# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NÚMERICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI EXTENSIÓN LA MANÁ**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniería en Electromecánica.

Autores:

David Moisés Allauca González

Jair Alfredo Mawyin Villafuerte

Tutor:

Ing. Corrales Bonilla Johnatan Israel, MSc

**LA MANÁ-ECUADOR**

**ABRIL – AGOSTO**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

David Moisés Allauca González con cédula de ciudadanía No. 0504256603, Jair Alfredo Mawyin Villafuerte con cédula de ciudadanía No. 1205444209declaramos ser autores del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: "IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI EXTENSIÓN LA MANÁ"**, siendo el Ing. Corrales Bonilla Johnatan Israel, MSc, Tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

La Maná, 19 de Agosto del 2026



Jair Alfredo Mawyin Villafuerte
C.C: 1205444209



David Moisés Allauca González
C.C.: 0504256603



Escaneado con CamScanner

## CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte ALLAUCA GONZÁLEZ DAVID MOISÉS identificado con cédula de ciudadanía No. 0504256603 de estado civil soltero /a , a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

**ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Electromecánica, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado "IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI", la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

**Historial Académico**

Inicio de la carrera: Abril 2019 - Agosto 2019

Finalización de la carrera: Octubre 2023 – Marzo 2024

Aprobación en Consejo Directivo: 28 de noviembre del 2023

Tutor: Ing. Corrales Bonilla Johnatan Israel, MSc

Tema: "IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI"

**CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

**CLÁUSULA TERCERA. -** Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

**CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO**: Por el presente contrato **EL CEDENTE,** transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
b) La publicación del trabajo de grado.
c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.



Escaneado con CamScanner

e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

**CLÁUSULA QUINTA. -** El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

**CLÁUSULA SEXTA. -** El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

**CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. -** Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

**CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

**CLÁUSULA NOVENA. -** El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

**CLÁUSULA DÉCIMA. -** En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

**CLÁUSULA UNDÉCIMA. -** Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, 19 de agosto del 2026.



Allauca González David Moisés
**EL CEDENTE**

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
**LA CESIONARIA**



Escaneado con CamScanner

## CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte MAWYIN VILLAFUERTE JAIR ALFREDO, identificado con cédula de ciudadanía No. 1205444209 de estado civil soltero /a , a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

**ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Electromecánica, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado "IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI", la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

**Historial Académico**

Inicio de la carrera: Abril 2019 - Agosto 2019
Finalización de la carrera: Octubre 2023 – Marzo 2024
Aprobación en Consejo Directivo: 28 de noviembre del 2023
Tutor: Ing. Corrales Bonilla Johnatan Israel, MSc

Tema: "IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI"

**CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

**CLÁUSULA TERCERA. -** Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

**CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO**: Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
g) La publicación del trabajo de grado.
h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.



Escaneado con CamScanner

j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

**CLÁUSULA QUINTA.** - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

**CLÁUSULA SEXTA.** - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

**CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.** - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

**CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

**CLÁUSULA NOVENA.** - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

**CLÁUSULA DÉCIMA.** - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

**CLÁUSULA UNDÉCIMA.** - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, 19 de agosto del 2026.

Mawyin Villafuerte Jair Alfredo
**EL CEDENTE**

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
**LA CESIONARIA**



Escaneado con CamScanner

## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

**"IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI EXTENSIÓN LA MANÁ"**, de Mawyin Villafuerte Jair Alfredo y Allauca González David Moisés, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Extensión La Maná, considero que dicho informe investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

La Maná, 19 de agosto del 2026

MSc. Corrales Bonilla Johnatan Israel
C.C. 0503145518
**TUTOR**



Escaneado con CamScanner

## AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación, de conformidad con las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, Carrera de Ingeniería Electromecánica; por cuanto, los postulantes: Allauca Gonzáles David Moises Y Mawyin Villafuerte Jair Alfredo con el título del Proyecto de Investigación: **"IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI EXTENSIÓN LA MANÁ"**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

La Maná, 19 de agosto del 2026

Para constancia firman:

MSc. Alex Darwin Paredes Anchatipán
C.C: 0503614935
**LECTOR 1 (PRESIDENTE)**

MSc. Pazuña Naranjo William Paul
C.C: 0503338592
**LECTOR 2 (MIEMBRO)**

MSc. Borja Borja Cristian Darwin
C.C: 1719252585
**LECTOR 3 (MIEMBRO)**



Escaneado con CamScanner

***AGRADECIMIENTO***

*El camino hacia el éxito no es sencillo, pero alcanzarlo es una de las mayores satisfacciones. A lo largo de este proceso de formación, se compartieron conocimientos y vivencias que nos moldearon como profesionales, marcando el cierre de una importante etapa de nuestras vidas. Por ello, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todos los profesionales de la Universidad Técnica de Cotopaxi, quienes nos transmitieron sus saberes y experiencias, los cuales serán fundamentales para nuestro desempeño en la sociedad. Asimismo, extendemos nuestra gratitud a amigos y familiares que nos acompañaron y apoyaron durante esta travesía hacia la consecución de este logro.*

***David***

Escaneado con CamScanner

## *DEDICATORIA*

*A mis padres, por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por tu respaldo constante, por brindarme la base y la confianza para construir mi futuro, y por enseñarme el verdadero valor del trabajo duro; lecciones que me han acompañado todos los días, desde el taller hasta las aulas de la Universidad Técnica de Cotopaxi. A mis hermanos, por ser un compañero invaluable en este camino. Gracias por tu orientación, por tu disposición para ayudarme y por ser mi principal fuente de consulta en los detalles técnicos y eléctricos más complejos de este proyecto. A mi familia en general, por su amor incondicional y por comprender mis ausencias durante las largas horas de diseño, ensamblaje y pruebas requeridas para la implementación de esta cortadora láser CNC. Este logro no es solo mío, es el fruto del esfuerzo compartido de todos nosotros.*

*David*

Escaneado con CamScanner

***AGRADECIMIENTO***

*El camino hacia el éxito no es sencillo, pero alcanzarlo es una de las mayores satisfacciones. A lo largo de este proceso de formación, se compartieron conocimientos y vivencias que nos moldearon como profesionales, marcando el cierre de una importante etapa de nuestras vidas. Por ello, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todos los profesionales de la Universidad Técnica de Cotopaxi, quienes nos transmitieron sus saberes y experiencias, los cuales serán fundamentales para nuestro desempeño en la sociedad. Asimismo, extendemos nuestra gratitud a amigos y familiares que nos acompañaron y apoyaron durante esta travesía hacia la consecución de este logro.*

***Jair***

Escaneado con CamScanner

## *DEDICATORIA*

*A mis padres, por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por tu respaldo constante, por brindarme la base y la confianza para construir mi futuro, y por enseñarme el verdadero valor del trabajo duro; lecciones que me han acompañado todos los días, desde el taller hasta las aulas de la Universidad Técnica de Cotopaxi. A mis hermanos, por ser un compañero invaluable en este camino. Gracias por tu orientación, por tu disposición para ayudarme y por ser mi principal fuente de consulta en los detalles técnicos y eléctricos más complejos de este proyecto. A mi familia en general, por su amor incondicional y por comprender mis ausencias durante las largas horas de diseño, ensamblaje y pruebas requeridas para la implementación de esta cortadora láser CNC. Este logro no es solo mío, es el fruto del esfuerzo compartido de todos nosotros.*

***Jair***

Escaneado con CamScanner

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO:** IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NÚMERICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI EXTENSIÓN LA MANÁ

**Autores:**

Jair Alfredo Mawyin Villafuerte

David Moisés Allauca González

**RESUMEN**

El presente proyecto de investigación detalla la implementación de una cortadora láser de CO2 de 50W controlada por Control Numérico Computacional (CNC) para el laboratorio de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná. El objetivo principal es implementar este equipo láser garantizando su correcto acoplamiento operativo, seguridad y precisión para la ejecución de procesos de construcción mecánica. Metodológicamente, el trabajo experimental se divide en tres fases secuenciales: primero, la evaluación y adecuación termomecánica, que abarca la instalación del sistema de refrigeración por bomba de agua, asistencia neumática y extracción de gases para un entorno seguro; segundo, la caracterización cinemática y de control, enfocada en la sintonización de los motores paso a paso y la validación del desplazamiento con el software CAD/CAM; y tercero, el diseño de experimentos (DOE) y optimización paramétrica, donde se correlacionó la potencia y velocidad de corte para espesores de hasta 5 mm en materiales de ingeniería como MDF, acrílico y polietileno. Durante estas pruebas se evaluaron variables críticas como el ancho de corte (Kerf) y la Zona Afectada por el Calor (ZAC). Como resultado, se obtuvo y entregó una matriz técnica consolidada de parámetros óptimos que sirve como guía para operar la máquina con cortes precisos y limpios desde el primer intento.

**Palabras clave:** Control Numérico Computacional (CNC), Láser de CO2, Controlador Ruida, Optimización Paramétrica, Pruebas Experimentales.

Escaneado con CamScanner

# TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

## FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TITLE:** IMPLEMENTATION OF A COMPUTER NUMERICAL CONTROL (CNC) LASER CUTTER FOR THE ELECTROMECHANICAL LABORATORY AT TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI, LA MANÁ.

