Poliuretano / nylon	$\mu = 0,35$
	Poliuretano NFT / nylon	$\mu = 0,15$
	Poliuretano / aluminio	$\mu = 0,8$
	Poliuretano NFT / aluminio	$\mu = 0,45$
Fricción rodante en una superficie seca	Rodamiento	$\mu = 0,015$
	Rodillo / Correa PU	$\mu = 0,03 / 0,06$
	Cojinete	$\mu = 0,15$

Fuente: [21]

4.3.1.4. Cálculo de la Carga de la Correa Dentada.

Para la elección de la correa, se toman en cuenta los datos:

a aceleración (m/s²)

b ancho de la banda (mm)

Cs Factor de seguridad (adimensional)

dp diámetro piñones de transmisión

Fu Fuerza periférica (N)

Fp space Fuerza transmisible por diente por ancho (N/cm)

μ Coeficiente de fricción (adimensional)

m masa de transporte (Kg)

Td torque (nm)

n1 Revoluciones por minuto (rpm)

P Potencia (kW)

V Velocidad de la correa (m/s)

Zi Número de dientes en el piñón

Zm Número de dientes en el engranaje del piñón del motor

Determinar la carga de la correa, se calculó la fuerza periférica F_u ecuación 4.1, la cual se obtiene mediante la aplicación de la ecuación correspondiente.

$$F_u = (m * a) + (m * g * \mu) \quad (4.1)$$

4.3.1.5. Determinación del Ancho de la Correa.

Utilizando la ecuación 4.2 correspondiente, se determina el ancho de la correa:

$$b = \frac{F_u * C_s * 10}{F_{p \text{ space}} * Z_m} \quad (4.2)$$

Donde los valores C_s , se encuentran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Factor de seguridad según las condiciones de operación de la correa

Carga Estable		1
Carga Impacto	Bajo	1,4
	Promedio	1,7
	Alto	2
Elevadores, montacargas		1,8
Ejes de línea		1,6
Máquinas de papel	Agitadores, calandrias, secadoras, bastidores de bobinado	1,6
	Willows, máquinas Jordan, bombas, cortadoras, amoladoras	1,8
Máquinas para alfarería y cerámica	Cortadoras, granuladoras	1,7
	Máquinas de pulpa	2
Máquinas de lavandería	General	1,6
	Extractores, lavadoras	1,8
Máquinas para el procesamiento de caucho		1,8
Máquinas para trabajar la madera	Tornos, sierras de cinta, cortadoras	1,7
	Sierra circular, cepilladoras, garlopas	1,7
Máquinas de impresión	Rotativas, periódicos, linotipias, cortadoras, plegadoras, revistas	1,6
Máquinas textiles	Máquinas de urdimbre, devanadoras	1,7
	Hilanderas, máquinas de torsión, telares	1,8
Máquinas herramientas	Máquinas de perforación, tornos, máquinas de roscado, cortadoras	1,6

	de engranajes, máquinas de mandrinar	
	Fresadoras, cepilladoras	1,7
	Máquinas de pulido	1,7
Transportadores	Montacargas, paquetes ligeros	1,3
	Tornillo sin fin de horno, elevador de cangilones de delantal, tornillo	1,8
Máquinas de ladrillos		1,8

Fuente: [21]

Donde se obtiene $C_s = 2$

Para determinar el $F_p \text{ space}$ es necesario identificar qué tipo de correa se requiere; (Ver Figura 4.3); para una carga de $117,9 \text{ N}$ se selecciona la correa T5.

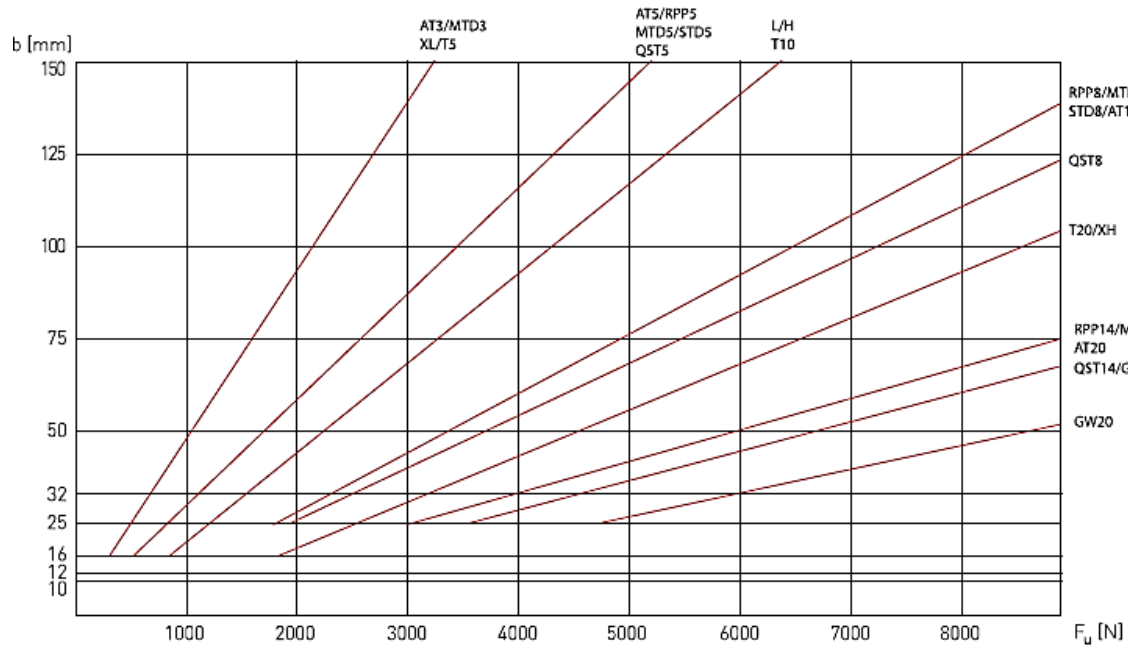


Figura 4.3 Determinación del tipo de banda

La fuerza transmisible por diente y por unidad de ancho se determina a esta velocidad. Para alcanzar un movimiento lineal de $0,4 \text{ m/s}$, se necesita una velocidad de entrada de $95,5 \text{ rpm}$, utilizando un piñón de 20 mm de diámetro. La selección del piñón adecuado se basa en la velocidad de la correa y la velocidad de entrada del motor del eje x [22]. Entonces el ancho es dado por ($F_p \text{ space}$) según el Anexo 6 corresponde a:

$$F_p \text{ space} = 22 \text{ [N/cm]}$$

Un piñón con un diámetro de 20 mm cuenta con 12 dientes (ver Figura 4.4). Mediante la aplicación de la ecuación 4,3, se determina la cantidad en el engranaje del piñón del motor, la cantidad de dientes.

POLEAS		Nº DIENTES	DP	DE	Nº DIENTES	DP	DE
		10	15,92	15,09	25	39,79	38,96
		12	19,10	18,27	28	44,56	43,73
		14	22,28	21,45	30	47,75	46,92
		15	23,87	23,04	32	50,93	50,10
		16	25,46	24,64	36	57,30	56,47
		18	28,65	27,82	40	63,66	62,93
		19	30,24	29,41	42	66,85	66,02
		20	31,83	31,00	44	70,03	69,20
		22	35,01	34,19	48	76,39	75,57
		24	38,20	37,37	60	95,49	94,67

Figura 4.4. Dimensiones y Número de Dientes del Piñón

$$Z_m = Z_1 * \frac{\text{arco de contacto}}{360} \quad (4.3)$$

$$Z_m = 12 * \frac{180}{360}$$

$$Z_m = 6$$

Utilizando los valores previamente obtenidos, se determina el ancho de la correa aplicando la ecuación correspondiente al cálculo del ancho de banda, obteniendo así.

$$b = 17,86\text{mm}$$

Si se observa en el anexo 7. Dado que este ancho no es habitual, se opta por una banda de 25 mm de ancho.

Para el movimiento de eje Y se aplica las mismas condiciones obtenido como resultado valores similares expresado en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Datos para el eje Y

Descripción	Valor
b ancho de la banda (mm)	25 mm
F_p space Fuerza transmisible por diente por ancho (N/cm)	22
C_s Factor de seguridad (adimensional)	2

dp diámetro piñones de transmisión	20mm
Fu Fuerza periférica (N)	8,31
μ Coeficiente de fricción (adimensional)	0,2
m masa de transporte (Kg)	1,034
nI Revoluciones por minuto (rpm)	95,5
V Velocidad de la correa (m/s)	0,4
Zm Número de dientes en el engranaje del piñón del motor	6

Para el movimiento del eje z se selecciona el mecanismo tornillo de potencia utilizando un tornillo de T8 de 100mm de longitud con diámetro de 8mm y un paso de 2mm y 1 hilo. Para seleccionar el tornillo adecuado se debe tener en cuenta las siguientes condiciones:

- Orientación del tornillo: Vertical
- Coeficiente de fricción: Para orientaciones verticales, el coeficiente de fricción tiene un valor equivalente a 1.
- Carga: Para calcular la carga total, se suman la carga de la bandeja, el peso de la pieza más pesada, el peso de la herramienta y el peso estimado de la tuerca del tornillo, obteniendo una masa aproximada de 1.034 kg.

En este diseño se aplica un factor de seguridad de 4 para prevenir el subdimensionamiento del sistema y garantizar que la máquina cumpla con los requisitos de carga y capacidad sin limitaciones [30]

Por lo tanto, se tiene que la carga usando la ecuación 4.4:

$$m_T = 1,034 * FS$$

$$m_T = 1,034 * 4 = 4,136\text{kg} \quad (4.4)$$

Y la fuerza se calcula con la ecuación 4.5:

$$W = m * g$$

$$W = 4,136 * 9,8 = 41,36\text{N} \quad (4.5)$$

El siguiente cálculo tiene como objetivo determinar el ángulo de inclinación de los hilos del tornillo de potencia, lo que permitirá posteriormente calcular el torque requerido. Para ello, es

fundamental conocer el diámetro medio del tornillo de potencia, en la siguiente Tabla 4.7. Basándose en el diámetro exterior y las dimensiones establecidas en los diseños, se determinaron las medidas necesarias para calcular el ángulo.

Tabla 4.7. Características de los tornillos de potencia

Diámetro mayor (in)	Cuerdas por pulgada	Paso de la cuerda (in)	Diámetro de paso (in)	Diámetro menor (in)	Área de esfuerzo por tensión (in²)
0,250	16	0,063	0,219	0,188	0,032
0,313	14	0,071	0,277	0,241	0,053
0,375	12	0,083	0,333	0,292	0,077
0,438	12	0,083	0,396	0,354	0,110
0,500	10	0,100	0,450	0,400	0,142
0,625	8	0,125	0,563	0,500	0,222
0,750	6	0,167	0,667	0,583	0,307
0,875	6	0,167	0,792	0,708	0,442
1,000	5	0,200	0,900	0,800	0,568
1,125	5	0,200	1,025	0,925	0,747
1,250	5	0,200	1,150	1,050	0,950
1,375	4	0,250	1,250	1,125	1,108
1,500	4	0,250	1,375	1,250	1,353
1,750	4	0,250	1,625	1,500	1918
2,000	4	0,250	1,875	1,750	2,580
2,250	3	0,333	2,083	1,917	3,142
2,500	3	0,333	2333	2,167	3,976
2,750	3	0,333	2,583	2,417	4,909
3,000	2	0,500	2,750	2,500	5,412
3,500	2	0,500	3,250	3,000	7,670

4,000	2	0,500	3,750	3,500	10,321
4,500	2	0,500	4,250	4,000	13,364
5,000	2	0,500	4,750	4, 500	16,800

dm = Diametro de paso = 0,277in = 7,0358mm

Para el cálculo de λ se usa la ecuación 4.6.

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{\text{Paso}}{\pi * Dm} \quad (4.6)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{2}{\pi * 7,0358} = 5,74^\circ$$

Utilizando el ángulo de inclinación, se determina el torque necesario para elevar la carga, como se muestra en la ecuación 4.7.

$$T = \frac{W * Dm}{2} \left(\frac{L + \pi \mu Dm}{\pi Dm - \mu L} \right) \quad (4.7)$$

Con un coeficiente de rozamiento de 0,17 acero aceite – acero según la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Coeficiente de fricción para tornillo de potencia

Material del tornillo	Material de la tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido
Acero, seco	0,15 – 0,25	0,15 – 0,23	0,15: 0,19	0,15 – 0,25
Acero, aceite para maquina	0,11 – 0,17	0,10: 0,16	0,10: 0,15	0,11 – 0,17
Bronce	0,08: 0,12	0,04: 0,06	-	0,06:0,09

$$T = \frac{41,36 * 7,0358}{2} \left(\frac{100 * \pi + 0,17 * 7,0358}{\pi * 7,0358 - 0,17 * 100} \right)$$

$$T = 8,9 \text{ kNm}$$

4.3.2. Selección de Materiales

Los filamentos para la impresión 3D son amplios ya que están diseñados para distintas aplicaciones industriales, para escoger el material conveniente para la impresión 3D, se analizó especificaciones técnicas como: temperatura de servicio, resistencia ante impactos, resistencia química, aplicaciones como se presenta en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Selección material de impresión 3D

Propiedades	Elastómero		
	termoplástico (TPE)	Fibra de carbono	Nylon
Resistencia a la tracción	5 – 30 MPa	40 – 60 MPa	40 – 80 MPa
Módulo de elasticidad	0.01 – 0.1 GPa	3 – 4 GPa	1 – 4 GPa
Resistencia química	Media	Baja	Media
Aplicaciones	Sellos, gris, juguetes	Prototipos, piezas estructurales, envases	Engranajes, carcasas, textiles

Analizando las especificaciones técnicas, el PLA se seleccionó por las siguientes razones:

- Su resistencia a la tracción (40-60 MPa) es muy superior a la de materiales como el elastómero, asegurando una carcasa duradera y resistente a golpes.
- Su alto módulo de elasticidad (3-4 GPa) proporciona una estructura rígida y mantiene bien su forma por lo cual no se deforma fácilmente, protegiendo los componentes internos, por lo cual se descarta el TPE, ya que tener módulo de Young de 0,01 a 0,1 GPa resulta ser muy bajo provocando que el material deformable.

4.3.3. Simulación y Modelado de la Estructura

El estudio realizado del análisis estático de la estructura diseñada en SolidWorks (Educativo), con el objetivo de evaluar y determinar el comportamiento estructural del modelo bajo diferentes condiciones de carga El análisis incluyó Evaluación de esfuerzo y deformaciones. Con la verificación de la seguridad estructural frente a cargas aplicadas y la validación de sujeciones y propiedades del material descriptas en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Propiedades del Material Constructivo

Parámetro	Aluminio 6063-T5	Acero al Carbono
Límite elástico (σ_y)	$1,45 \times 10^8$ N/m ²	$2,20594 \times 10^8$ N/m ²
Límite de tracción (σ_t)	$1,85 \times 10^8$ N/m ²	$3,99826 \times 10^8$ N/m ²
Módulo elástico (E)	$6,9 \times 10^{10}$ N/m ²	$2,1 \times 10^{11}$ N/m ²
Coefficiente de Poisson (ν)	0,33	0,28

4.3.3.1. Cargas y Sujeciones

En la Figura 4.5 se observa la distribución de las cargas para el análisis de la estructura.

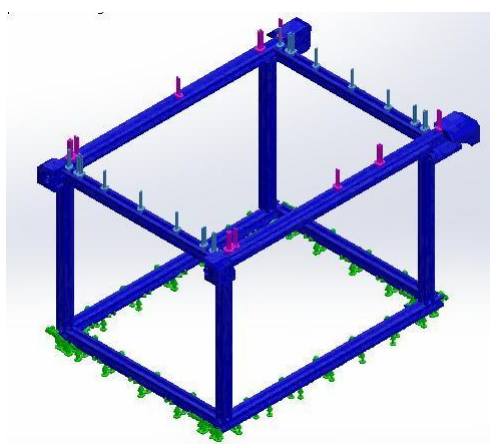


Figura 4.5. Disposición de cargas aplicadas a la estructura.

4.3.3.1.1. Sujeciones

- **Fijo-1:** 8 caras inmovilizadas (traslacional y rotacionalmente).
- **Método:** Selección geométrica directa en el modelo CAD (ver Figura 4.6).