**Authors:**

Jair Alfredo Mawyin Villafuerte

David Moisés Allauca González

**ABSTRACT**

This research project details the implementation of a 50W CO2 laser cutter controlled by Computer Numerical Control (CNC) for the Electromechanical Engineering program's laboratory at the Technical University of Cotopaxi, La Maná Extension. The main objective is to implement this laser equipment while ensuring its proper operational integration, safety, and precision for carrying out mechanical manufacturing processes. Methodologically, the experimental work is divided into three sequential phases: first, the thermomechanical evaluation and adaptation, which includes the installation of a water-pump cooling system, pneumatic assistance, and gas extraction to ensure a safe environment; second, the kinematic and control characterization, focused on tuning the stepper motors and validating the displacement using CAD/CAM software; and third, the design of experiments (DOE) and parametric optimization, where cutting power and speed were correlated for thicknesses of up to 5 mm in engineering materials such as MDF, acrylic, and polyethylene. During these tests, critical variables such as kerf width and the Heat-Affected Zone (HAZ) were evaluated. As a result, a consolidated technical matrix of optimal parameters was obtained and delivered, serving as a guide for operating the machine to achieve precise and clean cuts on the first attempt.

Keywords: Computer Numerical Control (CNC), $CO_2$ Laser, Ruida Controller, Parametric Optimization, Experimental Testing.

Escaneado con CamScanner

**ÍNDICE GENERAL**

ÍNDICE GENERAL ..... 2
1 INFORMACIÓN GENERAL ..... 10
2 INTRODUCCIÓN ..... 11
3 JUSTIFICACIÓN ..... 12
4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO ..... 13
4.1 Beneficiarios directos ..... 13
4.2 Beneficiarios indirectos ..... 14
5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN ..... 15
5.1 Problemática ..... 15
5.2 Planteamiento del problema ..... 16
6 OBJETIVOS ..... 16
6.1 Objetivo general ..... 16
6.2 Objetivos específicos ..... 16
7 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS DE RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS ..... 17
8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA ..... 18
8.1 Tecnología de Corte Térmico por Láser CO2 ..... 18
8.1.1 Principios físicos del emisor de Dióxido de Carbono ..... 18
8.1.2 Óptica y propagación del haz térmico ..... 19
8.2 Interacción térmica láser-material ..... 19
8.3 Máquinas de corte por láser: láser de CO2 y mecanizado ..... 19
8.3.1 Tipos de máquinas CNC ..... 20
8.3.2 Ventajas ..... 20
8.3.3 Inconvenientes ..... 21
8.3.4 Láser de CO2 ..... 22

8.3.5 Corte por Láser ..... 24
8.3.1 Óptica del láser ..... 27
8.3.2 Espejos ..... 28
8.3.3 Lente focal ..... 28
8.3.4 Punto cero de la máquina ..... 29
8.3.5 Ventajas de hacer corte por laser ..... 29
8.3.6 Grabado láser ..... 30
8.3.7 Mecanizado por láser ..... 31
8.4 Propiedades del material ..... 32
8.4.1 Propiedades térmicas ..... 32
8.4.2 Densidad ..... 32
8.4.3 Difusividad térmica ..... 33
8.4.4 Temperatura superficial ..... 33
8.4.5 Impacto térmico en la cara exterior ..... 34
8.5 Parámetros del proceso ..... 34
8.5.1 Velocidad del corte ..... 34
8.5.2 Gas auxiliar ..... 35
8.5.3 Calidad del corte ..... 35
8.5.4 Rugosidad superficial ..... 35
8.5.1 Manufactura sustractiva mediante corte por láser (Potencia, velocidad y espesor) 35
8.6 Adecuaciones termomecánico y sistemas periféricos ..... 36
8.6.1 Transferencia de calor y sistemas de refrigeración ..... 36
8.6.2 Asistencia neumática y dinámica de fluidos ..... 37
8.6.3 Extracción de gases ..... 37
8.7 Control numérico computarizado (CNC) y mecatrónica ..... 37
8.7.1 ¿Qué es Control Numérico Computarizado (CNC)? ..... 37

8.7.2 Tipos de sistema de control numérico ..... 39
8.7.3 Interpolación ..... 39
8.7.4 Características principales ..... 40
8.7.5 El componente humano ..... 40
8.8 Arquitectura de sistema de manufactura CNC ..... 41
8.8.1 Arquitectura Física del Sistema ..... 41
8.9 Controladores de procesamiento digital de señales (DSP) ..... 42
8.9.1 ¿Qué es una placa base industrial (Controlador DSP)? ..... 42
8.9.2 Características de Memoria ..... 42
8.9.3 Interfaz Hombre-Máquina (HMI) ..... 42
8.9.4 Comunicación ..... 43
8.9.1 Controlador Ruida RDC6445G ..... 44
8.9.2 Nomenclatura del controlador ..... 44
8.9.3 Especificaciones de rendimiento del controlador RDC644XG ..... 45
8.10 El lenguaje de maquina y código G ..... 46
8.10.1 Definición y estructura del Código G ..... 46
8.10.2 Algoritmos de Control y Espacios de Ejecución ..... 49
8.10.3 El Intérprete de Código G y Flujo de Datos ..... 49
8.10.4 Conversión de vectores a coordenadas matemáticas ..... 50
8.10.5 Sistemas CAD/CAM ..... 51
8.10.6 Tecnología CAM ..... 51
8.10.7 Tecnología CAD ..... 52
8.11 Principio de los motores paso a paso ..... 53
8.11.1 Fundamento electromagnético básico ..... 53
8.11.2 Cinemática discreta (El concepto de "Paso") ..... 54
8.11.3 Tipos de motores y características mecánicas ..... 55
8.11.4 Secuencia de micropasos ..... 57

8.11.5 Sincronización del controlador con la etapa de actuación y corte ..... 58
8.11.6 Características físicas y topología bipolar del estándar NEMA 17 ..... 58
8.11.7 Control de potencia e inversión electromagnética (Circuito Puente en H) 60
8.12 Controladores de potencia (Drivers) ..... 61
8.12.1 El driver como etapa de potencia y amplificación ..... 61
8.12.2 Interfaz lógica de control: Señales PUL, DIR y ENA ..... 62
8.12.3 Proceso de conmutación final ..... 62
8.13 Distribución energética en sistema automatizados ..... 63
8.13.1 Principio de aislamiento galvánico e interferencia electromagnética .. 63
8.13.2 Etapa lógica y de control (Fuente de 24V DC) ..... 63
8.13.3 Etapa de actuación mecánica y protección Bulk (Fuente de 36V DC) 64
8.13.4 Etapa de excitación láser (Fuente de Alta Tensión - Flyback) ..... 66
8.14 Elemento de seguridad y control de posición ..... 67
8.14.1 Sensores de proximidad inductivos ..... 67
8.14.1 Sensor de proximidad (final de carrera) ..... 68
9 METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL ..... 69
9.1 Tipo de investigación ..... 69
9.2 Diseño experimental ..... 70
9.2.1 Fase 1: Evaluación y acoplamiento termomecánico ..... 70
9.2.2 Fase 2: Caracterización cinemática y de control ..... 75
9.2.3 Fase 3: Diseño de experimentos (DOE) y optimización paramétrica .. 77
10 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS ..... 92
10.1 Resumen de la Ejecución Experimental ..... 92
10.1.1 Adecuación Termomecánica y Seguridad (Fase 1) ..... 92
10.1.2 Calibración del Movimiento o Cinemática (Fase 2): ..... 93
10.1.3 Pruebas de Corte y Optimización (Fase 3): ..... 93

10.2 Matriz Consolidada de Parámetros Óptimos y Límites Operativos ..... 93
10.3 Análisis dimensional y pérdida de material (Kerf) ..... 95
10.4 Aplicación práctica en el laboratorio ..... 96
11 IMPACTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y TÉCNICOS ..... 96
11.1 Impacto Técnico ..... 96
11.2 Impacto Social ..... 96
11.3 Impacto Económico ..... 97
12 PRESUPUESTO DEL PROYECTO ..... 98
12.1 Presupuesto de la maquina láser y modulo ..... 98
12.2 Materiales donados por la universidad. ..... 98
13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 98
13.1 Conclusiones ..... 98
13.2 Recomendaciones ..... 99
14 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 100
15 ANEXOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**
15.1 MANUAL DE USO Y OPERACIÓN ..... **¡Error! Marcador no definido.**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades y sistemas de tareas en relación a los objetivos. ..... 17

Tabla 2. Rendimiento del controlador ..... 45

Tabla 3. Tipo de código G. ..... 47

Tabla 4. Tipo de código M. ..... 48

Tabla 5. Especificación del motor paso a paso Gema 17 ..... 59

Tabla 6. Fases metodológicas del proyecto ..... 70

Tabla 7. Registro de validación de los subsistemas termomecánico. ..... 73

Tabla 8. Registro de validación de caracterización cinemática. ..... 77

Tabla 9. Matriz de optimización paramétrica (Material: MDF / Espesor: 3.0 mm) ..... 81

Tabla 10. Matriz de optimización paramétrica (Material: MDF / Espesor: 4.0 mm) ... 82

Tabla 11. Prueba limite operativo (Material: MDF / Espesor: 5.0 mm) ..... 82

Tabla 12. Matriz de optimización paramétrica (Material: Acrílico / Espesor: 2.0 mm)..... 85

Tabla 13. Matriz de optimización paramétrica (Material: Acrílico / Espesor: 3.0 mm)..... 85

Tabla 14. Prueba de limite operativo (Material: Acrílico / Espesor: 5.0 mm) ..... 86

*Tabla 15.* Matriz de optimización paramétrica (Material: Polietileno / Espesor: 2.0 mm) ..... 87

Tabla 16. Matriz de optimización paramétrica (Material: Polietileno / Espesor: 3.0 mm) ..... 88

Tabla 17. Prueba de limite operativo (Material: Polietileno / Espesor: 5.0 mm) ..... 89

Tabla 18. Matriz de optimización para grabado superficial (Material: MDF) ..... 90

Tabla 19. Matriz de optimización para grabado superficial (Material: Acrílico). ..... 91

Tabla 20.Matriz general de parámetros óptimos y límites para corte y grabado (Tubo CO2 - 50W). ..... 94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de beneficiarios directos (Ingeniería Electromecánica). ..... 14

Figura 2. Proporción de beneficiarios indirectos (Extensión La Maná). ..... 14

Figura 4. Laser CO2. ..... 22

figura 5. Funcionamiento de del corte por láser. ..... 24

Figura 6. Corte por láser aleaciones. ..... 25

Figura 7. Fases del proceso de corte láser ..... 27

Figura 8. Enfoque del haz láser. ..... 29

Figura 9. Grabado por láser. ..... 30

Figura 10. Diferencia de acabado. ..... 31

Figura 11.Esquema de los elementos internos de un tubo de gas CO2. ..... 36

Figura 12. Esquema general del sistema electrico principal ..... 41

Figura 13. Imagen del panel (HMI) ..... 43

Figura 14. Controlador Ruida ..... 44

Figura 15. Descripción del modelo del controlador. ..... 45

Figura 16. Programa máquina CNC ..... 47

Figura 17. Diagrama de bloque del intérprete ..... 50

Figura 18. Ejemplo de movimiento G02 ..... 50

Figura 19. Proceso de mecanizado en un CNC. ..... 53

Figura 20. Regla de la mano izquierda. ..... 54

Figura 21. Ángulo de paso de 90 grados. ..... 54

Figura 22. Motor paso a paso de reluctancia variable ..... 55

Figura 23. Motor de imán permanente ..... 56

Figura 24. Micropasos en la bobina del motor. ..... 57

Figura 25. Nema 17. ..... 58

Figura 26. Los cuatros hilos del motor paso a paso bipolar. ..... 59

Figura 27. Circuito de control de un motor bipolar. ..... 61

Figura 28. Fuente de voltaje. ..... 64

Figura 29. Fuente de voltaje. ..... 65

Figura 30. Esquemáticos de drivers y del circuito bulk. ..... 66

Figura 31. Principio del funcionamiento de un detector inductivo. ..... 67

Figura 32. Bomba de agua modelo (GP-316) de 15W ..... 71

Figura 33. Compresor modelo (ACO_004) de 55W ..... 72

Figura 34. Extractor de humo. ..... 72

Figura 35. Prueba de humo trazador. ..... 74

Figura 36. Calibración dimensional de los X,Y. ..... 76

Figura 37. Probeta de caja y espiga para la determinación empírica del Kerf y tolerancias de ensamble. ..... 79

figura 38. Verificación metrológica del desplazamiento cinemático en los ejes cartesianos mediante grabado superficial. ..... 80

Figura 39. Degradación térmica severa (Prueba rechazada) ..... 83

Figura 40. Acabado óptimo. ..... 83

Figura 41. Inspección visual de los resultados óptimos de contraste y textura en grabado superficial por barrido sobre sustratos de diferente densidad. ..... 92

## ÍNDICE DE ECUACIONES

( 1 )..... 33
( 2 )..... 33
( 3 )..... 33
( 4 )..... 34
( 5 )..... 53

# 1 INFORMACIÓN GENERAL

**Título del Proyecto:**

"IMPLEMENTACIÓN DE UNA CORTADORA LÁSER POR CONTROL NÚMERICO COMPUTACIONAL PARA EL LABORATORIO DE ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI EXTENSIÓN LA MANÁ."

| | |
|---|---|
| **Fecha de inicio:** | Abril del 2025 |
| **Fecha de finalización:** | Agosto del 2026 |
| **Lugar de ejecución:** | Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná |
| **Unidad académica que auspicia:** | Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas CIYA |
| **Carrera que auspicia:** | Ingeniería Electromecánica |

| | |
|---|---|
| **Proyecto de investigación vinculado:** | NA |
| **Equipo de trabajo:** | Sr. Mawyin Villafuerte Jair Alfredo<br>Sr. Allauca González David Moisés |
| **Tutor del Proyecto:** | Ing. Corrales Bonilla Johnatan Israel, MSc |
| **Área de conocimiento:** | Automatización e inteligencia artificial aplicada a sistemas electromecánicos. |
| **Línea de investigación:** | Tecnología industrial gestión de la producción, riesgos y seguridad laboral. |

## 2 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las industria en donde realizan la elaboración y construcción mecánica en donde se necesita una alta precisión. Gracias a la automatización este proceso ha evolucionado y nos a optimizado mucho tiempo de trabajo. La tecnología por control numérico computacional (CNC) integrada con el corte por láser de CO2, se han convertido en una herramienta de corte bastante importante al nivel nacional como internacional. Esta combinación nos permite realizar cortes de manera precisa muchos más rápida, reduciendo desperdicio de material lo que nos dará una mayor producción en menos tiempo.

Sin embargo, este tipo de maquina como la cortadora laser CNC no solo se necesita de saber encenderla, cargarle un diseño y ejecutar un trabajo; se necesita tener una buena adecuación termomecánica que garantice el correcto funcionamiento. Esto incluye tener una buena refrigeración por agua para el tubo de CO2, una buena asistencia neumática mediante un compresor y un extractor de gases funcional ya que el área de trabajo opera con una compuerta cerrada y necesita evacuar el humo generado durante el proceso. Además, para tener un buen resultado se necesita saber configurar la velocidad de corte

y la potencia de acuerdo con el espesor y el tipo de material para que así el corte salga lo más limpio posible sin dejar zonas afectadas por el calor.

Actualmente en el laboratorio de ingeniería electromecánica no existe este tipo de tecnología que nos permita realizar trabajo de corte laser, lo que limita la ejecución de procesos de cortes avanzados. Para dar solución a esta necesidad, se implementará una cortadora laser de CO2. El mecanismo de movimiento de los ejes con control automático, que permitirá realizar los cortes mediante el código generado desde entorno CAD/CAM como SolidWorks, AutoCAD o inventor (Autodesk), que son software que la Universidad tiene licencias o con licencias estudiantiles. Así mismo, para que el funcionamiento de la máquina sea segura y operativa, se instalara su respectivo compresor, extractores de humo y sistema de refrigeración y además de se ejecutara diferentes pruebas de cortes experimentales. Con estas pruebas controladas obtendremos como resultado una matriz de los parámetros de optimizados de velocidad y potencia, garantizando el correcto funcionamiento, eficiencia y precisión de la máquina.

## 3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en el laboratorio de la carrera de electromecánica no cuenta con este tipo de tecnología CNC que permiten ejecutar mecanizado térmico de alta precisión y velocidad en materiales como MDF, acrílico, tela, cuero, balsa, polietileno, cartón, cartulina, vinil o vinil adhesivo. La implementación de una cortadora laser de CO2 introduce con una tecnología de corte térmico automatizado que nos permitirá realizar trabajos complejos. Además, al integrar este equipo con una para mecanizado automático, estableciendo una integración directa con el entorno de diseño CAD/CAM.

Para la correcta operatividad de la cortadora laser y la seguridad del área de trabajo, es obligatorio la adecuación termomecánica. Dado que esta máquina opera con un tubo de CO2, sin estas condiciones puede degradar severamente el equipo. Por ello, se ejecutará la correcta implementación del sistema de refrigeración por agua, asistencia neumática mediante un compresor y la extracción de gases. Todo esto es indispensable para disipar la carga térmica del tubo CO2, prevenir el deterioro de los componentes del equipo y mantener un entorno seguro el área de trabajo.

Finalmente, la ejecución de pruebas experimentales con la maquina será de mucha importancia para calibrar el equipo de acuerdo con el espesor y el tipo de material. A través de estas pruebas, se determinará con exactitud que velocidad y potencia aplicar para cada proceso, obteniendo una tabla de calibración o matriz técnica de parámetro. Con el uso de esta matriz tendríamos un mejor uso y así evitar que a la hora de realizar un corte no haya desperdicio de material, los acabados defectuosos y los daños severos en la zona afectada por el calor. De este modo, se logrará que el hardware recién instalado opere con un sistema altamente preciso, eficiente y completamente calibrado.

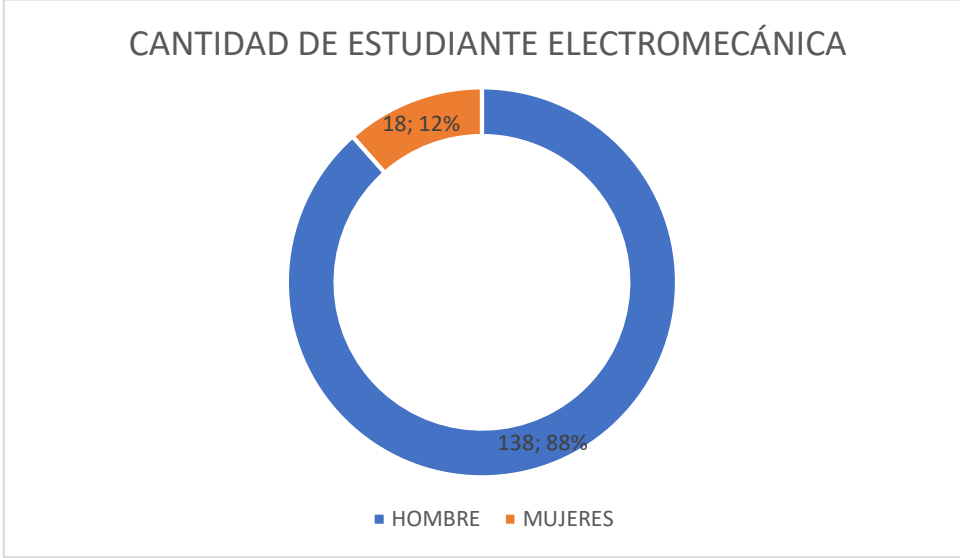
# 4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

## 4.1 Beneficiarios directos

El grupo principal beneficiado está conformado directamente por la comunidad estudiantil y el personal docente de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná. De acuerdo con los registros institucionales de matriculación, la carrera cuenta con una población directa de 156 estudiantes (138 hombres y 18 mujeres) en esta sede específica. Al contar con este equipo CNC totalmente operativo en su propio laboratorio, estos estudiantes podrán materializar sus diseños vectoriales CAD/CAM de forma inmediata. Esto les permitirá fabricar piezas, ensambles y prototipos para sus proyectos sin la necesidad de tercerizar servicios de corte en talleres externos.