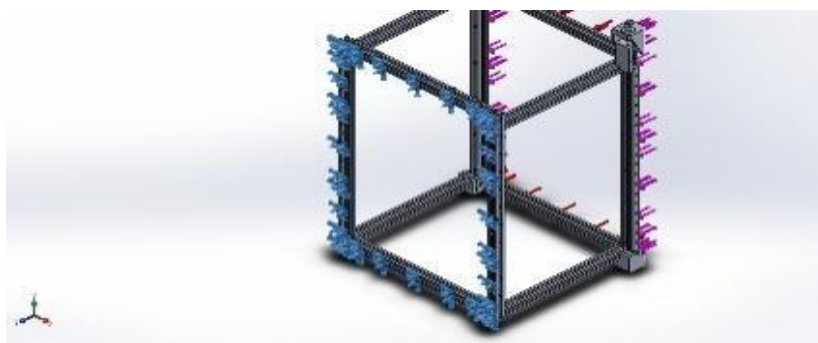


Figura 4.6. Ubicación de sujeción fija.

4.3.3.1.2. Cargas Aplicadas

- **Fuerza-1:**
 - Magnitud: 15 N (normal a la superficie).
 - Entidades: 4 caras (ver Figura 4.7).

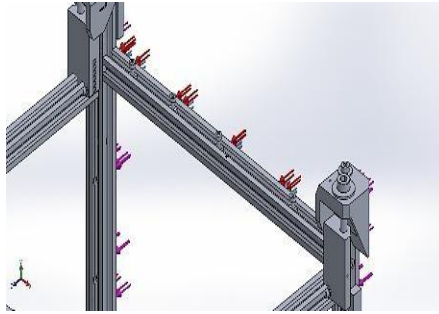


Figura 4.7. Ubicación carga 15 N

- **Presión-1:**
 - Magnitud: Distribución uniforme en 2 caras (valor no especificado, asumido como 5×10^4 Pa basado en estándares).
 - Entidades: 2 caras (Figura 4.8)

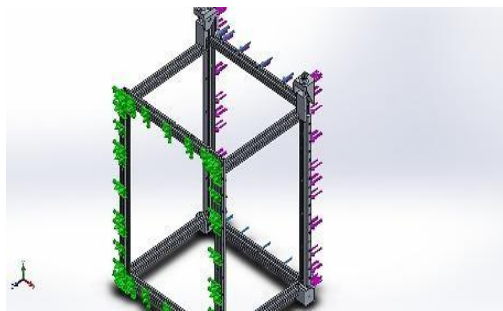


Figura 4.8. Ubicación de esfuerzo cortante.

4.3.3.2. Distribución de Tensiones (Von Mises)

La Figura 4.9 muestra el análisis de tensiones de Von Mises realizado en el software de simulación de elementos finitos de SolidWorks (Educativo). En esta se muestra los resultados clave de "Tensión de von Mises", el valor mínimo es 0,0000 N/mm² (MPa) en el nodo 1 y el valor máximo es 15,4992 N/mm² (MPa) en el nodo 264171. También se especifica que el modelo analizado y pertenece a un estudio de "Análisis estático donde se indica que el tipo de

resultado es "Análisis estático tensión nodal de esfuerzos" y la escala de deformación utilizada es 997,214. En el centro de la imagen se puede observar la estructura analizada, que es una especie de marco tridimensional sometido a cargas externas (representadas por flechas púrpuras) y restricciones en los apoyos (indicadas con flechas verdes). Se observa que la estructura se deforma visiblemente en la parte superior, lo que indica concentración de esfuerzos en esas zonas. Concordando con la escala de colores que representa la distribución de tensiones de Von Mises, donde el azul indica menores tensiones y el rojo mayores tensiones. El rango de tensiones varía entre 0 MPa y 15,4992 MPa, con las tensiones más altas concentradas en las uniones superiores. La deformación mostrada ha sido amplificada 997,214 veces para una mejor visualización. Este análisis permite evaluar el comportamiento estructural bajo carga y muestra que las zonas críticas se encuentran en las conexiones superiores de la estructura.

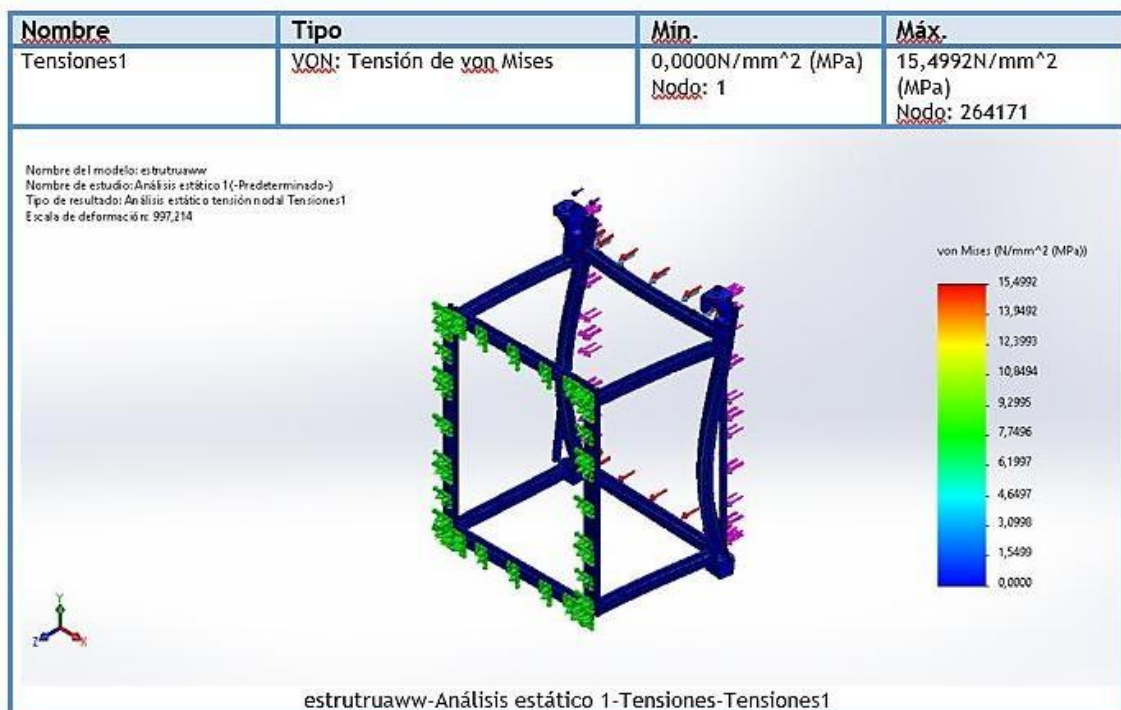


Figura 4.9. Esfuerzo de Von Mises Estructural

4.3.3.3. Factor de Seguridad

La Figura 4.10 muestra el análisis estructural de un marco tridimensional realizado en un software de simulación de elementos finitos en SolidWorks (Educativo). En el centro de la imagen, se observa la estructura analizada, que consiste en la estructura de soporte

tridimensional con elementos tipo viga. En la base y en algunos laterales, hay flechas verdes que representan restricciones o apoyos, mientras que en las partes superiores y laterales se ven flechas púrpuras y naranjas que indican las cargas aplicadas sobre la estructura.

La escala de colores que representa el factor de seguridad (FDS). Esta escala varía desde azul (valores extremadamente altos, del orden de 10^{16}) hasta rojo (valores mínimos de aproximadamente 9,355). Toda la estructura aparece en colores cercanos al rojo oscuro, lo que indica que el factor de seguridad es bastante alto en toda la geometría.

El factor de seguridad mínimo de 9,4 sugiere que la estructura es considerablemente segura, ya que este valor indica que la resistencia del material es mucho mayor que los esfuerzos aplicados. En conclusión, la imagen refleja un análisis estructural en el que se ha evaluado la seguridad del diseño, confirmando que la estructura está operando con amplios márgenes de seguridad frente a las cargas aplicadas.

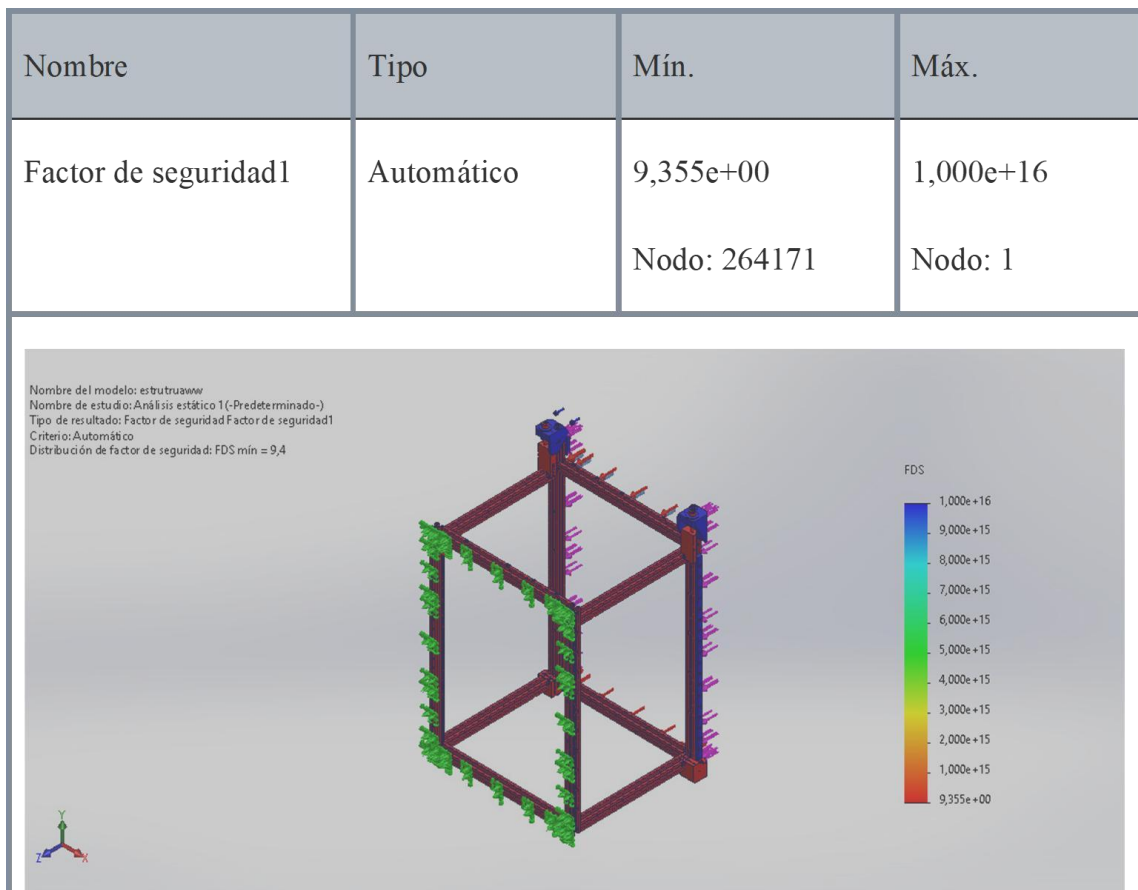


Figura 4.10. Factor de seguridad de la estructura de soporte

El modelo estructural soporta las cargas aplicadas sin exceder el límite elástico del material. Las zonas de mayor concentración de esfuerzo coinciden con los puntos de aplicación de carga y sujeciones.

Finalmente, en la Tabla 4.11 se observa el resumen de resultados obtenidos mediante el análisis estático de la estructura diseñada.

Tabla 4.11. Resumen de Resultados

Parámetro	Valor
Tensión máxima (Pa)	$1,2 \times 10^8$
Deformación máxima (mm)	0,15
Factor de seguridad	9,4
Fuerza de reacción (N)	70,0642

4.3.4. Diseño Electrónico y Control

La Figura 4.11 muestra el funcionamiento básico de la CNC láser doble lado se divide en 3 etapas principales, de las cuales se puede identificar cada parte, los equipos fundamentales y características que los conforman, en la primera etapa tenemos el procesamiento de una imagen a código G el cual contiene información sobre coordenadas y movimientos necesarios para que la máquina realice el ruteado sobre la placa PCB.

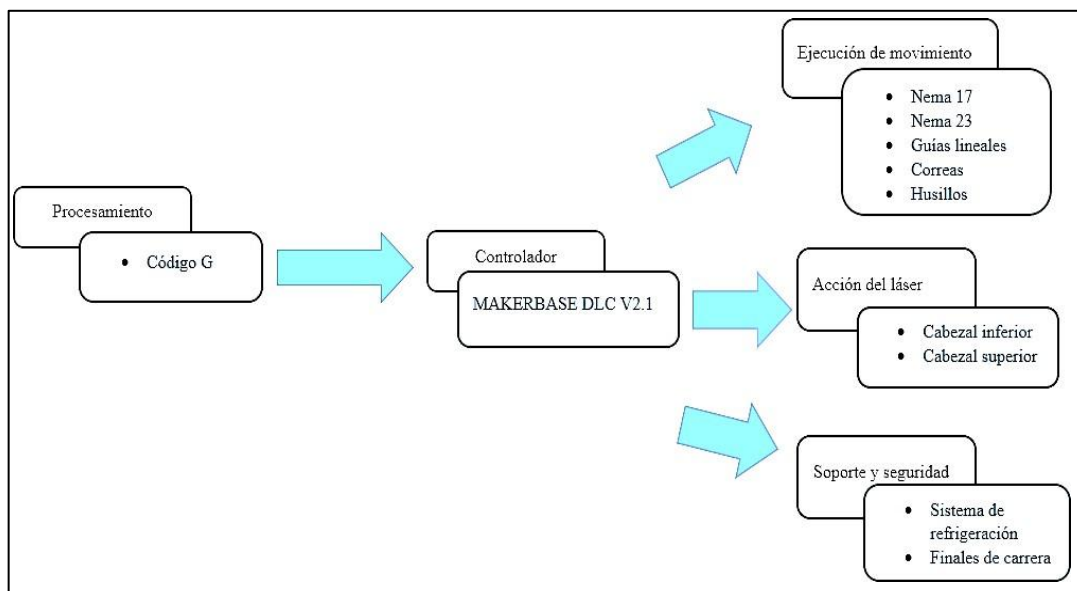


Figura 4.11. Diagrama de funcionamiento básico de control y movimiento

La segunda etapa se destinó al controlador CNC MAKERBASE DLC V2.1 que se encarga de interpretar las instrucciones y traducirlas a señales que controlen los motores y la potencia del láser.

Finalmente, la tercera etapa consta de los componentes necesarios para brindar movimiento a la máquina, activación de los cabezales y soporte y seguridad. Los motores nema, guías lineales, correas y husillos permiten el desplazamiento de los cabezales de forma fluida y exacta, la activación de los cabezales láser se da directamente desde el controlador y el soporte y seguridad del sistema se da con ayuda de finales de carrera y el sistema de refrigeración.

4.3.4.1. Selección de tarjeta de control

Tomando en cuenta que las opciones más asequibles en el mercado son las tarjetas de control MAKERBASE DLC V2.0 y GRBL, se realizó una selección de acuerdo con las descripciones técnicas que se presentan en el ANEXO 7. Este enfoque se fundamentó en una evaluación minuciosa de diversos factores como compatibilidad con controladores, software recomendado, puerto láser e independencia de otro microcontrolador. Los requerimientos principales de esta tarjeta constan de la necesidad de manejar mínimo 5 grados de libertad los necesarios para que el equipo diseñado funcione.

Se seleccionó la tarjeta de control Makerbase DLC V2.0 por las siguientes razones:

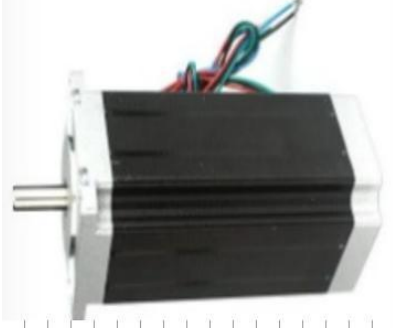

- Mayor compatibilidad con controladores de motores y que Makerbase soporta una amplia variedad de drivers de motores paso a paso como A4988, DRV8825, TMC2208, TMC2100, LV8729, TB6600 mientras que RGLB depende más de la versión del Shield.
- La dependencia de Arduino de una de las principales razones para descartar RGLB ya que resulta más compleja su instalación y aumenta la cantidad de cables y conexiones.
- Adaptador láser, GRBL en Arduino maneja señales de 5V PWM, pero los módulos láser requieren de 12V TTL o PWM por lo cual necesita de un adaptador que permita el control de modulo láser mientras que Makerbase ya cuenta con salidas de 5V y 12V PWM/TTL lo que permite realizar una conexión directa sin adaptadores externos.
- Makerbase maneja hasta 6 Grados de Libertad.