Por su parte, los docentes a cargo del laboratorio se benefician al tener a su disposición una herramienta tecnológica moderna. La máquina servirá como un banco de pruebas real para impartir clases prácticas sobre el funcionamiento de motores paso a paso, interpretación de Código G y principios termodinámicos.

**Figura 1.** Distribución de beneficiarios directos (Ingeniería Electromecánica).

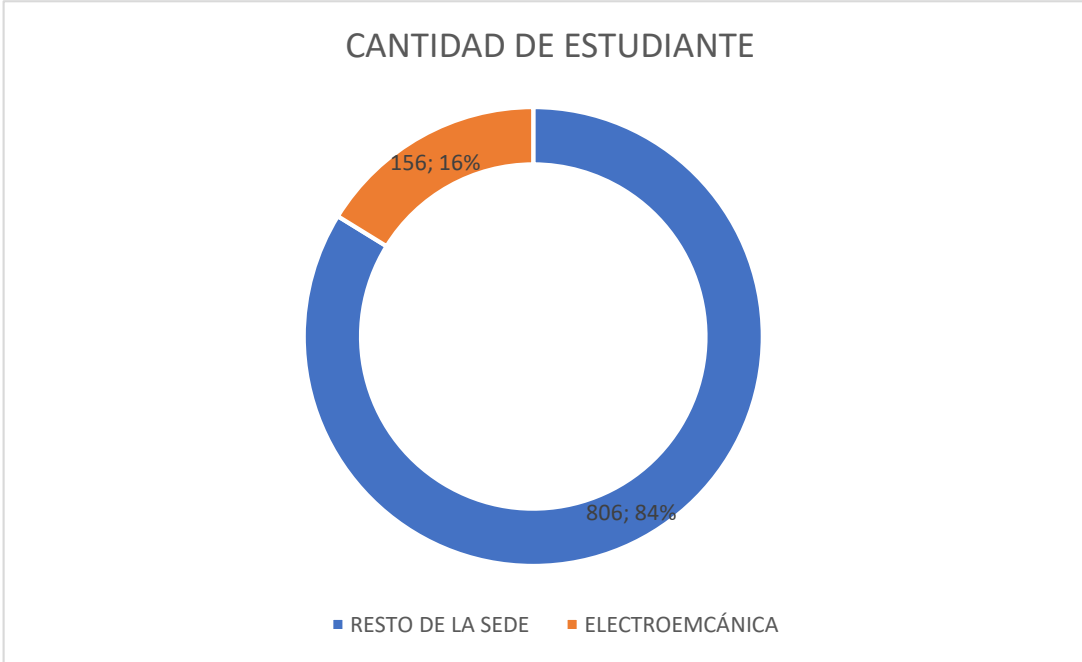



**Fuente:** Los autores.

## 4.2 Beneficiarios indirectos

A nivel institucional, la Extensión La Maná en general, que alberga una población total de 962 estudiantes matriculados, se beneficia de manera indirecta. La implementación de esta cortadora láser moderniza la infraestructura física de la extensión. Contar con maquinaria de manufactura avanzada eleva el nivel técnico de los laboratorios, lo cual suma parámetros positivos para el prestigio y los procesos de acreditación académica de la sede universitaria.

**Figura 2.** Proporción de beneficiarios indirectos (Extensión La Maná).




**Fuente:** Los autores.

# 5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 5.1 Problemática

En la actualidad, la manufactura mecánica y la industria 4.0 exigen procesos de corte rápido, con alta precisión y mínimo desperdicio. La tecnologías convencionales o manuales ya no son suficiente, por lo que el uso de sistema de CNC y corte térmico(laser) se han vuelto un estándar obligatorio. La capacidad de a partir de un modelo computacional vectorial generados en entornos de CAD/CAM a una pieza física. Donde requiere, de manera obligatoria, el uso de sistema control numérico computacional (CNC).

En el laboratorio de la carrera electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná existe un vacío tecnológico en esta área, actualmente no se cuenta con un equipo de corte térmico automatizado. Esto limita la capacidad de materializar diseños CAD/CAM y frena la ejecución de procesos de mecanizado avanzados.

La implementación desde cero de una cortadora de laser CO2 se tiene que tener en cuenta algunos parámetros de manera estricta ya que este tipo de tecnología no puede

operar de una sola forma. A demás, se necesita de una rigurosa adecuación termomecánica que involucra lo que sistema de refrigeración por agua para el tubo de CO2, la asistencia neumática del compresor y la extracción de gases. Por otro lado, la maquina sin una calibración exacta provoca cortes defectuosos, alta afectación en la zona afectada por el corten y también desperdicio de material.

### 5.2 Planteamiento del problema

¿De qué manera la implementación termomecánica y la determinación de parámetros óptimos mediante pruebas experimentales garantizaran la operatividad, seguridad y precisión de una cortadora laser CNC de CO2 en el laboratorio de electromecánica?

## 6 OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo general

Implementar una cortadora láser por control numérico computacional para el laboratorio de electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná

### 6.2 Objetivos específicos

- Evaluar el dimensionamiento termomecánico y los sistemas periféricos del equipo láser (sistema de refrigeración por bomba de agua, asistencia neumática por compresor y extracción de gases), garantizando su correcto acoplamiento operativo y seguridad en el laboratorio.
- Caracterizar el comportamiento cinemático y de control de la máquina, analizando la resolución de movimiento de los ejes y su compatibilidad con software de diseño CAD/CAM aplicados a la construcción mecánica.

- Desarrollar la matriz de optimización paramétrica del proceso de corte térmico para materiales típicos de ingeniería (MDF, acrílico, polietileno), correlacionando el espesor (0-5 mm), la velocidad y el ciclo de trabajo de la potencia (42W-52W) con el acabado superficial y la precisión dimensional.

## 7 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS DE RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

**Tabla 1.** Actividades y sistemas de tareas en relación a los objetivos.

| Objetivo | Actividad | Resultado | Metodología |
|---|---|---|---|
| Implementar una cortadora láser por control numérico computacional para el laboratorio de electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná. | Ejecución integral del proyecto, abarcando la instalación física de periféricos, sintonización del control numérico y validación de cortes. | Cortadora láser CNC 100% instalada, calibrada y operativa para la ejecución de procesos de construcción mecánica. | Ingeniería aplicada y método científico (experimental). |
| Evaluar el dimensionamiento termomecánico y los sistemas periféricos del equipo láser (sistema de refrigeración por bomba de agua, asistencia neumática por compresor y extracción de gases), garantizando su correcto acoplamiento operativo y seguridad en el laboratorio. | Instalación y acoplamiento técnico del sistema de refrigeración de lazo cerrado, inyección de aire a presión y ductos de extracción centrífuga. | Entorno de manufactura seguro y equipo termomecánico 100% operativo sin riesgo de estrés térmico ni toxicidad. | Implementación técnica e ingeniería física aplicada. |
| Caracterizar el comportamiento cinemático y de control de la máquina, analizando la resolución de movimiento de los ejes y su compatibilidad con software de diseño CAD/CAM | Sintonización del controlador Ruida, calibración del desplazamiento de los ejes espaciales y verificación de | Hardware CNC sincronizado, sin holguras mecánicas y procesando correctamente el Código G generado por el software. | Caracterización cinemática y análisis de control numérico. |

| Objetivo | Actividad | Resultado | Metodología |
|---|---|---|---|
| aplicados a la construcción mecánica. | comunicación con el ordenador. | | |
| Desarrollar la matriz de optimización paramétrica del proceso de corte térmico para materiales típicos de ingeniería (MDF, acrílico, polietileno), correlacionando el espesor (0-5 mm), la velocidad y el ciclo de trabajo de la potencia (42W-52W) con el acabado superficial y la precisión dimensional. | Ejecución de cortes controlados y grabados variando la velocidad de avance, el espesor de la probeta y la potencia de excitación láser. | Matriz técnica validada con los parámetros óptimos para acabados de alta precisión y control de la Zona Afectada por el Calor (ZAC). | Diseño de experimentos (DOE) y pruebas empíricas controladas. |

**Fuente:** *Los autores.*

# 8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

## 8.1 Tecnología de Corte Térmico por Láser CO2

### 8.1.1 Principios físicos del emisor de Dióxido de Carbono

Los equipos de corte que utilizan láser de dióxido de carbono CO2 funcionan gracias a un gas activo, formado por la combinación exacta de dióxido de carbono, helio y nitrógeno. Dentro de esta mezcla termodinámica, el nitrógeno se encarga de estimular el haz luminoso, y el CO2 es el elemento que emite la radiación infrarroja invisible que hace posible el corte. Además, el helio sirve para estabilizar la temperatura del sistema y ayuda a que el CO2 recupere su nivel de energía normal tras la emisión. En el sector industrial, la fuerza concentrada de este rayo hace posible perforar y procesar distintos materiales de manera extremadamente rápida, volviéndose una herramienta indispensable para la manufactura térmica [1].

### 8.1.2 Óptica y propagación del haz térmico

Una vez que el haz de luz infrarroja es emitido por el tubo láser de CO2, este carece de la concentración transversal necesaria para ejecutar un corte efectivo o preciso. Por lo tanto, se emplea un tren óptico compuesto por un sistema de espejos reflectores que ayudan a guiar la trayectoria del haz a lo largo de la cinemática de la máquina. Al llegar al cabezal de corte, una lente focal se encarga de concentrar toda la energía irradiada en un punto de diámetro micrométrico. Este punto de convergencia es crítico, ya que aumenta la densidad de potencia térmica, permitiendo que la energía focalizada funda o sublime el material de trabajo al instante, eliminando la necesidad de contacto físico o fricción mecánica [2].

## 8.2 Interacción térmica láser-material

El mecanizado térmico por láser presenta grandes beneficios operativos si se lo compara con los métodos tradicionales de arranque de viruta. Su funcionamiento se basa en aplicar una carga de calor inmensa en un punto sumamente pequeño del material, logrando que este se evapore de forma limpia sin dañar la estructura de los bordes. Como la herramienta de corte es únicamente un rayo de luz focalizado, no existe contacto físico ni fricción mecánica, lo que elimina las vibraciones de la máquina y hace innecesario el uso de prensas para sujetar la pieza de trabajo. Varios estudios confirman que este proceso es el ideal para transformar elementos no metálicos, destacándose su uso en maderas procesadas y polímeros, siempre que se calibren adecuadamente las variables de la máquina [3].

## 8.3 Máquinas de corte por láser: láser de CO2 y mecanizado

En la industria manufacturera actual, el corte por láser se ha consolidado como uno de los métodos de mecanizado más eficientes para realizar procesos con una amplia diversidad de materiales. Su implementación resulta importante para dotar a los equipos de control numérico de una alta precisión y una amplia libertad de movimiento durante la ejecución de complejas trayectorias [4].

### 8.3.1 Tipos de máquinas CNC

Mediante el uso de sistemas de control numérico computarizado (CNC) es posible desarrollar diferentes tipos de máquinas destinadas a realizar diversas aplicaciones en la industria. Estas máquinas permiten automatizar los movimientos de las herramientas y ejecutar procesos de fabricación de acuerdo con las instrucciones previamente programadas [5].

Entre los principales tipos de máquinas CNC se encuentran [5]:

- Fresadora.
- Cortadora por láser.
- Torno.
- Punzonadora.
- Impresora 3D.
- Taladradora.
- Dobladora.

### 8.3.2 Ventajas

El uso de sistemas de Control Numérico Computarizado (CNC) ofrece diferentes ventajas en comparación con las máquinas convencionales, principalmente debido a la automatización y precisión con la que se realizan los procesos de fabricación. Entre las principales ventajas se pueden mencionar [5]:

- Mayor precisión y repetibilidad: permite obtener piezas con medidas más exactas y repetir un mismo proceso manteniendo características similares en cada pieza fabricada.
- Uniformidad en los productos: el movimiento y posicionamiento automático de los componentes permite mantener condiciones similares durante cada proceso, mejorando la uniformidad de las piezas.

- Reducción de la intervención del operador: un solo operador puede supervisar el funcionamiento de varias máquinas CNC al mismo tiempo, dependiendo del tipo de proceso.
- Mayor flexibilidad: estas máquinas permiten realizar diseños y geometrías que serían difíciles de fabricar manualmente. Además, los programas utilizados pueden almacenarse para repetir posteriormente el mismo proceso.
- Mayor velocidad de producción: la automatización de los movimientos permite realizar determinadas operaciones en menor tiempo, aumentando la productividad.
- Mayor seguridad: algunas tareas que pueden representar un riesgo para el operador son realizadas directamente por la máquina, reduciendo su exposición a determinadas condiciones peligrosas.
- Simulación del proceso: algunos sistemas permiten simular previamente el trabajo que se va a realizar. Esto ayuda a detectar posibles errores antes de ejecutar el proceso y permite observar de manera aproximada el resultado final.

### 8.3.3 Inconvenientes

A pesar de las ventajas que ofrecen los sistemas CNC, también presentan algunas limitaciones que deben ser consideradas antes de su implementación. Entre las principales se encuentran [5]:

- Costo de adquisición y mantenimiento: los componentes, equipos y sistemas utilizados pueden representar una inversión considerable, además de requerir gastos de mantenimiento para conservar la máquina en buenas condiciones.
- Necesidad de una programación adecuada: para obtener buenos resultados es necesario realizar correctamente la programación de la máquina y configurar de manera apropiada sus diferentes parámetros de funcionamiento.
- Tiempo de recuperación de la inversión: debido al costo inicial de los equipos y componentes, puede ser necesario un periodo considerable de utilización para recuperar la inversión realizada.
- Necesidad de personal capacitado: el operador debe contar con conocimientos básicos sobre programación, funcionamiento y mantenimiento de la máquina para utilizarla correctamente y evitar errores durante el proceso.

Cada una de estas máquinas está diseñada para realizar diferentes procesos de fabricación. Por ejemplo, las fresadoras permiten realizar operaciones de mecanizado mediante herramientas de corte, mientras que los tornos trabajan principalmente mediante el movimiento de rotación de la pieza. De igual manera, las impresoras 3D permiten fabricar objetos mediante la incorporación progresiva de material y las cortadoras láser utilizan un haz de alta energía para realizar cortes sobre determinados materiales [5].

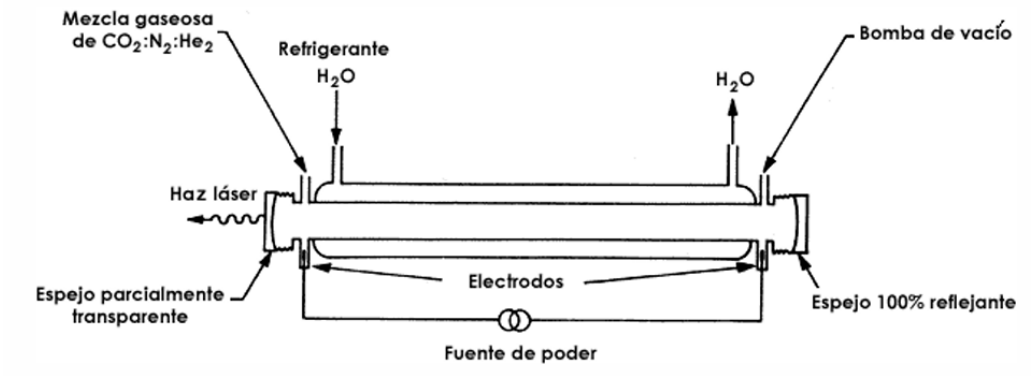
Además de las diferentes aplicaciones que pueden realizarse mediante las máquinas CNC, estos sistemas también permiten mejorar los procesos de producción. La programación y automatización de los movimientos facilita la realización de trabajos que pueden resultar complejos o repetitivos cuando se ejecutan manualmente. Asimismo, el uso de estas máquinas puede contribuir a mejorar la precisión de las operaciones y disminuir posibles riesgos para los operadores, especialmente cuando se trabaja con procesos que requieren movimientos continuos o herramientas de corte [5].

En el ámbito educativo, las máquinas CNC también representan una herramienta importante, ya que permiten que los estudiantes conozcan y practiquen diferentes procesos de fabricación automatizada, relacionando los conocimientos teóricos con aplicaciones prácticas [5].

### 8.3.4 Láser de CO2

Este principio físico se basa en la generación de un haz luminoso altamente concentrado, unidireccional y monocromático que permite realizar diversas configuraciones operativas según el requerimiento industrial. La tecnología láser de CO2 opera mediante la interacción de tres subsistemas termodinámicos y ópticos principales [4]:

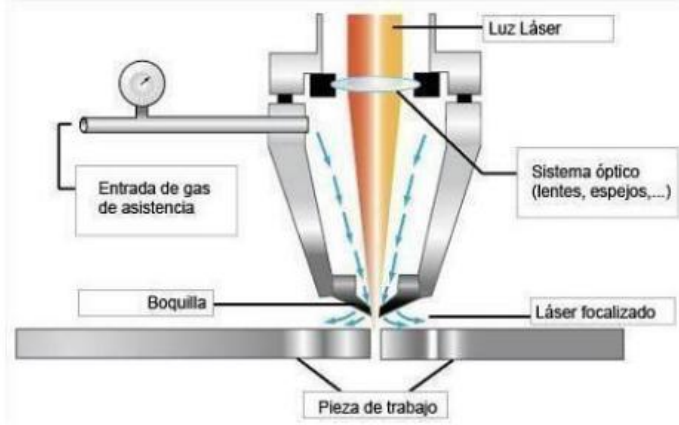
**Figura 3.** Laser




**Fuente:** [6]

- **Medio activo:** Es el componente fundamental responsable de amplificar la luz. En estas máquinas, el medio es una mezcla gaseosa que se compone volumétricamente por un 80% de helio (He), un 10% de nitrógeno (N2) y un 10% de dióxido de carbono (CO2). El CO2 es el elemento que emite la radiación luminosa, el nitrógeno actúa como catalizador para facilitar la excitación, y el helio estabiliza la descarga eléctrica disipando el exceso de calor, lo que permite que las moléculas liberen nuevos fotones con mayor facilidad [4].
- **Sistema de excitación:** Es el mecanismo encargado de elevar el nivel energético del medio activo gaseoso mediante descargas eléctricas continuas o señales de radiofrecuencia [4].
- **Mecanismo de retroalimentación:** Permite confinar y direccionar la radiación generada en el interior del tubo. Se compone de un tren óptico con espejos enfrentados en el centro del eje longitudinal; uno de ellos es totalmente reflectante para alinear el rayo con precisión, mientras que el otro es parcialmente transparente, permitiendo que la energía focalizada salga del sistema en forma de un haz de corte unidireccional [4].