4.3.4.2. Selección de motores

Para la selección del motor se analizó las especificaciones técnicas como protección IP, par de torsión nominal, velocidad nominal, tamaño y costo que se detallan en la Tabla 4.12

considerando los tipos de motores nema 17 y servomotor simotics los más asequibles en el mercado.

Tabla 4.12. Especificaciones técnicas de motor

Especificaciones	NEMA 17	Servomotor SIMOTICS
		
Par de torsión nominal	0,4 – 0,5 Nm	1,27 - 60 Nm
Protección IP	IP40 - IP54	IP65 - IP67
Velocidad nominal	200 - 3000 RPM	1000 - 6000 RPM
Tamaño	42 x 42 mm base	Varía según modelo
Consumo de Energía	10 - 50 W	100 W - 5 kW
Eficiencia	70 - 85%	85 - 95%
Costo	Bajo	Alto

La selección del motor nema 17 se escogió por varias razones, entre ellas están:

- El torque de 0,5 Nm del motor nema 17 es suficiente para el desplazamiento de los cabezales, por lo tanto, se descarta el servomotor simotics ya que a pesar de tener un torque mayor de hasta 60 Nm resulta innecesario para este proyecto.
- El consumo energético de 50 Watts del motor nema 17 resulta adecuado para proyectos de bajo consumo.
- Además, el motor nema 17 ofrece un control sencillo con ayuda de drivers básicos, por lo tanto, no requiere de codificadores ni sistemas de realimentación avanzados como los necesita el servomotor simotics.

En esta sección se detalló el cálculo de los pasos que necesitó el motor para desplazar la unidad de distancia. Para ello se empezó dibujando el diagrama de cuerpo libre donde se evidenció los

diámetros de cada polea dentada (D1,D2 y D3) y el diámetro del motor (DM) como se muestra en la Figura 4.5.

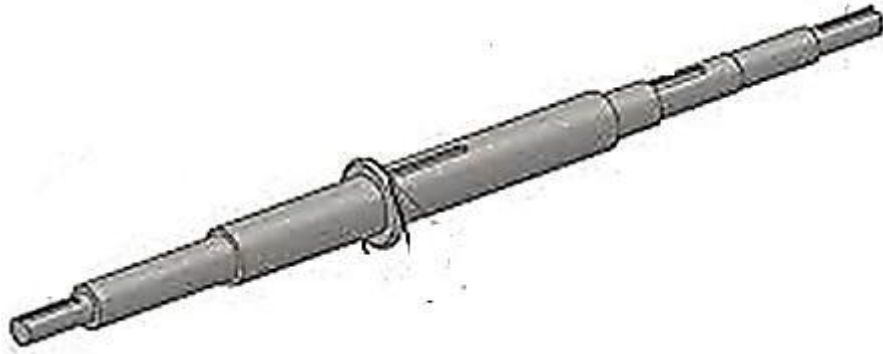


Figura 4.12. Cuerpo libre del sistema de transmisión [19].

Primero se determinó la resolución que proporciona el driver A4988 que es de 1/16 para un motor nema 17 de 200 pasos. Con estos datos se procedió a calcular el número de pasos que debe dar el motor en cada vuelta con la siguiente ecuación 4.9.

$$\#_{\text{pasos}} = \frac{\text{pasoMotor}}{\text{resolucion}} \quad (4.9)$$

$$\#_{\text{pasos}} = \frac{200}{1/16}$$

$$\#_{\text{pasos}} = 3200 \text{ pasos}$$

Después se procedió a calcular el perímetro de cada diámetro con la ecuación:

$$P = \pi * D$$

$$P_1 = 40,84 \text{ mm}$$

$$P_2 = 128,36 \text{ mm}$$

$$P_3 = 47,12 \text{ mm}$$

Esto permitió realizar una relación entre los pasos y la distancia desplazada en cada polea por lo, que se procedió a calcular el número de pasos que realizó el motor para completar una revolución de las poleas dentadas D2 y D3.

$$\#_{\text{pasosD3}} = \frac{\text{paso del motor para dar una vuelta completa} * P2}{P1}$$

$$\#_{\text{pasosD3}} = 20294,07 \text{ pasos}$$

Dado que la polea esta dentada D2 y D3 rotan sobre su mismo eje, para que cada uno de ellos den una revolución debe el motor dar 20294,07 pasos.

Finalmente se divide el $\#_{\text{pasosD3}}$ para el perímetro de la polea dentada D3 para obtener el número de pasos que debe dar el motor para desplazar 1mm de longitud en cada eje.

$$\text{pasos X longitud} = \frac{\#_{\text{pasosD3}}}{P3}$$

$$\text{pasos X longitud} = 159,48 \text{ pasos/mm}$$

Este cálculo es esencial ya que este parámetro permitió programar el Makerbase para que el desplazamiento sea preciso.

4.3.4.3. Selección del láser

Para la selección del láser no se realizó una comparativa de dispositivos en el mercado ya que la empresa Inpronc Solutions proporciono a los autores con un cabezal que ya disponían, esto, pero permitió el ahorro monetario ya que el cabezal cumple con características ideales para la máquina CNC láser doble lado. Las especificaciones técnicas del láser se encuentran detalladas en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Especificaciones técnicas del cabezal láser

LDHTHOPI	
Especificaciones	
Alimentación	12 V
Potencia de salida	10 Watts
Finura de ruteado	0,06x0,08 mm
Precisión del ruteado	Alta resolución y detalle
Calidad de corte/ruteado	Ruteados más suaves y definidos

El uso del cabezal LDHTHOPI de 10 W es esencial para este proyecto por varias razones como:

- La alimentación de 12 V es adecuada para el sistema ya resulta de fácil conexión desde la fuente o desde el mismo controlador.
- La potencia de 10 Watts es suficiente para realizar el proceso de ruteado y corte de materiales delgados como el acrílico, cuero, cartón y placas PCB
- La finura de ruteado de 0,06x0,08 mm permite el ruteado de detalles pequeños logrando ruteados nítidos ideales para realizar pistas de placas PCB, logos, textos o patrones complejos y pequeños.

4.3.4.4. Selección de la fuente de alimentación

Es esencial contar con una fuente de alimentación AC/DC para la parte electrónica, esta fuente debe contar con el voltaje y corriente necesarios para el sistema con el objetivo de un funcionamiento adecuado. Para esta selección realizo un cálculo de corriente que consumen los componentes asumiendo que el sistema tendría todos los componentes activos al mismo tiempo con el objetivo de sobredimensionar la fuente para tener un sistema robusto. La Tabla 4.14 muestra el consumo de los componentes electrónicos donde se observa que gran parte del consumo la realizarían los motores nema 17 ya que estos consumen 2A cada uno.

Tabla 4.14. Consumo de componentes electrónicos

Componente	Cantidad	Corriente (A)
Láser	2	2
Motor NEMA 17	8	18
Ventilador	1	0,5
Arduino Mega	1	0,5
Total		19 A

La corriente total de 19 A permite el cálculo de la potencia de la fuente con la ecuación 4.1, considerando que cada elemento opera con un voltaje de 12V.


$$P = V_{\max} * I_{\max} \quad (4.8)$$

$$P = 12V * 19A$$

$$P = 228\text{Watts}$$

Estos resultados permiten la selección de la fuente de alimentación ya que en el mercado se los encuentra con las especificaciones técnicas de voltaje y potencia. Por lo cual se eligió la fuente que cuenta con las características que muestra la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Especificaciones técnicas de fuente de alimentación

Fuente de alimentación	
Especificaciones	
Potencia	250 W
Entrada	AC 90-250V
Salida	1
Corriente	20A
Voltaje de salida	12V
Conexión	Bornes
Protecciones	Cortocircuito, sobrecarga, temperatura

4.3.4.5. Integración de Componentes

El sistema electrónico consta de diversos elementos como se muestra el diagrama unifilar de la Figura 4.13, este diagrama representa la fuente de alimentación, que con, la cual con ayuda de un switch permite la alimentación de todo el sistema, una vez energizada el controlador MAKERBASE, este se encarga de controlar a los motores nema 17 de cada eje por medio de sus respectivos controladores A4988 y un switches de 3 posiciones que tienen el propósito de activar o desactivar los ejes que brindan movimiento al cabezal superior o el inferior. Además, el controlador proporciona alimentación al cabezal láser que se encarga de realizar el ruteado o corte y al ventilador que permite refrigerar el sistema.

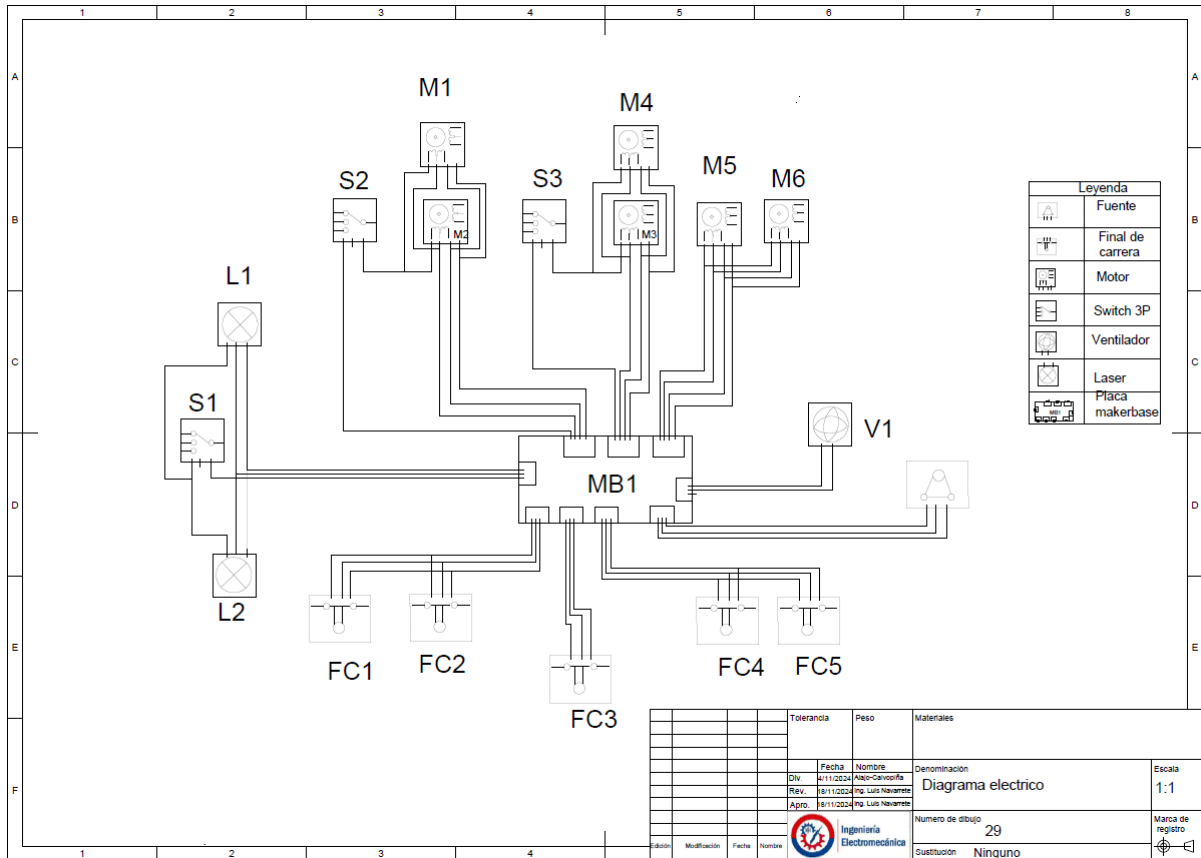


Figura 4.13. Diagrama de funcionamiento básico [21]

4.4. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL PROTOTIPO

Se realiza la planimetría de cada uno de los componentes estructurales del sistema, tal y como se observa en la Figura 4.14 en donde se visualizan las diferentes vistas y dimensiones que permitirán la construcción del prototipo. Los planos de todos los componentes se encuentran en el Anexo 5.

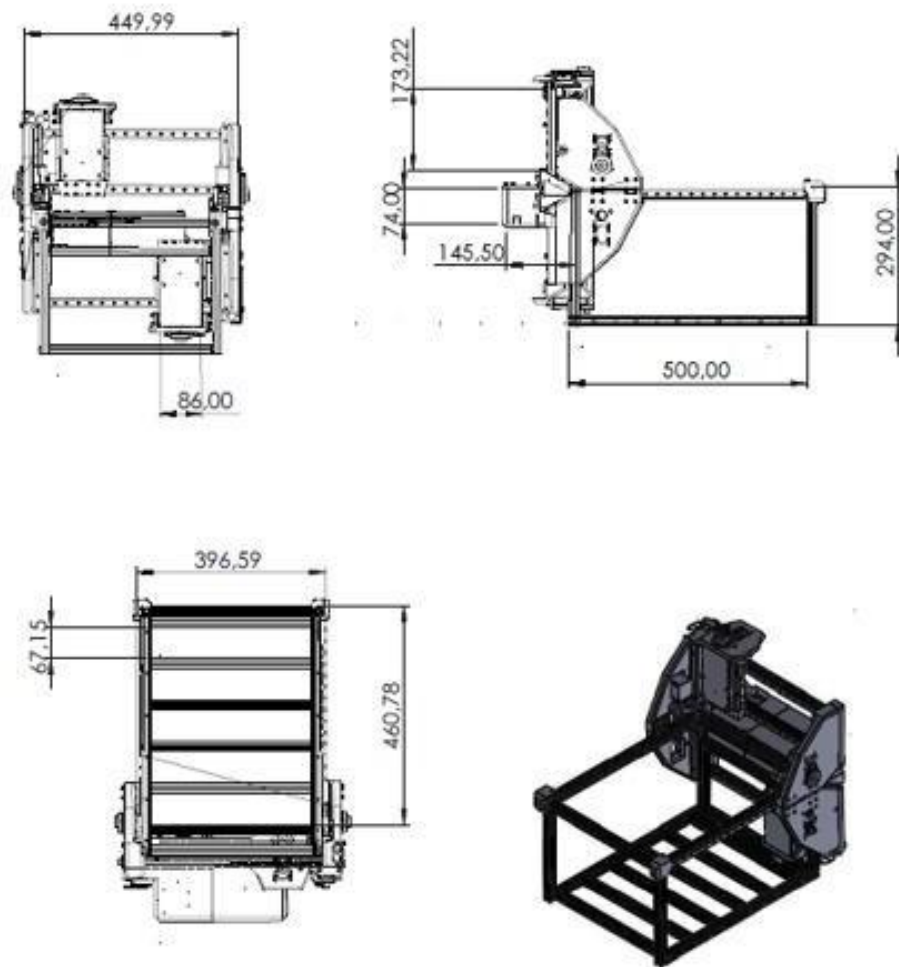


Figura 4.14. Planimetría del Sistema Diseñado

Posteriormente, para empezar la construcción se recolectó todos los materiales definidos y se realizó la impresión 3D de la estructura mecánica como se observa en la Figura 4.15, para después proceder con el ensamble de los sistemas que se detallan a continuación.



Figura 4.15. Impresión en PLA del diseño mecánico

Se realizaron cortes del perfil estructural de acuerdo con las medidas que ya se tenían previstas como se muestra en la Figura 4.16. En esta se realizaron orificios para poder realizar la base, estas piezas se unieron posteriormente con pernos hallen de cabeza cilíndrica que son los que se utilizan en este tipo de procesos.