**figura 4.** Funcionamiento de del corte por láser.




**Fuente:** [4]

### 8.3.5 Corte por Láser

El maquinado con corte laser es una maquina que nos da la facilidad de realizar trabajo de cortes y grabaciones en materiales de espesores delgados como MDF, acrilico, cartón, y en aluminio en máquina de bastante potencia. Esta técnica se caracteriza porque usa equipos que trabajan con un haz de luz enfocándolo en un solo punto con bastante potencia, los cuales realizan un trabajo específico ya sea corte o grabado sobre una zona determinada del material. El trabajo con la maquina laser en lo que es corte es una de las mas usada en la actualidad, este consiste en dirigir el haz de láser hacia un punto exacto del material que se quiere trabajar, con el fin de que este se derrita y se evapore, logrando así el corte [7].

Este tipo de maquinado con luz láser tiene la particularidad de no generar viruta, además de ser muy preciso, por lo que se utiliza para realizar piezas con detalles complicadas y de dimensiones pequeñas. Al usar este proceso se obtiene la ventaja de poder trabajar materiales muy duros, como hierros o aleaciones resistentes al calor, gracias a la potencia del haz láser. Otro punto importante es que la herramienta de corte no se desgasta, algo que sí ocurre con otros métodos de corte tradicionales [7].

Casi todos los materiales pueden cortarse con una maquina laser, sin embargo, existen algunos tipos de materiales no es posible trabajarse con cualquier láser debido a razones importantes de seguridad [7].

En el sector de la madera, en este tipo de tecnología se emplean con el fin de poder ejecutar trabajo ya sea de tipo corte o de marcado y grabado en distintos materiales con espesores de 0.5 mm, obteniendo resultados bastante efectivos que en muchos casos pueden sustituir a máquinarias tradicionales. Aunque estas últimas también permiten lograr formas y trabajos complejos con buenos acabados, requieren más tiempo de producción en comparación con las máquinas láser [7].

***F*igura 5.** Corte por láser aleaciones.



**Fuente:** [7]

El corte láser es un proceso de mecanizado que emplea un haz de luz altamente concentrado para generar un incremento significativo de temperatura sobre una zona específica del material. La energía del láser se concentra en un punto determinado hasta provocar la fusión o vaporización del material, permitiendo de esta manera realizar el corte de forma precisa y controlada [8].

Una de las principales ventajas de esta tecnología es su capacidad para trabajar con una amplia variedad de materiales y diferentes espesores. Además, el proceso permite obtener piezas con un elevado nivel de precisión y calidad superficial, reduciendo considerablemente la necesidad de realizar operaciones posteriores de acabado. Por esta razón, las piezas obtenidas mediante corte láser pueden ser utilizadas directamente en procesos posteriores de ensamblaje o fabricación [8].

Dentro del sector industrial, el corte constituye una de las aplicaciones más importantes de la tecnología láser para el procesamiento de materiales. Una parte considerable de las aplicaciones industriales de estos sistemas está destinada a operaciones de corte,

especialmente en sectores como la industria automotriz y las actividades relacionadas con la fabricación de componentes para este sector [8].

El funcionamiento del proceso se basa en la concentración del haz láser sobre la superficie de la pieza. Al alcanzar una elevada densidad de energía, el material experimenta un aumento considerable de temperatura, provocando su fusión o, dependiendo de las condiciones del proceso, su vaporización. Una vez que el haz atraviesa completamente el material, puede efectuarse el desplazamiento del láser siguiendo el contorno establecido para la pieza [8].

Durante este desplazamiento, el haz continúa aportando energía de manera localizada, permitiendo fundir o vaporizar progresivamente el material a lo largo de la trayectoria de corte. Como resultado, se obtiene una ranura de dimensiones reducidas, cuyo ancho depende principalmente del diámetro y del enfoque del haz láser. Esta característica permite realizar cortes con elevada precisión y aprovechar eficientemente el material procesado [8].

**Figura 6.** Fases del proceso de corte láser




**Fuente:** [8]

### 8.3.1 Óptica del láser

El sistema óptico de una máquina láser de $CO_2$ tiene como función principal dirigir y concentrar el haz láser hasta el punto donde se efectuará el proceso de corte. Esta etapa es necesaria debido a las dimensiones y características del tubo láser, ya que resulta poco práctico trasladar directamente el tubo hasta la zona de trabajo. Por esta razón, el haz generado es conducido mediante un conjunto de elementos ópticos hasta alcanzar el cabezal de corte [8].

El haz emitido por el tubo láser presenta un diámetro aproximado de 6,3 mm. Para conducirlo hacia el área de trabajo, se emplean espejos ubicados estratégicamente, generalmente con una disposición que permite modificar la dirección del haz. De esta

manera, el rayo puede ser transportado desde el tubo hasta el cabezal de corte sin necesidad de desplazar la fuente láser. Posteriormente, el haz atraviesa una lente focal que permite reducir su diámetro y concentrar la energía en un punto de menor tamaño, favoreciendo la obtención de cortes más precisos [8].

### 8.3.2 Espejos

Los espejos utilizados en los sistemas láser de $CO_2$ están diseñados específicamente para reflejar el haz con la menor pérdida de energía posible. Ningún elemento reflectante consigue una reflexión absolutamente completa, por lo que una pequeña parte de la radiación puede ser absorbida por la superficie del espejo. Debido a la elevada potencia que puede alcanzar un láser de $CO_2$, estos componentes requieren recubrimientos adecuados que permitan soportar la energía térmica generada durante su funcionamiento [8].

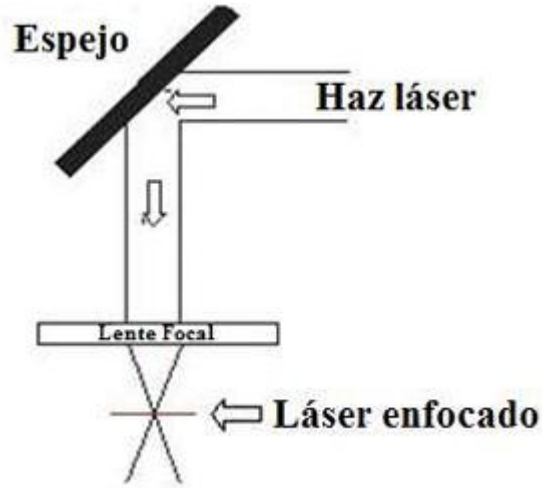
En este tipo de sistemas se utilizan espejos con recubrimientos metálicos, entre ellos el oro, debido a sus propiedades de reflectividad para la longitud de onda característica de los láseres de $CO_2$. El documento de referencia señala el empleo de espejos de aproximadamente 25 mm de diámetro [8].

### 8.3.3 Lente focal

La lente focal es un elemento fundamental dentro del sistema óptico, debido a que permite concentrar el haz láser en un punto de menor diámetro. Generalmente, se emplea una lente de tipo plano-convexa, cuya geometría permite enfocar la radiación sobre la superficie del material [8].

Al concentrar el haz en un área reducida, se incrementa considerablemente la densidad de energía en el punto focal. Esto permite alcanzar la temperatura necesaria para fundir o vaporizar el material y, por consiguiente, realizar el proceso de corte con mayor precisión. En el documento de referencia se indica el uso de una lente focal con una distancia focal de 5 cm [8].

**Figura 7.** Enfoque del haz láser.




**Fuente:** [8]

### 8.3.4 Punto cero de la máquina

Es un punto específico que el fabricante de la máquina define previamente en cada eje, y que sirve para establecer el origen absoluto desde el cual se toman las mediciones. Este punto puede señalarse de distintas formas, ya sea mediante detectores de proximidad o finales de carrera. Sin embargo, trabajar directamente con este origen de medida puede resultar poco práctico, debido a que su ubicación ya viene fijada de fábrica y no puede modificarse. Por esta razón, se establecen otros dos tipos de origen que facilitan el trabajo: el origen pieza y el origen programa [9].

### 8.3.5 Ventajas de hacer corte por laser

El corte con láser es una técnica que sirve para dividir todo tipo de materiales, sean metálicos o no y de distintos grosores. Funciona al apuntar y concentrar un haz de luz con alta precisión sobre un punto exacto del objeto para elevar su temperatura [7].

Cuando en ese punto se acumula más calor del que el material puede disipar por conducción, el rayo láser puede llegar a atravesarlo por completo.entonces este proceso es lo que lo hace distintos a otros tipo de maquina que realizan cortes pero en donde re aplican fuerzas al material para poder cortarse. En cambio, el láser realiza su trabajo sin

tocar el material, por lo que le da un mejor acabado en el corte sin tener que estar maniobrando el material y asi mantener el material intacto y sin deformidades [7].