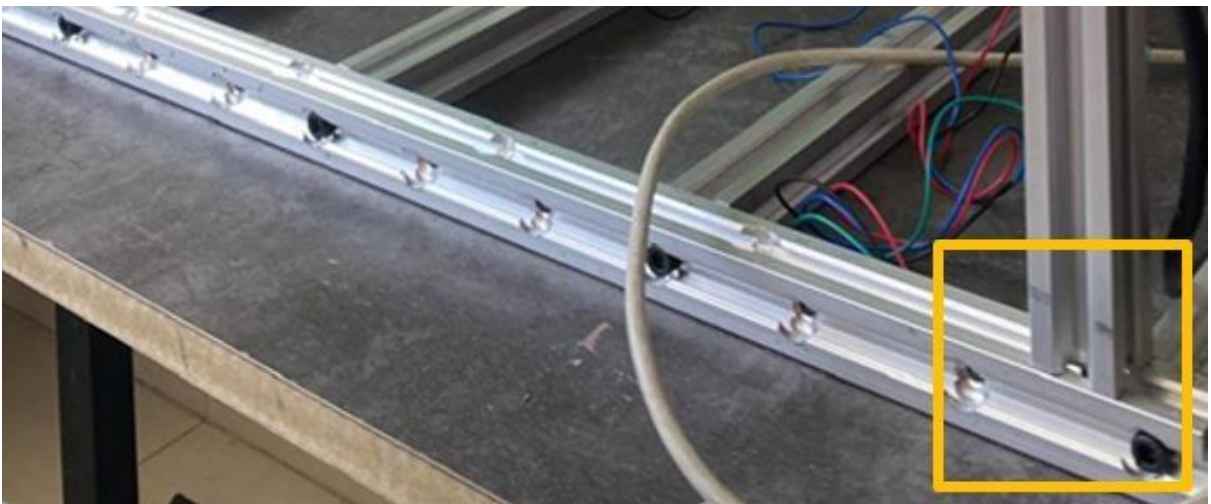


Figura 4.16. Unión de perfiles

Se procedió con la instalación de los perfiles que serán utilizados como rieles y van hierro unidos al perfil estructural como muestra la Figura 4.17, en los que se instalaron los carros lineales los que van a ser encargados de mover la estructura. Estos son instalados en el eje x como en el y para facilitar el deslizamiento del cabezal láser.

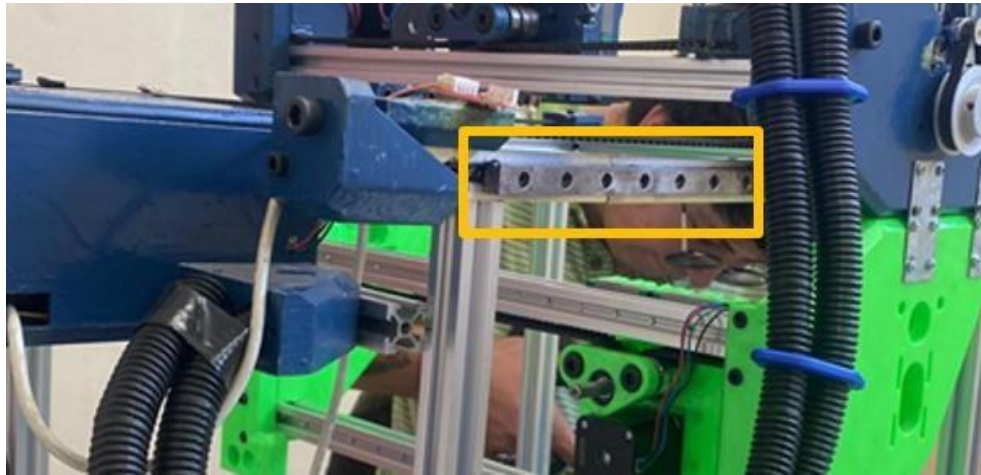


Figura 4.17. Instalación rieles

Se aseguró y se instaló los motores que son los encargados de realizar el movimiento de cada uno de los ejes. Cada uno de estos motores es acompañado por el sistema de transmisión de movimiento que está conformado por los rodamientos, correas y las poleas como se observa en la Figura 4.18. se procedió a la instalación de la correa de transmisión que servirá para dar movimiento a toda la estructura móvil, en la que se toma en cuenta que su dentadura tenga un buen agarre en el sistema de transmisión.

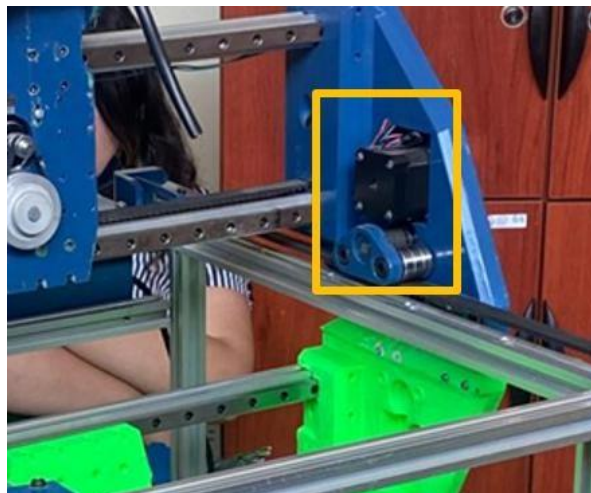


Figura 4.18. Instalación de motores y transmisión

Una vez que se encuentra instalado cada una de las piezas o componentes, se procedió a realizar el cableado y la instalación de la parte electrónica como se muestra en la Figura 4.19, la cual debe pasar por medio de un tubo corrugado con la finalidad de evitar posibles daños por estiramiento de los cables y por estética.

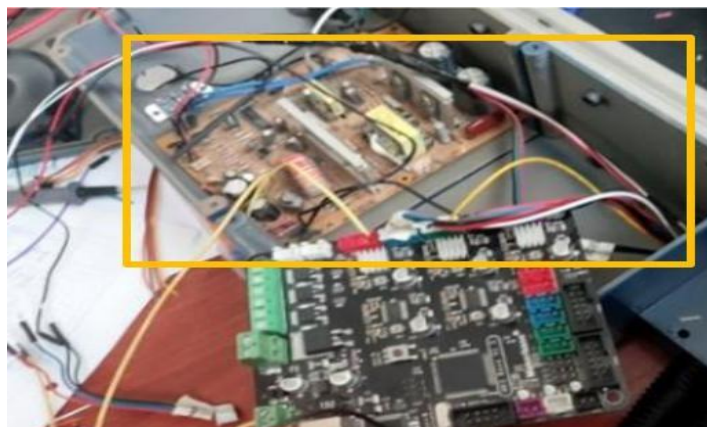


Figura 4.19. Cableado y conexión

4.5. INTEGRACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

4.5.1. Configuración y Calibración

La tarjeta de control Makerbase necesita de calibración y configuración de varios parámetros, para ello se utilizó el Universal Gcode Platform que muestra la Figura 4.20, este es un software de código abierto que permite controlar movimientos y monitorear y ajustar parámetros en tiempo real.

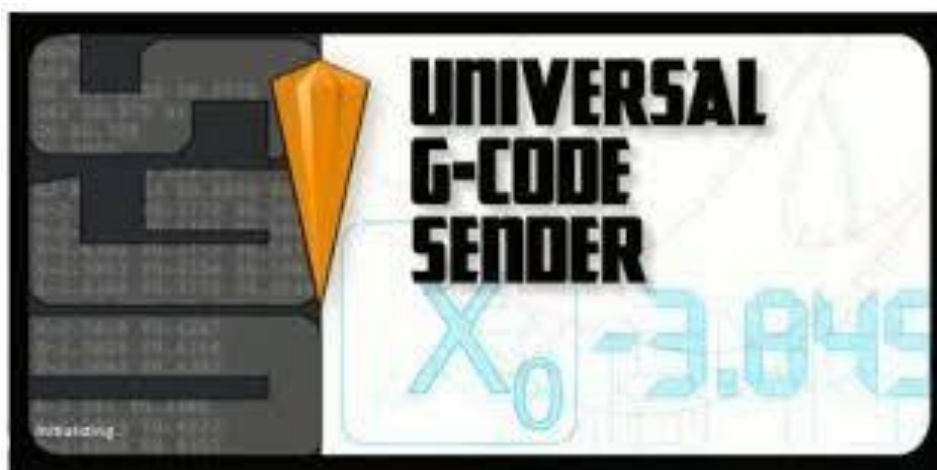


Figura 4.20. Universal G-code sender

Para la CNC láser de doble lado se realizó configuraciones sobre parámetros básicos de movimiento y dirección, parámetros de estado y precisión, límites y referencias de la máquina, configuración del modo láser, configuración de pasos por mm, velocidades y aceleraciones de movimiento y recorrido máximo permitido como se muestra en la Figura 4.21.

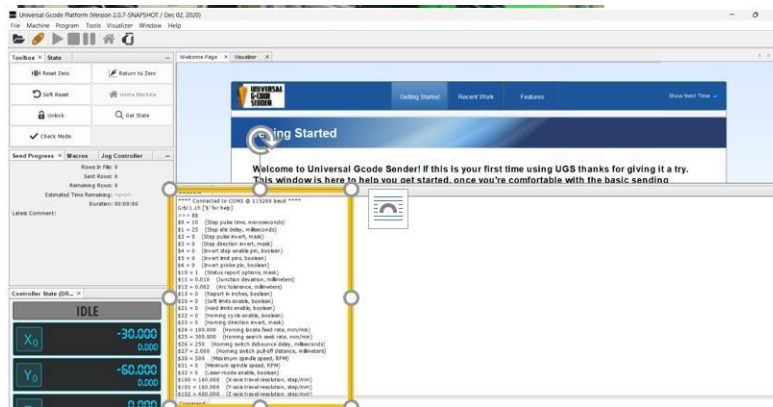


Figura 4.21. Parámetros de configuración en Universal G-code sender.

A continuación, se detalla la configuración y definición de los parámetros principales de Universal Gcode Sender (UGS) para el control de la máquina CNC láser en la Figura 4.21.

Universal G-code sender usa la librería de GRBL 1,1 ya cual cuenta con la programación para el control de cada eje con ayuda de los parámetros establecidos, la programación de la librería G-code se muestra detallada de forma sencilla en la Figura 4.22. Este código inicia con la recepción de comandos en código G que puede ser enviada por UGS o Láser GRBL, a estos comandos se los realiza una verificación de sintaxis para asegurarse que el código es válido, luego procede con el cálculo de trayectorias donde verifica que si el número de coordenadas en x es mayor a 0 entonces se activará el eje x y en caso contrario se desactiva, en el caso del eje y, este cuenta con un duplicado por lo tanto la librería verifica el número de coordenadas en y para decidir si debe activar y1,y2 o ambos, finalmente verifica si existe coordenadas en el eje z para decidir si debe activarse o no para finalmente realizar el desplazamiento correspondiente.

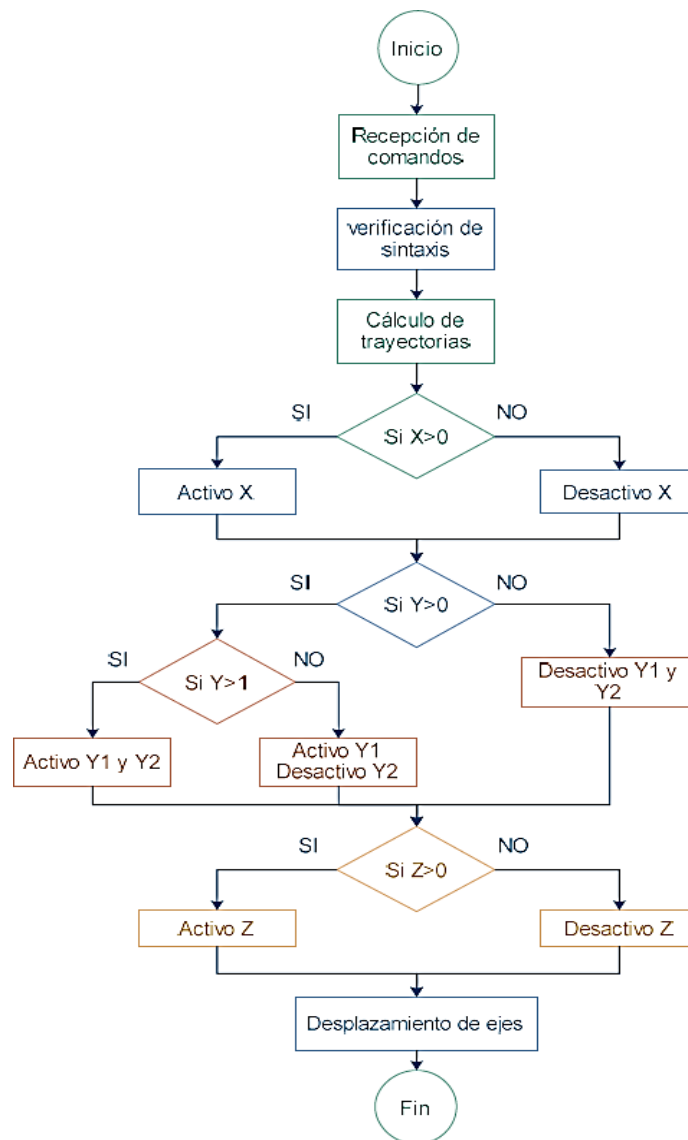


Figura 4.22. Diagrama de flujo de librería GRBL 1.1

Se procedió a cargar los parámetros de configuración ya establecidos en Universal Gcode Sender donde se realizó pruebas de movimiento para comprobar si los parámetros son los adecuados, principalmente los pasos por milímetro calculados anteriormente como se observa en la Figura 4.23 ya que estos brindaran precisión al sistema.

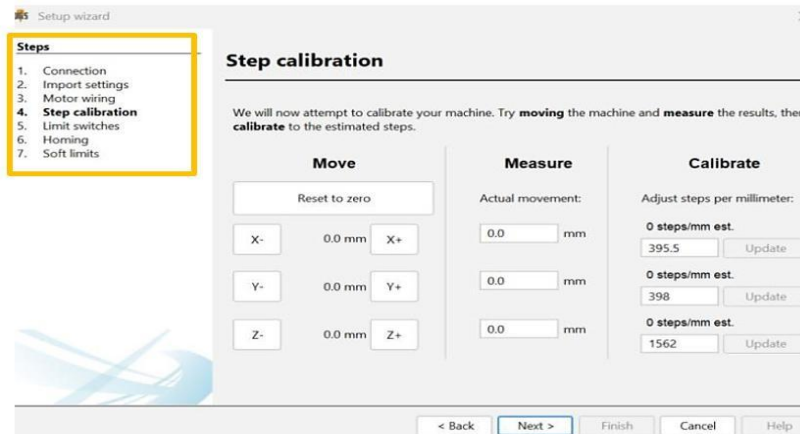


Figura 4.23. Configuración de número de pasos

4.5.2. Software para Ruteado Laser

Se procedió con la instalación del software Láser GRBL que se muestra en la Figura 4.24, Este software es de código abierto y de acceso gratuito, desarrollado para gestionar máquinas de ruteado y corte láser que operan con GRBL. Permite cargar imágenes, textos y archivos G-code, convertirlos en trayectorias para el láser y enviarlos directamente a la máquina. Es compatible con Windows y ofrece herramientas para ajustar potencia, velocidad y optimizar el ruteado.

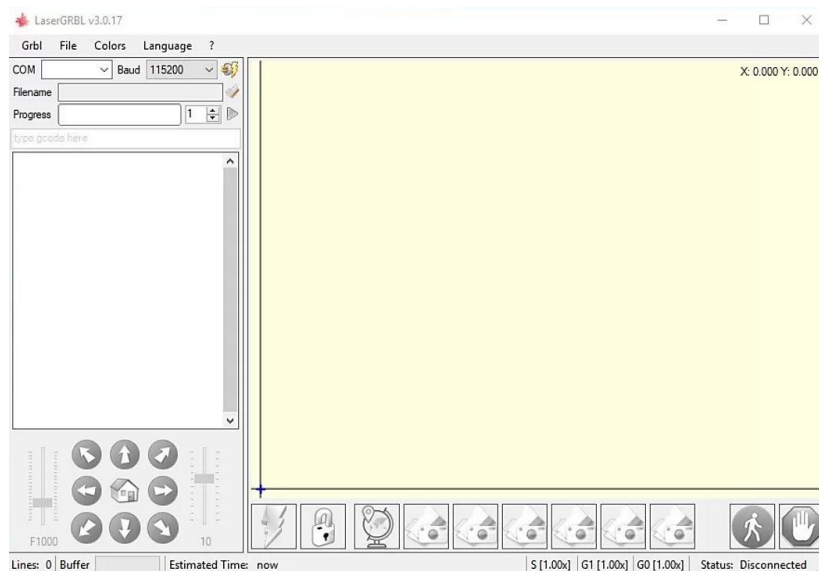


Figura 4.24. Interfaz de software Laser GRBL

Finalmente, implementado todos los sistemas de la máquina se procedió a realizar pruebas de cortes en otros materiales con la finalidad de analizar y verificar si existe la precisión y exactitud en cada una de las placas. Además, se tomó una muestra donde se revisará todos los detalles y

se verificará si cada placa final es uniforme en su forma y tamaño, asegurando que el corte se haya realizado de manera correcta en todas las placas.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se presenta el análisis de los resultados arrojados a través del proyecto de investigación. A continuación, se detallan las pruebas realizadas y los resultados alcanzados, respaldados en tablas, gráficos y otros recursos que permitieron una presentación clara y fundamentada de los datos obtenidos. Además, se incluyó un apartado dedicado al análisis económico del proyecto, con el propósito de evaluar su viabilidad y costo-beneficio.