Los punto mas importante a la hora de realizar un corte con maquina laser de encuentran las siguiente factores [7]:

- **Alta precisión**: Nos permite realizar procesos en donde se necesitan mucha precisión en lo que son figuras donde hay curvas o corte muy cerrados, siendo ideal para cortes previos o para eliminar material sobrante [7].
- **Versatilidad**: pues puede emplearse en distintos tipos de materiales, lo que permite construir piezas de diferentes formas [7].
- **Eficiencia**: ya que al maquinar con láser no es necesario hacer procesos posteriores como sellado o lijado de la pieza, lo que ahorra tiempo [7].

El rayo láser calienta el material solo en la zona donde se enfoca, el rayo laser no afecta a las zonas mas alejadas de mi material sin sufrir zonas de quemadura por mi láser. Por eso, el ancho del corte es apenas un poco mayor al del rayo, permitiendo cortar contornos complejos y limpios, lo cual evita en la mayoría de los casos un acabado adicional costoso. Debido a esta flexibilidad, el corte láser se usa mucho cuando se trabaja con lotes pequeños, cuando hay muchas variantes de piezas o para crear prototipos [7].

Los láseres de pulsos ultracortos evaporan casi cualquier material tan rápido que casi no se nota efecto térmico, lo que permite obtener bordes de corte de buena calidad sin generar residuos fundidos. Por esta razón, son ideales para fabricar piezas metálicas muy detalladas [7].

### 8.3.6 Grabado láser

El grabado láser destaca por su capacidad de retirar capas del material mediante calor extremo, esta tecnología vaporiza la superficie de forma instantánea al enfocar un haz de luz de alta temperatura, siendo su principal uso el de personalizar materiales con imágenes o trazos. Esto ocurre porque el haz de luz láser genera una temperatura tan alta que logra vaporizar el material, formando así los orificios que dan lugar a la figura final. Este proceso puede aplicarse en diferente tipos

**Figura 8.** Grabado por láser.

de materiales. En menos tiempo y siento mas efectivo que los métodos de grabado tradicionales, y disminuye el riesgo de dañar la pieza que se está trabajando [7].



**Fuente:** [7]

### 8.3.7 Mecanizado por láser

Al alterar la configuración paramétrica del controlador electromecánico, la máquina puede realizar distintos trabajos sobre la pieza física, logrando acabados finos de corte pasante, grabado superficial o marcado continuo. La calidad y la precisión de estos acabados dependen exclusivamente de la calibración de cinco variables de operación:

**Figura 9.** Diferencia de acabado.




**Fuente:** [4]

1. **Tamaño del punto focal:** Mediante el cambio de la longitud focal de las lentes (cuyos diámetros de convergencia suelen variar entre 0,1 mm y 0,4 mm), se ajusta la densidad de la energía térmica irradiada; reducir este punto disminuye significativamente el ancho de la ranura de corte y minimiza la zona afectada por el calor en el material [4].

2. **Potencia:** Un incremento en la potencia eléctrica de excitación acelera la velocidad de corte y permite alcanzar una mayor profundidad de penetración, pero a su vez expande el tamaño del punto focal, lo que exige un control riguroso para evitar quemaduras excesivas en los bordes mecanizados [4].
3. **Velocidad de desplazamiento:** Determina el tiempo de exposición térmica del sustrato. Una velocidad cinemática excesiva impide que el láser concentre la energía necesaria para perforar completamente la pieza, mientras que un avance demasiado lento genera sobrecalentamiento focalizado y deteriora el acabado estético del producto [4].
4. **Espesor de la pieza:** El grosor máximo que la máquina puede atravesar está limitado por las pérdidas térmicas intrínsecas del material trabajado, requiriendo generalmente una reducción proporcional de la velocidad de avance para compensar los espesores elevados [4].
5. **Características del material:** Las propiedades ópticas y de transferencia de calor del sustrato dictan la viabilidad del mecanizado. Los materiales que presentan altos puntos de fusión o elevados índices de refracción exigen potencias de operación más altas, del mismo modo que las variaciones en la rugosidad superficial pueden interferir en la absorción uniforme de la energía térmica generada por el láser [4].

## 8.4 Propiedades del material

### 8.4.1 Propiedades térmicas

La viabilidad y dificultad del proceso de corte están estrechamente ligadas a las propiedades inherentes del sustrato, tales como su reflectividad óptica, su punto de fusión y su conductividad térmica. Estas características explican por qué el mecanizado de ciertos materiales resulta considerablemente más complejo que el de otros materiales [10].

### 8.4.2 Densidad

Constituye una propiedad física fundamental de la materia (sólida, líquida o gaseosa) que define la relación de masa contenida en un volumen determinado. Se calcula matemáticamente mediante la siguiente ecuación [10]:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

*( 1 )*

Donde:

- $\rho$ = Densidad en Kg/$m^3$
- $v = Volumen\ en\ m^3$
- $m = Masa\ en\ kg$

### 8.4.3 Difusividad térmica

Esta característica mide qué tan rápido viaja el calor por dentro de un objeto mientras se va calentando. En concreto, expresa la relación matemática entre la capacidad de un material para conducir energía y su habilidad para retener calor en su estructura. Una difusividad alta indica una rápida distribución térmica, mientras que un valor bajo sugiere que el material retiene la mayor parte de la energía térmica absorbida. Su modelo matemático es [10]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho . Cp}$$

*( 2 )*

Donde:

- $\alpha = Difusividad\ térmica\ en \frac{m^2}{s}$
- $k = Conductividad\ Térmica\ en \frac{W}{m.°C}$
- $\rho = Densidad\ en \frac{Kg}{m^3}$

### 8.4.4 Temperatura superficial

Es el valor térmico presente en la capa exterior del material. Durante el mecanizado térmico de compuestos, esta temperatura se evalúa utilizando la siguiente relación [10]:

$$T(x,t) - Ti = \frac{es}{k.\sqrt{\frac{\pi . t_p}{\alpha}}}$$

*( 3 )*

Donde:

- $es = Pulso\ de\ energía\ en \frac{J}{m^2}$
- $t_p = Tiempo\ de\ pulso\ en\ s$
- $\alpha = Difusividad\ térmica\ en \frac{m^2}{s}$
- $T(x,t) = Temperatura\ final\ en\ °C$
- $Ti = Temperatura\ inicial\ en\ °C$

### 8.4.5 Impacto térmico en la cara exterior

La aplicación de energía instantánea mediante pulsos láser genera un pico de calentamiento inmediato en la superficie del material. Esta temperatura decrece progresivamente a medida que la energía térmica penetra las capas internas del sustrato. Este fenómeno, que ocurre en fracciones de segundo, se determina mediante la expresión [10]:

$$T(x,t) \ - Ti = \frac{es}{k.\sqrt{\frac{\pi.t}{\alpha}}} \exp\left(-\left(\frac{{x^2}_a}{4\alpha t}\right)\right) \quad (4)$$

Donde:

- $X_a = Espesor\ del\ material\ en\ m$
- $t =$ $Tiempo\ en\ s\ (el\ resto\ de\ variable\ mantienen\ la\ nomenclatura\ anterior$ )

## 8.5 Parámetros del proceso

### 8.5.1 Velocidad del corte

Esta cinemática es inversamente proporcional al grosor de la pieza de trabajo; es decir, la velocidad de avance de la máquina debe reducirse frente a espesores mayores y aumentarse ante espesores menores [10].

### 8.5.2 Gas auxiliar

La inyección de un gas de asistencia es vital en este mecanizado por cuatro motivos mecánicos y térmicos: expulsa el sustrato fundido de la ranura, resguarda el lente óptico contra salpicaduras, refrigera las zonas adyacentes al corte y, dependiendo del gas, genera una reacción exotérmica que aporta energía térmica suplementaria [10].

### 8.5.3 Calidad del corte

Es el indicador decisivo para validar el éxito del mecanizado, afectando directamente el rendimiento y viabilidad comercial de la pieza final. Para asegurar un corte de primer nivel, es imperativa una rigurosa selección de los parámetros del proceso y de los equipos a utilizar [10].

### 8.5.4 Rugosidad superficial

Incluso bajo procesos altamente controlados, toda superficie mecanizada presentará siempre irregularidades microscópicas. El nivel de rugosidad final resultante dependerá intrínsecamente del método de fabricación empleado y de la naturaleza del material [10].

## 8.5.1 Manufactura sustractiva mediante corte por láser (Potencia, velocidad y espesor)

En el proceso de corte por láser existe una relación directa entre la potencia del láser, la velocidad de corte y el espesor del material. A medida que aumenta la potencia disponible, es posible trabajar con materiales de mayor espesor y, al mismo tiempo, utilizar velocidades de corte más elevadas. Por lo tanto, estos parámetros deben ser considerados de manera conjunta para obtener un corte adecuado [11].

En los diferentes proyectos e investigaciones analizados se pueden encontrar máquinas que utilizan láseres con distintas potencias, desde equipos destinados a aplicaciones didácticas hasta sistemas de uso industrial que cuentan con haces de mayor potencia. Sin embargo, para el desarrollo de este proyecto no es necesario utilizar un sistema industrial de alta potencia, debido a que el objetivo principal es disponer de una herramienta que permita a los estudiantes desarrollar y practicar conocimientos relacionados con el funcionamiento y uso de esta tecnología [11].