Finalmente, se interpretaron los hallazgos en función del problema planteado y los objetivos establecidos, tomando como referencia la información desarrollada en las secciones anteriores.

5.1. ANÁLISIS CAE DE LA CNC LASER

Para encontrar el peso de la máquina CNC de doble lado se requirió del software SolidWorks (Educativo), el mismo que se encarga de calcular y arrojar el valor en una hoja de datos como se muestra a continuación en la Figura 5.1 en las propiedades del ensamble se observa una masa de $m = 2442,45$ gr.

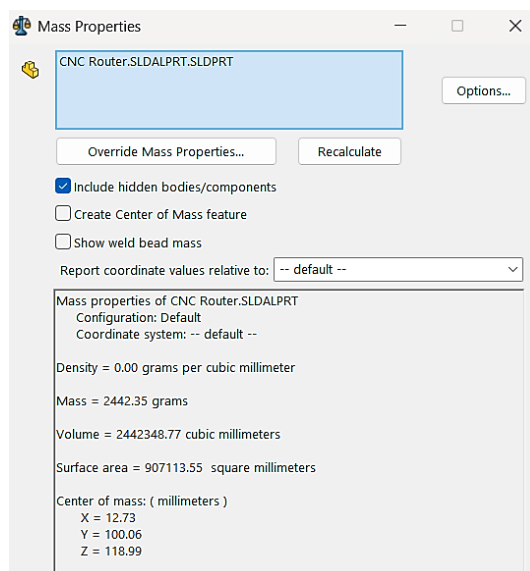


Figura 5.1. Propiedades físicas de ensamble

Al multiplicar la masa por la gravedad se encuentra un peso, para este cálculo se utilizó la ecuación 5.1:

$$P_{\text{maquina}} = m * g \quad (5.1)$$

$$P_{\text{maquina}} = 73 \text{ N}$$

El peso calculado permitió la simulación de esfuerzo, deformación y factor de seguridad, a continuación, la Figura 5.2 muestra el análisis de esfuerzo por Von Mises desarrollado por el software Solidworks (Educativo), donde las barras perpendiculares soportan mayor cantidad de esfuerzo en un rango de 0,1MPa a 0,17MPa lo cual es adecuado debido a que el aluminio 6061-T5 por el que está hecho la CNC laser soporta una resistencia a la cedencia de 276MPa.

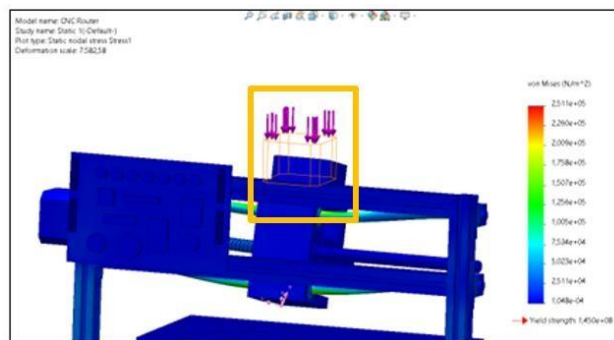


Figura 5.2. Análisis de esfuerzo por Von Mises

La Figura 5.3 muestra la deformación máxima que va a obtener la CNC laser de 0,005mm lo cual no significa una deformación crítica para el sistema ya que es un valor muy cercano a cero.

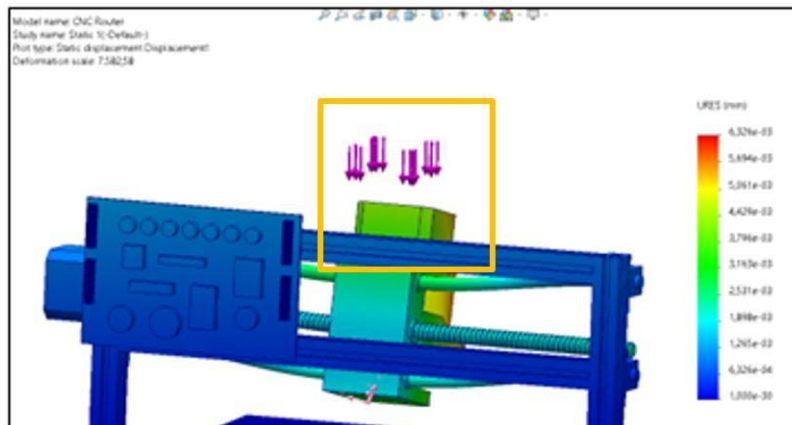


Figura 5.3. Análisis de deformación en Solidworks (Educativo)

A continuación, se muestra en la Figura 5.4 el análisis del factor de seguridad desarrollado en SolidWorks (Educativo) donde se observó que el factor de seguridad más bajo que se ve representado de color rojo de 58 lo cual está dentro del de lo permisible ya que basándose en el apéndice 21 de Robert Mott indica que el factor de seguridad para fuerzas repetidas es 4.

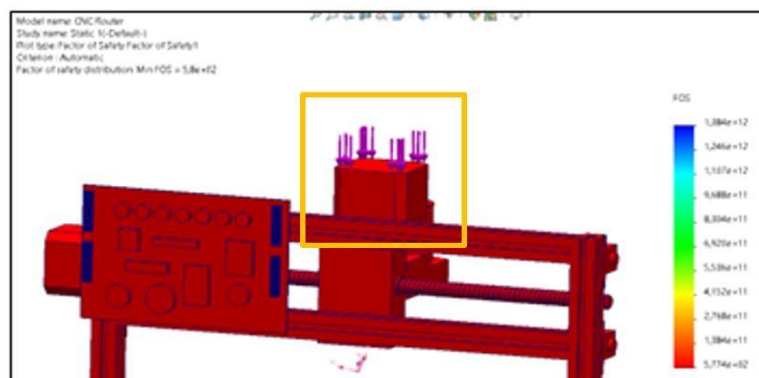


Figura 5.4. Análisis de factor de seguridad en Solidworks (Educativo)

5.2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN PIEZAS FABRICADAS

El estudio realizado del análisis estático de los soportes laterales fabricado en base a la impresión 3D en SolidWorks (Educativo), con el objetivo de evaluar y determinar el comportamiento estructural del modelo bajo diferentes condiciones de carga. El análisis incluye Evaluación de esfuerzo y deformaciones. Con la verificación de la seguridad estructural frente a cargas aplicadas y la validación de sujeciones y propiedades del material descritas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Propiedades mecánicas de material de ABS filamento para impresión 3D.

Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1,06 g/cm ³
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29,6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2,24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,38 su
	Módulo cortante	0,811594 GPa
Nombre(s) de pieza	CNClaser v3175.iges	

5.2.1. Condiciones de funcionamiento

Para la validación de resultados se planteó una fuerza de soporte por pieza de 16 N dato rescatado de las especificaciones de empresa solicitante. Donde se pudo observar la ubicación de la carga en el descanso recto superior de la pieza según la Figura 5.5.

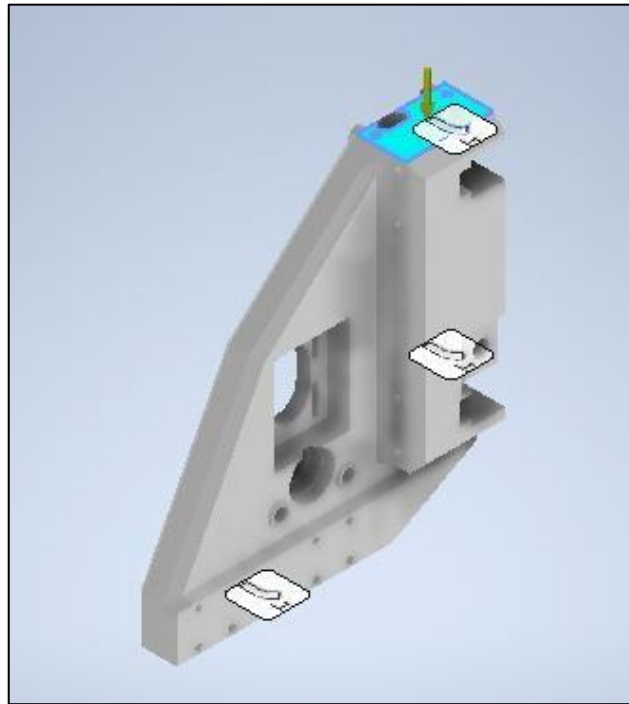


Figura 5.5. Ubicación de cargas sobre soporte impresos en 3D

Además, se configuró las restricciones de movilidad basada una restricción fija ubicadas en los descaso de unión con las calumas de soporte de la estructura antes detallada en metodología ver Figura 5.6.

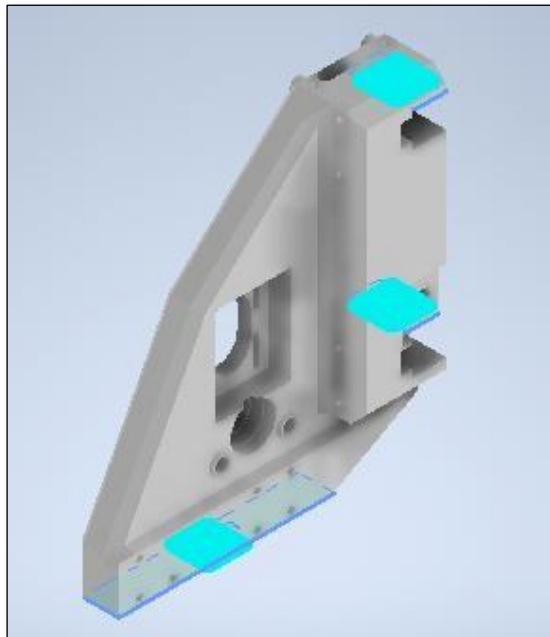


Figura 5.6. Ubicación de soportes de restricción

Las configuraciones especificadas con anterioridad entregaron como resultado las fuerzas de reacción especificadas en la tabla, y la tensión de Von Mises especificadas en la Figura 5.7 en donde el rango de tensiones varía entre 0 MPa y 0,05645 MPa, con las tensiones más altas concentradas en las uniones superiores. La deformación mostrada ha sido amplificada 997,214 veces para una mejor visualización. Este análisis permitió evaluar el comportamiento estructural bajo carga y muestra que las zonas críticas se encuentran en las conexiones superiores de la estructura.

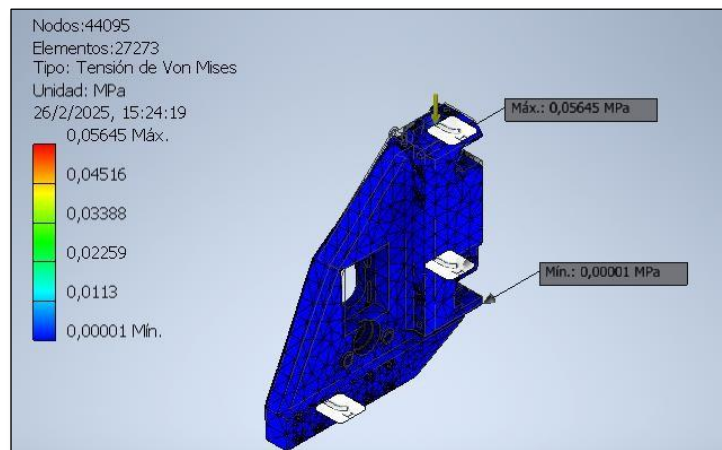


Figura 5.7 Esfuerzo de Von Mises

Además, se pudo visualizar el desplazamiento unitario donde fue evidente que la zona de acción de la carga es la mayor concentración de esfuerzo obteniendo como resultado un máximo de $3,094e-4$ mm, con justa razón en referencia a totalidad del sólido presenta tendencias al cero haciendo una pieza apta en soportabilidad y resistente a las cargas sometidas en la simulación ver Figura 5.8.

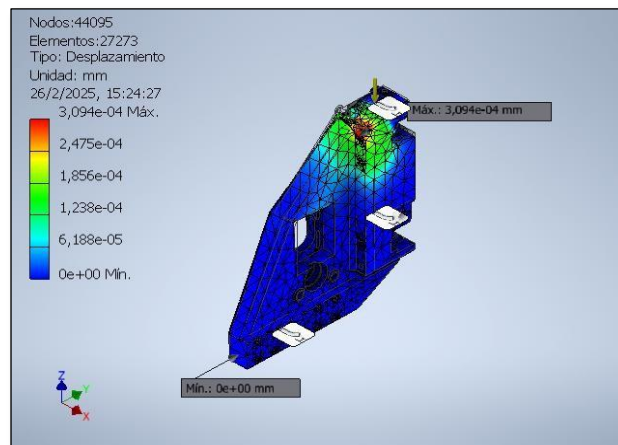


Figura 5.8. Deformación unitaria

Un factor de seguridad mínimo de 15 indica que la estructura posee un nivel de seguridad significativamente alto, ya que este valor indica que la resistencia del material es mucho mayor que los esfuerzos aplicados. En conclusión, la imagen refleja el análisis estructural en el que se evaluó la seguridad del diseño, confirmando que la estructura está operando con amplios márgenes de seguridad frente a las cargas aplicadas ver Figura 5.9.

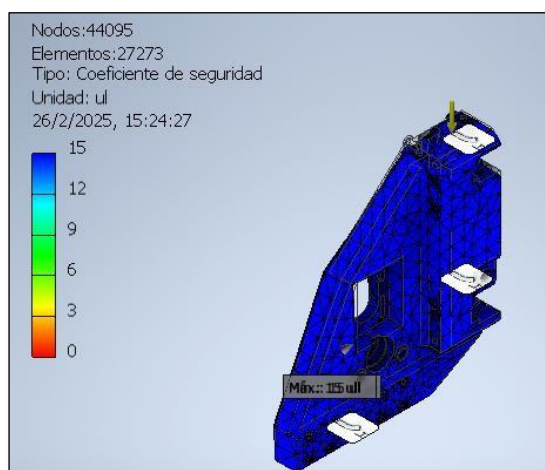


Figura 5.9. Factor de seguridad

En resumen, se obtuvo la siguiente Tabla 5.2 donde se expresa los valores máximos y mínimos del resultado obtenido de la simulación en función de las cargas evaluadas y esfuerzo sometido al elemento haciendo de este un componente de alta confiabilidad para el uso en la fabricación de máquina CNC para la elaboración de ruteo de placas PCB descrita en este trabajo.

Tabla 5.2. Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	614402 mm ³	
Masa	0,651266 kg	
Tensión de Von Mises	0,00000851282 MPa	0,0564527 MPa
Primera tensión principal	-0,0145845 MPa	0,0481774 MPa
Tercera tensión principal	-0,0626382 MPa	0,0123427 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0003094 mm
Coeficiente de seguridad	15 su	15 su
Deformación equivalente	0,00000000350399 su	0,0000233508 su

5.3. ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD

La repetibilidad es un aspecto fundamental en cualquier sistema automatizado, ya que este se encarga de determinar la capacidad para ejecutar tareas de manera constante bajo las mismas condiciones operativas. En el caso de la CNC láser de doble lado, el análisis de repetibilidad permitió evaluar la precisión con la que la máquina se posiciona en un mismo punto.

Este análisis fue crucial para garantizar la confiabilidad del sistema, minimizando desviaciones y errores que puedan comprometer la calidad de las placas PCB para la que está destinada la máquina. Para este análisis, se realizó varias pruebas en condiciones controladas, midiendo la variabilidad en la posición del sistema a lo largo de varias ejecuciones para cada eje. Los resultados obtenidos permitieron evaluar la viabilidad de la máquina para aplicaciones que requieren alta precisión y consistencia.

5.3.1. Repetibilidad en el eje x

Las pruebas de repetibilidad en el eje x consta en repetir la misma acción de desplazamiento del eje bajo las mismas circunstancias y parámetros con el objetivo de realizar una adquisición de datos para un análisis de desviación estándar. Para esto se configuró la máquina para que se desplace 100 mm en el eje x con una velocidad de 100 mm/min y se midió con instrumentos como pie de rey, reglas y escuadras como se presenta en la Figura 5.10.

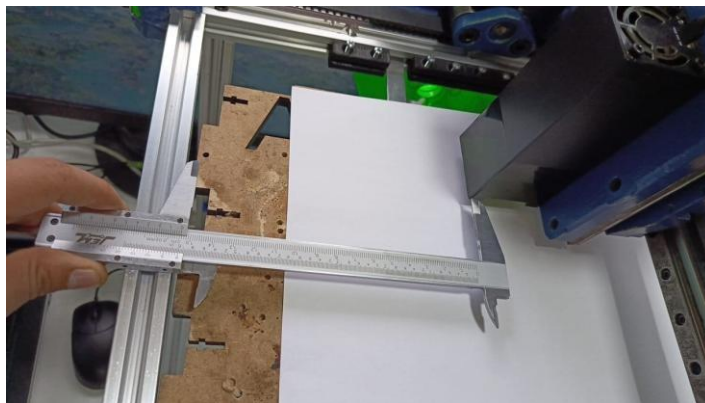


Figura 5.10. Pruebas de repetibilidad en el eje x

Se llevaron a cabo 100 mediciones desplazando la máquina a lo largo del eje x con el propósito de evaluar su repetibilidad. Los resultados de estas pruebas están documentados en el Anexo 1, lo que permitió determinar que la máquina CNC láser de doble cara presenta una repetibilidad de 0,0107mm. Dado que no existe una normativa específica que establezca un rango de repetibilidad para máquinas CNC enfocadas en placas PCB, se considera que una desviación

máxima de 0,5mm es adecuada, tomando en cuenta las especificaciones y tolerancias definidas en las normas de diseño para PCB. La repetibilidad obtenida, cercana a cero, indica que la máquina posee una alta precisión y es capaz de replicar los movimientos con un margen de error mínimo cómo se observa en la Figura 5.11, esta grafica indica el rango de error obtenido de mediciones entre 99,035mm y 99,085mm.

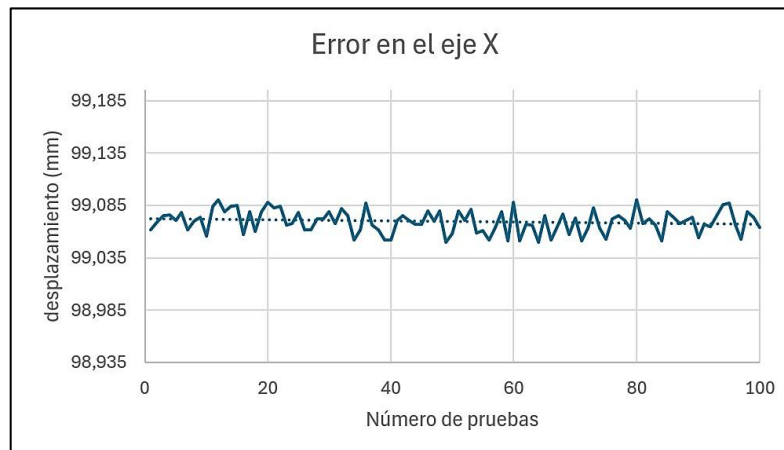


Figura 5.11. Error en desplazamiento del eje x

Además, se calculó el porcentaje de error como se muestra a continuación de la máquina en el eje x de 0,931% lo que indica el error máximo que puede tener en el desplazamiento del eje x ya sea positivo o negativo. Ver Ecuación (5.2).

$$\%error = \frac{|\text{valor real} - \text{valor medio}|}{\text{valor real}} * 100 \quad (5.2)$$

$$\%error = 0,931\%$$

5.3.2. Repetibilidad en el eje y

Todas las pruebas de repetibilidad en el eje y se realizaron bajo los mismos parámetros de desplazamiento y velocidad. Para esto se configuró la máquina para que se desplace 100 mm en el eje Y a una velocidad de 100 mm/min y se midió con un pie de rey desde un eslabón vertical como referencia hasta el cabezal láser como se presenta en la Figura 5.12.

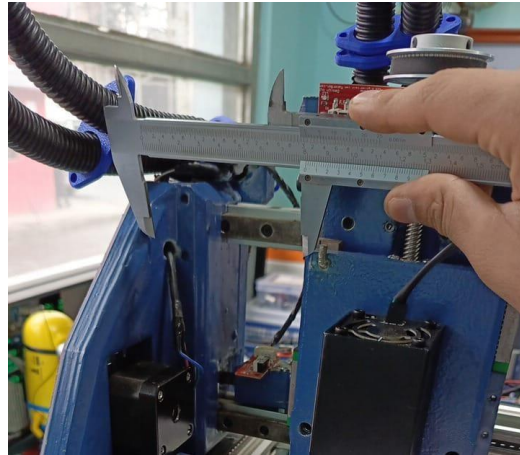


Figura 5.12. Pruebas de repetibilidad en el eje y

Se realizaron 100 mediciones desplazando la máquina a lo largo del eje y con el propósito de analizar su repetibilidad. Los resultados de estas pruebas están documentados en el Anexo 2, permitiendo determinar que la máquina CNC láser de doble cara presenta una repetibilidad de 0,0113mm. Dado que no existe una normativa específica que establezca un rango de repetibilidad para máquinas CNC diseñadas para placas PCB, se considera que una desviación máxima de 0,5 mm es adecuada, en función de las especificaciones y tolerancias de las normas de diseño para PCB. La baja repetibilidad obtenida, cercana a cero, indica que la máquina posee una alta precisión y es capaz de replicar los movimientos con un margen de error despreciable se observa en la Figura 5.13.

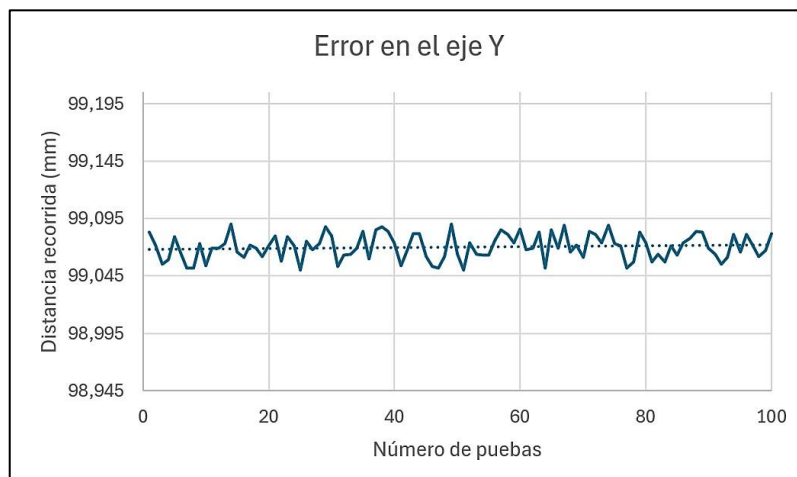


Figura 5.13. Error en desplazamiento del eje y

Además, se calculó el porcentaje de error como se muestra a continuación de la máquina en el eje x de 0,93% lo que indica el error máximo que puede tener en el desplazamiento del eje Y ya sea positivo o negativo (Ver Ecuación (5.3)).

$$\%error = \frac{|\text{valor real} - \text{valor medio}|}{\text{valor real}} * 100 \quad (5.3)$$

$$\%error = 0,93\%$$

5.3.3. Repetibilidad en el eje z

Todas las pruebas de repetibilidad en el eje z se realizaron bajo los mismos parámetros de desplazamiento y velocidad. Para esto se configuro la máquina para que se desplace 100mm en el eje a una velocidad de 100mm/min y se midió con un pie de rey desde el cabezal láser hasta la base como se muestra en la Figura 5.14.



Figura 5.14. Pruebas de repetibilidad en el eje z

Siguiendo el mismo procedimiento aplicado a los ejes anteriores, se realizaron 100 mediciones desplazando la máquina a lo largo del eje z para evaluar su repetibilidad. Los resultados de estas pruebas están documentados en el Anexo 3, lo que permitió determinar que la máquina CNC láser de doble cara presenta una repetibilidad de 0,0111mm. Debido a que este valor es muy cercano a cero, se concluye que la máquina posee una alta precisión y es capaz de replicar el movimiento en el eje z con un margen de error mínimo cómo se observa en la Figura 5.15.

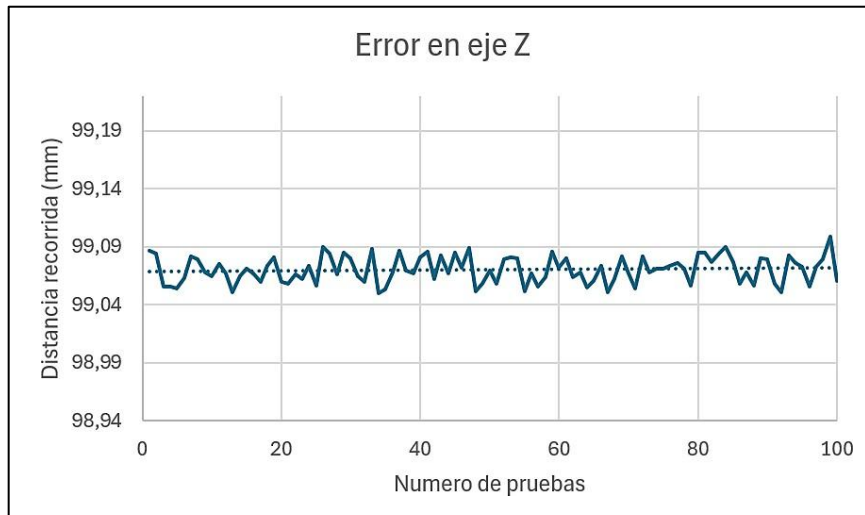


Figura 5.15. Error en desplazamiento del eje z

Además, se calculó el porcentaje de error como se muestra a continuación de la máquina en el eje x de 0,93% lo que indica el error máximo que puede tener en el desplazamiento del eje z (Ver Ecuación (5.4)).

$$\%error = \frac{|\text{valor real} - \text{valor medio}|}{\text{valor real}} * 100 \quad (5.4)$$

$$\%error = 0.93\%$$

5.4. REPETIBILIDAD EN SUPERPOSICIÓN DE CABEZALES

Las pruebas de repetibilidad se realizaron con ayuda de una placa, se desplazó el cabezal a una posición aleatoria y se retornó a home, una vez terminado su recorrido se realizó un punto en ambas caras de una plaza con el objetivo de observar su desviación de superposición como se muestra en la Figura 5.16.

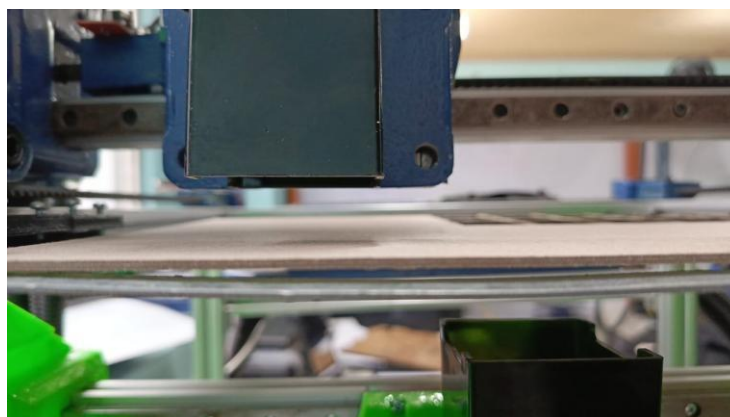


Figura 5.16. Prueba de repetibilidad en superposición

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el cálculo de la repetibilidad de los ejes, se llevaron a cabo 100 mediciones desplazando los cabezales a posiciones aleatorias y regresándolos al home para evaluar el error medio de superposición. Los resultados de estas pruebas están documentados en el Anexo 4, donde se determinó que la máquina CNC láser de doble cara presenta un error medio extremadamente bajo, cercano a cero como se observa en la Figura 5.17.

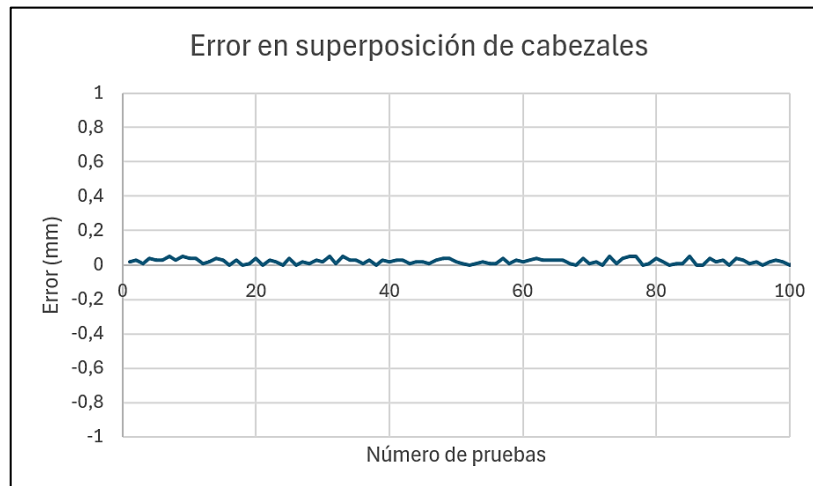


Figura 5.17. Error en desplazamiento del eje z

Además, se calculó el error medio como se muestra a continuación correspondiente al retorno a home de la máquina de 0,023mm lo que indica que los usillos pueden no estar completamente superpuestos en su retorno a home (Ver Ecuación (5.5)).

$$\text{error} = \frac{\sum(x - x_i)}{n} \quad (5.5)$$

Donde:

- x : Desplazamiento deseado (0 mm)
- x_i : Medido
- n : Número de mediciones

$$\text{error medio} = 0,023 \text{ mm}$$

5.5. RESULTADOS DE RUTEADO LÁSER

En esta sección se compara el resultado del ruteado láser de las placas de PCB, la Figura 5.18 muestra 2 imágenes donde; a) muestra el ruteado láser realizado por la máquina Xtool, b) muestra el ruteado láser por la máquina láser de doble cara.

El análisis de la imagen b de la Figura 5.18, obtenida mediante el ruteado láser en una máquina CNC de doble cara, muestra un resultado aceptable dentro de los parámetros establecidos en la investigación. Se realizaron aproximadamente 10 pruebas con esta configuración, observando una alta consistencia en la profundidad y nitidez del ruteado láser.

Se detectaron pequeñas variaciones en la uniformidad de ciertos contornos de al menos 0,2mm, especialmente en la elipse, estos detalles son mínimos y atribuibles a factores como la calibración del sistema, al comparar con la imagen a), obtenida con una CNC láser Xtool, la versión b) presenta un trazo más profundo y marcado, lo que indica que la máquina CNC doble lado tiene una mejor interacción del láser con la superficie en términos de energía. La imagen b) conserva la geometría deseada sin distorsión significativa, lo que indica que la calibración del sistema de doble cara está bien ajustada. Además, la presencia de pequeñas imperfecciones en algunos trazos lineales permite detectar oportunidades de mejora en la optimización de los parámetros del UGS.

Este análisis demostró que el ruteado CNC de doble cara es una alternativa viable para trabajos de precisión y puede competir con tecnologías comerciales como la Xtool, ofreciendo una opción adaptable según las necesidades específicas del proyecto.



Figura 5.18. a) Ruteado láser entre Xtool vs b) CNC doble cara

La máquina Xtool resultó difícil el ruteado en sus 2 caras ya que al voltear la placa manualmente no se logró una alineación precisa entre las pistas de ambas caras, por otro lado, la CNC láser de doble cara facilita al usuario su ruteado ya que no existe la necesidad de virar la placa manualmente debido a que las caras de la placa quedan expuestas ante los 2 cabezales de la máquina como se observa en la Figura 5.19. Además, la máquina CNC laser reduce tiempos de

ruteado ya que es capaz de grabar al mismo tiempo las 2 caras de la placa PCB reduciendo al menos el 50% del tiempo.

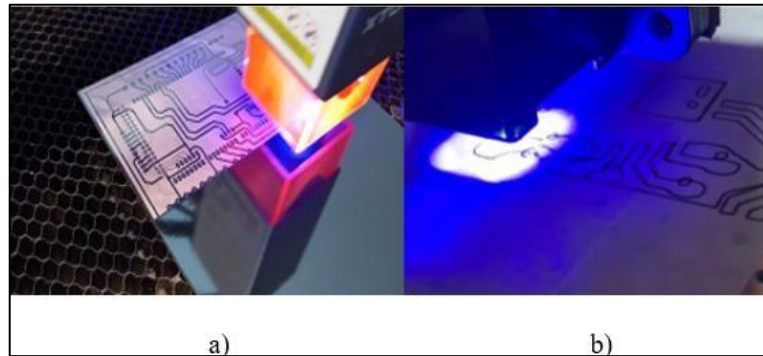


Figura 5.19. Ruteado laser

El análisis se realizó en función de las medidas estándares para la fabricación de placas PCB por medio de ruteado láser en una máquina CNC descritas en la Tabla 5.3, para el desarrollo se toma en cuenta los parámetros en términos de repetibilidad, resolución y presión de la máquina CNC.

Tabla 5.3. Valores estándares para ruteado mediante láser de pistas en placas PCB

Descripción	Rango
Ancho de pista mínimo recomendado	0,25 mm (250 μ m)
Separación mínima entre pistas	0,25 mm (250 μ m)
Diámetro de pads recomendados	0,8 mm – 1,2 mm
Profundidad uniforme de ruteado	0,1 mm – 0,2 mm

5.5.1. Pruebas de Repetibilidad del Prototipo

La capacidad de la CNC para producir el mismo patrón con exactitud en diferentes intentos. Se evalúa comparando medidas de pistas y pads en distintas áreas para lo cual se basó en la repetibilidad evaluando la disposición de la maquina al repetir la misma posición después de ejecutar una secuencia de comandos como se muestra en la Figura 5.20.

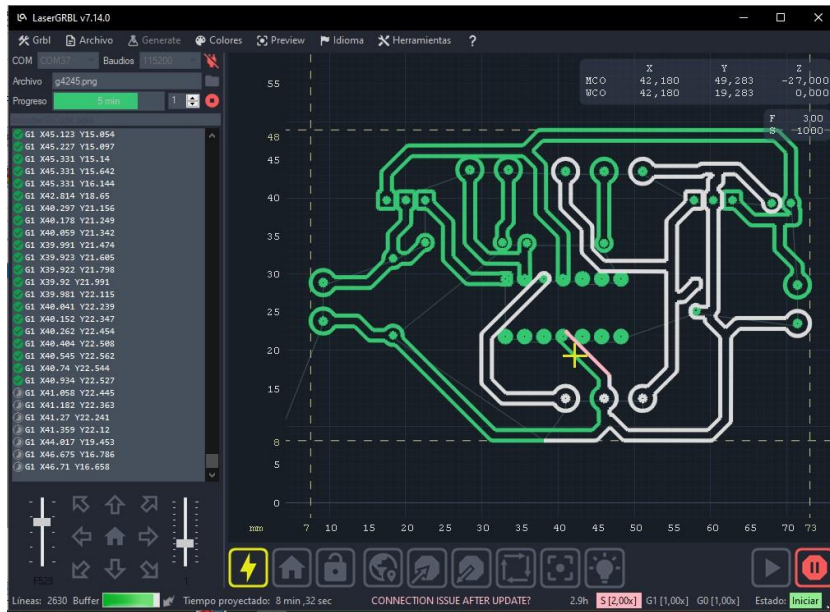


Figura 5.20 Secuencia de comandos para el trazado de pista de la placa PCB.

A partir del análisis de la Figura 5.21 de la PCB grabada por la máquina CNC se determinó que los trazos observados son bastante consistentes en términos de geometría y posición de las pistas. Sin embargo, en la imagen hay una falta de profundidad uniforme en ciertas áreas, lo que podría indicar una variabilidad en la presión o alineación del eje “Y”, el trazo de líneas de pista con variaciones de 0,4mm en la repetibilidad de posición de las líneas, lo que sugiere una posible inconsistencia en la aplicación de presión o enfoque con respecto a la calibración de los ejes conductores; en función a los requisitos de la empresa se observa una variabilidad de +/- 0,1mm como se observa en la Tabla 5.4, dando un error aceptable dentro de la aplicación para el proceso de ruteado de láser ya que en una sola pasada obtenemos la limpieza se esmalte protector y continuar con el proceso de ataque químico en base de combinación de Tricloruro de hierro y agua para el desprendimiento del cobre de la baquelita.

Tabla 5.4. Resultados de Variabilidad Obtenida

Repetibilidad requerida	Repetibilidad de máquina	Variabilidad
+/- 0,3m	+/- 0,4m	0,1m

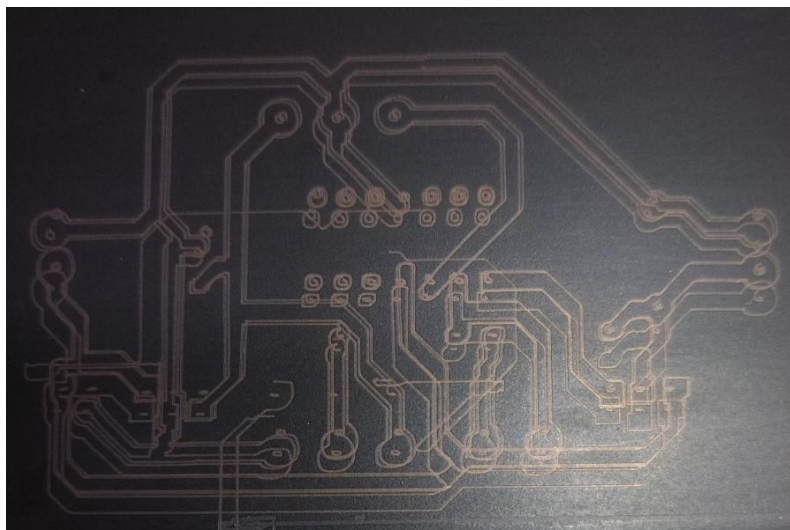


Figura 5.21. Pruebas de Repetibilidad de la máquina CNC

5.5.2. Resolución de Ruteado

En base a la Figura 5.22, se pueden distinguir detalles finos en los trazos de las pistas, pero algunos segmentos parecen más anchos o con bordes irregulares, lo que puede ser indicativo de limitaciones en la precisión del mecanizado, que breves rasgos se considera variaciones y desfases en los ejes conductores por tal motivo se hace la verificación de ancho de pista obteniendo un medida con 0,245mm y separación de pista en función de la linealidad de máquina CNC se obtiene al medir un valor puntos más críticos siendo estos en puntos cercano a los pads con un valor de 0,26 mm, mientras que para los pads se toma a consideración los diámetros de pads en mínimo de 1 a un máximo de 1,23. En la serigrafía que se muestra en la Figura 5.23, algunas marcas parecen más gruesas y menos definidas, lo que podría deberse a un problema de calibración o tipo de herramienta utilizada por tal motivo se hace el estudio de grado de penetración del haz de luz láser en la baquelita para el cual se obtiene como resultado una profundidad de 0,145 mm con un porcentaje de la capacidad en potencia del láser de (S500) representado al 50% de su valor nominal, cuyos datos se reflejan en la Tabla 5.5 donde se compara con los valores estándares y se obtiene porcentajes de error menor al 5% lo cual justifica una fiabilidad del 95% máquina, garantizado su óptimo funcionamiento.

Tabla 5.5. Comparativa de valores medidos

Descripción	Rango estándar	Rango Maquina cnc	Error %
Ancho de pista mínimo recomendado	0,25 mm (250 μm)	0,245	2
Separación mínima entre pistas	0,25 mm (250 μm)	0,26	4

Diámetro de pads recomendados	1,2 mm	1,23	2,5
Profundidad uniforme de ruteado	0,16 mm	0,145	3,15

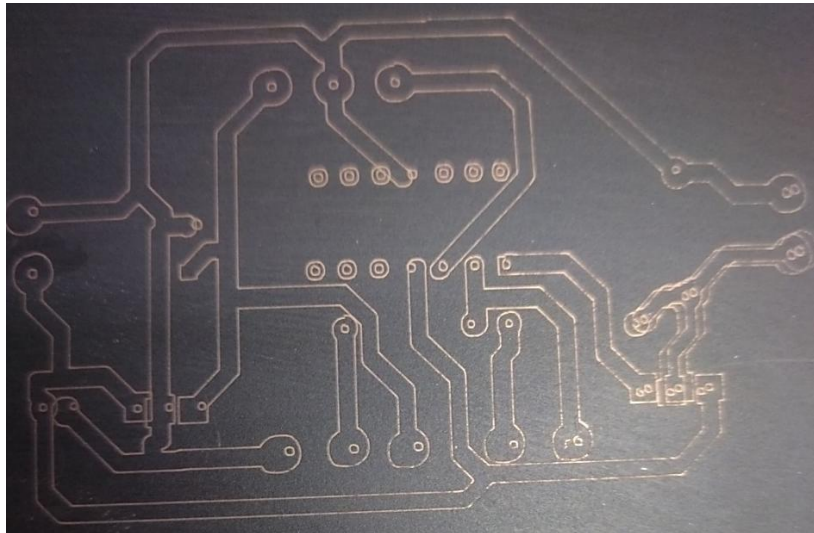


Figura 5.22. Ruteado de pista a una sola pasada.



Figura 5.23 Serigrafiado de elementos

5.5.3. Análisis de los bordes de las pistas y su alineación

Haciendo referencia de la Figura 5.24 se analizaron los bordes de las pistas y su alineación en relación con un patrón teórico (líneas rectas y ángulos). Donde se comparó la distribución de las pistas en diferentes regiones de la PCB para detectar posibles deformaciones. Como uniformidad en la profundidad de ruteado en las primeras imágenes sugiere que la presión de la herramienta es completamente homogénea haciendo notar a correcto funcionamiento de proyección de haz de luz de la herramienta sobre el material a procesar. En la Figura 5.25 de la serigrafía, algunas marcas parecen más oscuras y profundas que otras, lo que también sugiere una variabilidad en la presión ejercida sobre la placa es se evidenciado en la configuración del

cabezal inferior ya que en la resolución de la placa controlado tiene mayor rango de control en base al distribución de potencia sobre el herramienta de lado inferior obteniendo como resultado de la máquina CNC muestra equivalencias significativas con el patrón especificado en el software por ejemplo en la Figura 5.26 del patrón para la serigrafía donde el correcto envío y manejo de datos numéricos y operaciones matemáticas básicas, afecta directamente en su precisión siendo esta adecuada y optima en función de operaciones de ruteado del láser parala fabricación de placas pcb. Mencionar que para mejorar la efectividad de la máquina se requirió ajustes en el software como cuantificar un velocidad adecuada y porcentaje no muy alto en cantidad de potencia en el láser y una revisión del hardware para garantizar resultados confiables en el ruteado láser.

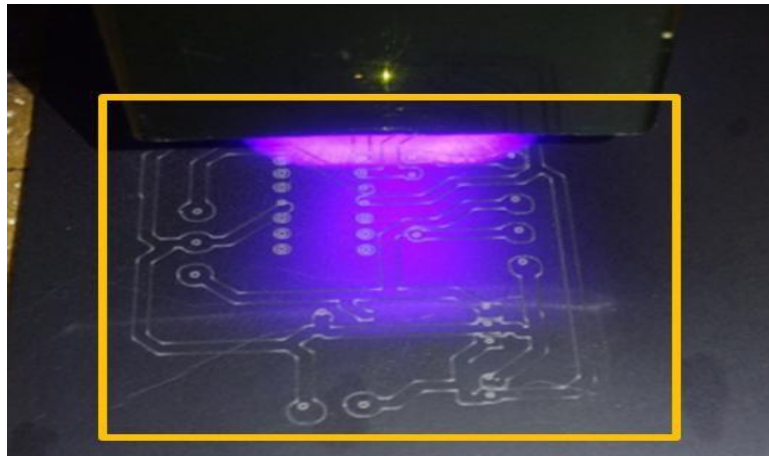


Figura 5.24 Ruteado y funcionamiento del cabezal superior

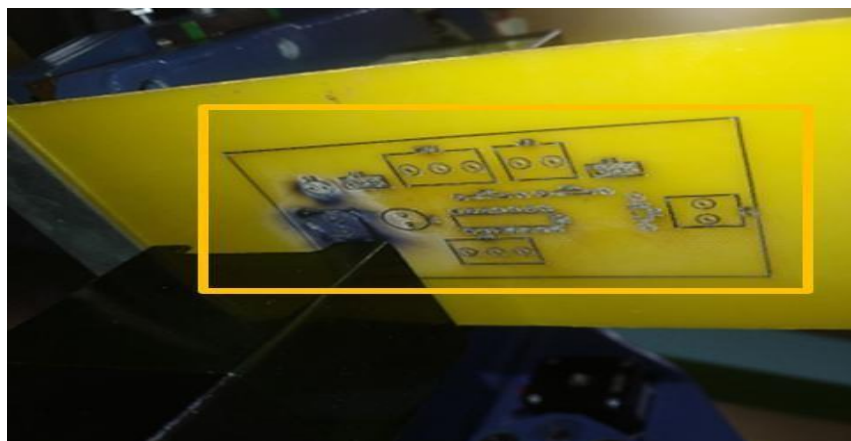


Figura 5.25. Ruteado y funcionamiento del cabezal Inferior.

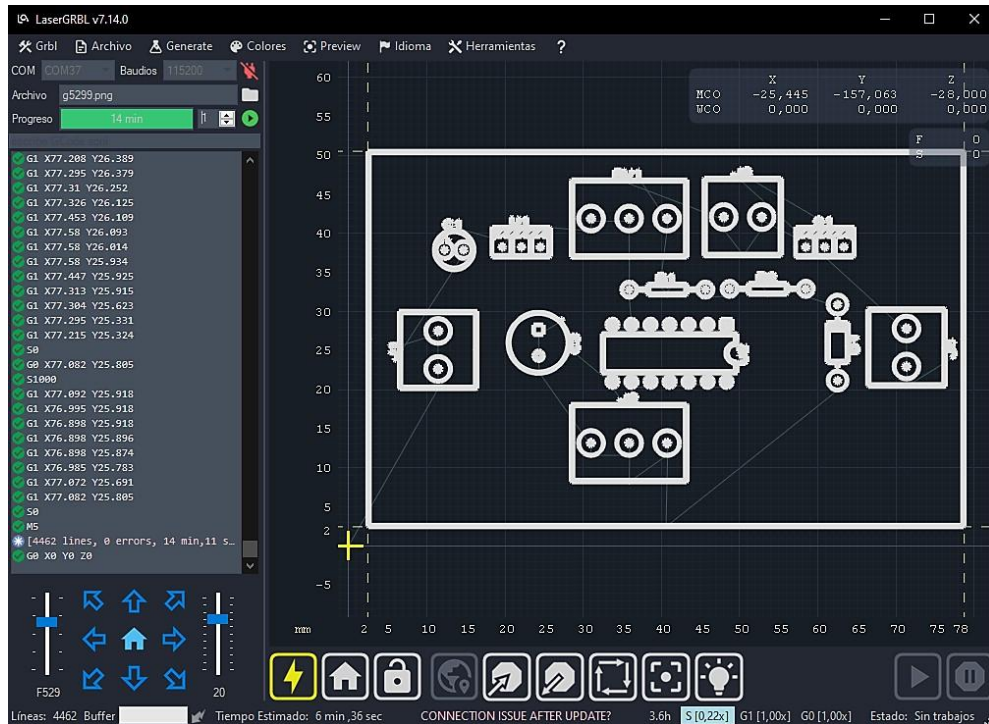


Figura 5.26. Patrón de serigrafía para placa PCB

5.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La Tabla 5.6, muestra los gastos en los componentes electrónicos necesarios para la construcción de una CNC laser doble lado para elaboración de placas PCB, se puede observar que entre los componentes más costosos están los perfiles V-slog, el riel MGN12 y el Makerbase dlc v2.1.

Tabla 5.6. Descripción de gastos directos

Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Final de carrera	2	13	26
Makerbase dlc v2.1	1	25	25
Drivers	4	1	6
Lamina V-slot	2	15	30
Riel MGN12	2	12	24
Carro MGN12H	2	25	50
Motor NEMA 17	3	3	9
Poleas dentadas GT2	4	4,5	18
Correas cerradas GT2	4	3	12
Tornillo sin fin	2	12	24
Fuente de alimentación	1	15	15

Mano de obra	1	1	300
Costos de ingeniería	1	1	300
TOTAL	--	--	\$ 849

La Tabla 5.7, muestra los costos de los imprevistos durante la construcción de la CNC para lo cual se tomó en cuenta transporte, viáticos e imprevistos generados durante la construcción de la máquina.

Tabla 5.7. Gastos indirectos

Gastos en componentes electrónicos			
Material	Cantidad	Costo/unidad	Costo total
Transporte	2 personas	\$10,00	\$20,00
Imprevistos	1	\$10,00	\$10,00
Viáticos	2 personas	\$10,00	\$20,00
		Total	\$50,00

La Tabla 5.8, muestra el costo total de la CNC laser, donde se suma los gastos directos e indirectos generando un total de \$899,00.

Tabla 5.8. Gasto total de CNC laser doble lado

Gasto total	
Gastos	Valor
Gastos directos	\$549,00
Gastos indirectos	\$50,00
Total	\$899,00

A continuación, se calculó el retorno de la inversión (ROI) con el objetivo de conocer la viabilidad y rentabilidad del proyecto. Para determinar el ROI, fue necesario calcular el incremento de ingresos, en Inpronics solución se sabe que con los métodos de ruteado tradicional se generaba alrededor de 10 placas PCB por día el cual tenía un costo promedio de \$15, actualmente con la máquina CNC laser se ha logrado hasta unas 15 placas diarias. Suponiendo un total de 22 días laborables se calcula el incremento de las ganancias con la ecuación como se muestra a continuación (ver Ecuación (5.6)).

$$\text{ganancia mensual} = \text{placas por día} * \text{precio por placa} * \text{días laborables} \quad (5.6)$$

$$\text{ganancia mensual sin cnc} = \$3300,00$$

ganancia mensual con cnc = \$4950,00

La ganancia generada por la empresa mensualmente antes con los métodos de ruteado tradicional y actualmente con la CNC genera un incremento de \$1650 dólares.

ganancia adicional = \$1650,00

Sabiendo que la construcción de la maquina costó un total de \$899,00 el ROI se calcula de la siguiente manera (ver ecuación (5.7)).

$$\text{ROI} = \frac{\text{Ganancia adicional}}{\text{Inversión}} * 100 \quad (5.7)$$

$$\text{ROI} = 183,53\%$$

Al obtener un ROI positivo, se puede evidenciar que el proyecto genera ganancias y al ser un valor de 183,53% indica que la inversión será recuperada en menos de un mes estimando que se cumplan con el promedio de placas demandadas.

Para conocer SI la CNC láser de doble lado es viable y rentable se requirió un análisis económico del VAN y el TIR.

Para el cálculo del VAN, se tomó en cuenta las siguientes consideraciones, la inversión inicial es el total del gasto generado de \$899,00. La rentabilidad se calculó para un período de 5 años, se considera un interés de 30% para reflejar el costo de oportunidad y finalmente, el flujo de caja se determinó considerando que la empresa INPRONIC genera actualmente unos \$16500,00 por año en la elaboración de microplacas PCB (ver ecuación (5.8)).

$$\text{VAN} = \sum \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (5.8)$$

Donde:

- F_t : Flujo de caja en el periodo t
- r: Tasa de descuento o tasa de interés:
- t: Número de años:
- I_0 : Inversión inicial

$$VAN = \sum \frac{1650.00}{(1 + 30\%)^5} - 899,00$$

Como resultado se obtuvo un VAN de 319,69 que al ser mayor a 0, se concluye que el proyecto es viable ya que genera ahorros económicos.

En cuanto al cálculo de la Tasa Interna de retorno (TIR) (ver ecuación (5.9)), se buscó determinar la tasa de interés que hace que el VAN sea cero. Este valor se obtiene mediante el método de prueba y error; sin embargo, para agilizar el proceso, se utilizó la herramienta Excel, que permitió el cálculo de manera directa.

$$0 = \sum \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 \quad (5.9)$$

Donde:

- F_t : Flujo de caja en el período t
- TIR: Tasa de descuento o tasa de interés
- t: Número de años
- I_0 : Inversión inicial

$$0 = \sum \frac{1650.00}{(1 + TIR)^5} - 899,00$$

La TIR o tasa de interés que genera un VAN de cero resultó ser de 182,52%, lo cual al ser mayor que el 30% permite concluir que el proyecto es rentable

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se realizó una investigación de los parámetros de diseño requeridos para la fabricación de una CNC en donde se determinaron los aspectos técnicos más importantes en base a las necesidades de la empresa INPRONIC SOLUTIONS considerando como base el proceso actual que posee el ruteo manual de las PCB. Se logró identificar que la implementación del equipo propuesto en esta investigación se considera como una herramienta importante dentro de la industria de fabricación de tarjetas electrónicas ya

que la automatización del sistema de ruteo de doble lado mediante el uso de láser permite que la empresa mejore la calidad de sus productos, las fallas y el tiempo de producción reduciéndolo a un 50%.

- Se realizó el diseño de la máquina CNC propuesta mediante una metodología que consta de 6 fases fundamentales que van desde la determinación de las variables de entrada y salida hasta la integración, calibración y pruebas del prototipo. Se analizaron las variables de entrada y salida que se relacionan con el sistema encontrando parámetros como la potencia del láser, velocidad de corte, tipo de material a rutear que para este caso es FR4, precisión del ruteado y consumo energético. Una vez identificados parámetros se definió las funcionalidades y requerimientos técnicos del prototipo, los cuales permitieron dimensionar cada uno de los componentes como los motores nema 17, la tarjeta de control Makerbase y el Láser LDHTHOPI. De igual manera se realizó el diseño mecánico de la estructura con sus respectivos planos para poder fabricar cada uno de los componentes en impresión 3D con el material PLA y resina para mejorar su durabilidad. Se ejecutaron pruebas de simulación estática mediante el uso de SolidWorks obteniendo resultados de factor de seguridad y tensiones que muestran la resistencia de la estructura diseñada. Finalmente se realizó la construcción, montaje, calibración e integración del prototipo con el software que permite generar el GCODE para interpretar las instrucciones de ruteo necesarias para ejecutar las pruebas de ruteo.
- Se realizaron diversas pruebas de desempeño del prototipo midiendo la precisión y repetibilidad obtenida. En estas pruebas se consiguió una repetibilidad de 0,0107 para el eje x, 0,0113 para el eje y, 0,0308 para el eje z, siendo estos valores cercanos a 0 lo que muestra una buena capacidad de la máquina en la repetición del mismo movimiento, característica fundamental para este tipo de equipos. De igual manera, se obtuvo un error promedio de 0,023mm verificando que los cabezales no pueden estar completamente superpuestos en su retorno a las coordenadas de referencia home, sin embargo, al ser prácticamente 0 se despreja este error. En cuanto a tiempos se refiere, con este equipo la empresa puede mejorar el tiempo de ruteo en un 50% debido a que ya no requieren hacer un giro manual del PCB ni volver a iniciar el proceso para ejecutar el ruteo de la parte posterior. Finalmente se evaluó la precisión del mecanizado y la serigrafía en el ruteado de pistas en placas de prueba PCB, observando variaciones en con respecto al ancho de las pistas que se encuentra en 0,245mm, así como en la

separación cercana a los pads con un valor de 0,26 mm, lo cual indica cierto desfase en el eje del equipo lo cual requiere una calibración para optimizar estos valores.

6.2. RECOMENDACIONES

- Antes de iniciar con el proceso de ruteado láser, se recomienda realizar una inspección minuciosa de la máquina CNC que permita identificar posibles daños o desperfectos. Si se detecta alguna anomalía, se debe implementar un plan de mantenimiento preventivo para garantizar un funcionamiento óptimo y evitar fallos durante el ruteado de placas PCB.
- Se sugiere al usuario consultar el manual de instrucciones, donde se detalla paso a paso el proceso de ruteado con la CNC de doble cara. Además, es importante revisar el manual de mantenimiento, cuyo propósito es prolongar la vida útil del equipo y asegurar su correcto funcionamiento.
- Se recomienda evaluar la posibilidad de incorporar nuevos componentes que optimicen el proceso de ruteado láser, como sujetadores en los tres ejes para mejorar la estabilidad y versatilidad en la sujeción de las placas.

7. REFERENCIAS

- [1] Santiago David & Sánchez Luna, "Repositorio Instituto Tecnológico de Martínez de la Torre abril 2022. [Online]. Available: <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4635/1/REDISE%C3%91O%20DE%20M%C%81QUINA%20L%C3%81SER%20CNC%20IMT%202022.pdf>.
- [2] M. B. & S. Edwin, "Repositorio Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca," noviembre 2021. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21439/1/UPCT009424.pdf>.
- [3] D. I. & S. Jaime, "Repositorio Escuela Politécnica del Litoral," Marzo 2019. [Online Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/52862/111176%20%20%20Delgado%20Mendoza%2c%20Ignacio%20Javier%20%26%20Machuc%20Salinas%2c%20Jaime.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- [4] L. B., *Diseño y construcción de una máquina CNC de tres ejes para el ruteo de pistas y talad de circuitos impresos PCBs*, Bogotá, Colombia, 2018.
- [5] M. R., *Máquinas y servicios industriales*, Bogotá: Limusa S.A., 2018.
- [6] S. S., *Manufactura, ingeniería y tecnología*, México: Pearson education 5° edición, 2015.
- [7] G. Kevin, "Universidad Técnica Equinoccial," mayo 2018. [Online]. Available <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-politecnica-salesiana/mecanica/definicion-de-control-numerico-computarizado/8088131>.
- [8] P. Luis, *Maquinado CNC y sus características*, Bogotá, Colombia, 2015.
- [9] R. Luis, *Máquinas CNC, características y tipos*, México: Iluminus, 2015.
- [10] M. L., *Máquinas CNC, características y funciones*, Bogotá, Colombia, 2018.
- [11] G. José, "Scielo," Marzo 2016. [Online]. Available http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03002006000100011#:~:text=La%20palabra%20C3%A1ser%20es%20una%20siglonimi%20de%20las%20palabras%20inglesas,electromagn%C3%A9ticas%20de%20la%20gama%0%C3%B3ptica..
- [12] P. Julián, "Definiciones y conceptos," 12 Junio 2020. [Online]. Available <https://definicion.de/laser/>.
- [13] L. Liu, . Z. Zhang and D. Liu,, "Twisted and coiled tube actuators driven by hydraulic pressure Experiment and theory," *Thin-Walled Structures*,, 2025.
- [14] C. Mateo, "Circuitos impresos," 2024. [Online]. Available <https://www.studocu.com/ec/document/instituto-superior-tecnologico-vida-nueva/software/circuitos-impresos-pcb/86772081>.
- [15] Orient Display, "¿Qué son las técnicas de grabado de PCB?," 10 enero 2022. [Online Available: <https://www.orientdisplay.com/es/knowledge-base/pcb-basics/what-are-pc-etching-techniques/>. [Accessed 14 marzo 2025].

- [16] I. Espinoza, "Como hacer circuitos impresos con el método de planchado.," 13 septiemb 2017. [Online]. Available: <http://www.electronicaivanespinoza.com/2017/09/como-hace-circuitos-impresos-con-el.html>. [Accessed 14 marzo 2025].
- [17] Instructables, "Fabricar Circuito Pcb Sin Plancha," 28 diciembre 2015. [Online]. Available: <https://www.instructables.com/Fabricar-Circuito-Pcb-Sin-Plancha/>. [Accessed 14 mar 2025].
- [18] SICNOVA, "Guía para elegir filamentos para impresoras 3D," 14 febrero 2024. [Online] Available: <https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/guia-filamentos-impresoras-3d> [Accessed 12 marzo 2025].
- [19] Dassault systemes, "Tipos de filamentos para impresoras 3D," 7 marzo 2024. [Online] Available: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/types-3d-printer-filament> [Accessed 12 marzo 2025].
- [20] filament2print, "filamento de titanio," 16 diciembre 2020. [Online]. Available: <https://filament2print.com/es/sinterizables/1209-filamet-titanio-64-5.html>.
- [21] Megadyne, "Correas trapeciales," 16 03 2025. [Online]. Available: <https://megadynegroup.com/es/productos/correas-trapeciales>.
- [22] A. Canga and B. Lamiña, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC DE EJES PARA EL RUTEO DE PISTAS Y TALADRADO DE CIRCUITOS IMPRESOS (PCB POR EMC2, APLICABLE EN TARJETAS DE RECUPERACIÓN DE PLCs," 2018.
- [23] v. Zarabozo, "formacionmecanizado," 14 junio 2024. [Online]. Available: <https://formacionmecanizado.com/que-es-la-programacion-cnc/>.
- [24] D. Pachacama and D. Toapanta , ""IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN DE PCB PARA CIRCUITOS ELECTRÓNICOS EN PLACA FENÓLICA CON CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO CNC PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI"," 2021.
- [25] INTER 2000, "VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UNA MAQUINA CNC," 15 2 202 [Online]. Available: <https://www.inter2000mecanizados.com/post/ventajas-y-desventajas-d-una-maquina-cnc>.

- [26] L. Wang, . J. Han and F. Ma, "Accuracy design optimization of a CNC grinding machi towards low-carbon manufacturing," *Journal of Cleaner Production*, vol. 406, 2023.
- [27] Z. Yuan, J. Shi and Y. Huang, "OpenECAD: An efficient visual language model for editab 3D-CAD design," *Computers & Graphics*, vol. 124, 2024.
- [28] 3D"S, "Mecanizado CNC," 3 2024. [Online]. Availabl <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/cnc-machining>.
- [29] I. Mocian and . R. Cazacu, "Software for Computer Aided Manufacturing with the MO SEIKI CNC Milling Machine," *Procedia Technology*, vol. 12, pp. 369-374, 2019.
- [30] P. Suanpang, U. Chandra Das, N. Basha Shaik and . C. N. Rajib, "Development of automat CNC machine with versatile applications in art, design, and engineering," *Array*, vol. 24, 202
- [31] J. Liang, D. Wu, . S. Liu and . H. Wang, "Research on hybrid remanufacturing process cha of laser cladding, CNC machining and ultrasonic rolling for aero-engine blades," *Journal Manufacturing Processes*, vol. 110, 2024.
- [32] P. Ogin, . D. Levashkin and . S. Yaresko, "Block-Modular Principle of Build Compositi Automatically Changeable Laser Modules for CNC Machines," *Procedia Engineering*, 2017
- [33] P. Kumar, . I. Raouf and . H. Soo Kim, "Transfer learning for servomotor bearing fault detectio in the industrial robot," *Advances in Engineering Software*, vol. 194, 2024.
- [34] C. Feng, Y. Wu, B. Qiu and J. Zhang, "Energy consumption optimisation for machinin processes based on numerical control programs," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 5 2023.
- [35] R. Ortiz, ""DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER PARA PAPE CON INTERFAZ GRÁFICA," 2017.
- [36] Q. Tuan Vu, L. Lam Nguyen and . V. Nhat Pham, "Compact lab-on-printed circuit board (PC for free-surfactant silver nanomaterial synthesis," *Chemical Engineering and Processing Process Intensification*, vol. 203, 2024.
- [37] S. Silvestre, J. Salazar and J. Marzo, *Erasmus +*, vol. 1, p. 47, 2019.

- [38] SCHMALZ, "La fabricación de circuitos impresos: pasos del proceso y aplicaciones," 202 [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/es/saber-de-vacio/la-fabricacion-de-circuito-impresos-pasos-del-proceso-y-aplicaciones/>.
- [39] R. L. Norton, *Machine Design: An Integrated Approach*, Pearson, 2019.