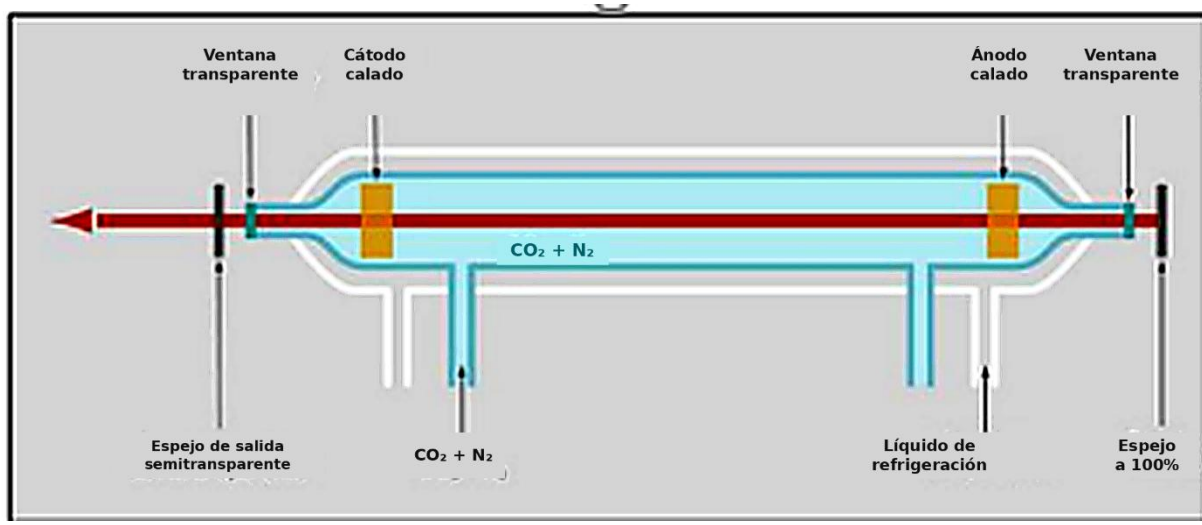
A partir de la comparación de las diferentes máquinas analizadas en el estado del arte, se determinó que una potencia de 40 W es una alternativa adecuada para aplicaciones con fines didácticos. Por esta razón, se seleccionó esta potencia para el desarrollo del proyecto, considerando las necesidades de aprendizaje y las características de los materiales que se pretende trabajar [11].

## 8.6 Adecuaciones termomecánico y sistemas periféricos

### 8.6.1 Transferencia de calor y sistemas de refrigeración

Para mantener la estabilidad termodinámica de los emisores láser de CO2 durante las jornadas de operación continua, es obligatorio implementar un sistema de enfriamiento de circuito cerrado. De acuerdo con los parámetros técnicos de fabricación, la ampolla de vidrio del láser requiere un flujo constante de agua refrigerada para mantener una temperatura de trabajo óptima que oscila entre **15°C** y **25°C** [4].

**Figura 10.**Esquema de los elementos internos de un tubo de gas CO2.




**Fuente:** [12]

El sistema utiliza una bomba de agua (comúnmente integrada en un equipo Chiller) que empuja el fluido a través de la camisa térmica que recubre el tubo láser. Esta circulación de agua absorbe el intenso calor residual generado por la excitación eléctrica del gas en el interior. Si este calor no se disipa de manera continua y controlada, la acumulación de energía provocará un choque o estrés térmico que resultará en la fractura inmediata del tubo de vidrio. Para prevenir esto, se integran sensores de temperatura (como el

LM35) al controlador de la máquina para monitorear el fluido en tiempo real y detener el equipo en caso de anomalías térmicas [4].

### 8.6.2 Asistencia neumática y dinámica de fluidos

El mecanizado térmico requiere de una asistencia neumática constante para asegurar la calidad del corte y proteger los componentes ópticos del sistema. Los sistemas de corte térmico requieren acoplar subsistemas periféricos que utilizan compresores para inyectar aire a presión directamente a través de una boquilla cónica dispuesta de forma coaxial al rayo láser [2].

Desde el punto de vista de la dinámica de fluidos, este flujo de aire a presión cumple una doble función fundamental. En primer lugar, remueve violentamente los residuos y el material fundido de la ranura de corte antes de que la transferencia térmica afecte la estructura de las zonas aledañas. En segundo lugar, actúa como una barrera mecánica positiva que protege el delicado lente focal contra las salpicaduras de resina, partículas de material y el humo residual generado por la vaporización del sustrato [2].

### 8.6.3 Extracción de gases

El proceso de corte y grabado de materiales no metálicos genera irremediablemente residuos de combustión, micropartículas y humos densos que deben ser evacuados del área de manufactura. Para gestionar estos residuos y garantizar la seguridad en el entorno, es imperativo acoplar un sistema de extracción de aire al control periférico de la máquina [4].

Este subsistema utiliza un ventilador extractor de alta capacidad (generalmente centrífugo) que genera una presión negativa constante dentro del chasis del equipo. Esta succión fuerza la salida de los gases de combustión hacia el exterior de las instalaciones a través de ductos flexibles, protegiendo las vías respiratorias del operador frente a emisiones tóxicas y evitando que la niebla de humo se acumule en el habitáculo, lo cual ensuciaría los espejos y atenuaría la potencia del láser [4].

## 8.7 Control numérico computarizado (CNC) y mecatrónica

### 8.7.1 ¿Qué es Control Numérico Computarizado (CNC)?

El Control Numérico Computarizado (CNC) se define como el gobierno automatizado de una máquina herramienta mediante instrucciones basadas en códigos numéricos, las cuales son procesadas por un controlador dedicado o un ordenador equipado con

software especializado. Esta tecnología alcanzó su madurez con la invención de los microprocesadores, un avance que permitió desarrollar y almacenar los programas de mecanizado de forma local en el propio equipo. Gracias a su arquitectura de control digital, los sistemas CNC poseen un alto nivel de flexibilidad, lo que facilita enormemente la integración de módulos personalizados para adaptarse a diferentes procesos de manufactura [13].

Desde el desarrollo de las primeras máquinas programables hasta la actualidad, el Control Numérico Computarizado (CNC) ha permitido automatizar diferentes procesos de manufactura que anteriormente requerían una mayor intervención del operador. Su principal función es controlar mediante una computadora los movimientos de la herramienta o del material, siguiendo las instrucciones establecidas previamente en un programa [14].

En términos generales, una máquina CNC funciona a partir de un diseño realizado en un software CAD (Computer Aided Design), donde se representa digitalmente el objeto que se desea fabricar. Posteriormente, esta información puede ser procesada mediante un software CAM (Computer Aided Manufacturing), que se encarga de generar las instrucciones necesarias para que la máquina pueda realizar el trabajo [14].

Estas instrucciones normalmente se convierten en un código alfanumérico conocido como Código G, el cual contiene las órdenes relacionadas con los movimientos, velocidades y diferentes acciones que debe ejecutar la máquina. De esta manera, el equipo puede seguir una trayectoria programada y realizar el proceso de fabricación de acuerdo con el diseño establecido [14].

Los sistemas CNC pueden utilizarse en diferentes procesos de fabricación, ya sea mediante la eliminación de material, conocida como fabricación sustractiva, o mediante la incorporación de material, denominada fabricación aditiva. En ambos casos, la computadora permite controlar de manera automática el proceso y obtener una pieza de acuerdo con las características definidas en el diseño [14].

### 8.7.2 Tipos de sistema de control numérico

Existen dos formas principales de controlar el desplazamiento en un equipo CNC: mover la herramienta fijando posiciones individuales o guiarla a lo largo de una ruta fluida e ininterrumpida.

**Sistema de control de trayectoria continua:** en este tipo de sistema, tanto el movimiento de los ejes como la operación de mecanizado se realizan siguiendo una trayectoria previamente programada. La herramienta se desplaza a diferentes velocidades mientras sigue el recorrido establecido. Por esta razón, es importante mantener un control preciso de los movimientos y una correcta sincronización entre los diferentes ejes de la máquina, ya que de esto depende que la herramienta siga adecuadamente la trayectoria programada [15].

**Sistema paraxial:** este sistema permite controlar la posición y el desplazamiento de la parte móvil de la máquina siguiendo trayectorias que se mantienen paralelas a los ejes principales de la máquina. En determinados casos, también puede realizar movimientos en una dirección de 45° [16].

### 8.7.3 Interpolación

La interpolación es el proceso mediante el cual una máquina CNC determina los movimientos necesarios para desplazarse entre diferentes puntos y seguir una trayectoria determinada. Para realizar estos movimientos existen diferentes métodos de interpolación, entre los principales se encuentran los siguientes [16]:

**Interpolación lineal:** consiste en desplazar la herramienta en línea recta desde un punto inicial hasta un punto final. Este método permite realizar diferentes tipos de perfiles y trayectorias. Sin embargo, cuando se requiere fabricar formas muy complejas, puede ser necesario procesar una mayor cantidad de información para definir correctamente el recorrido.

**Interpolación circular:** permite que la herramienta siga una trayectoria en forma de arco o circunferencia. Para realizar este movimiento es necesario establecer las

coordenadas del punto final, la ubicación del centro del arco, el radio correspondiente y la dirección del movimiento, que puede ser en sentido horario o antihorario.

**Interpolación parabólica o cúbica:** en este método, las trayectorias se generan utilizando curvas definidas mediante ecuaciones matemáticas de mayor complejidad. Debido a que permite representar recorridos más complejos, este tipo de interpolación se utiliza principalmente en máquinas que cuentan con cinco o más ejes de movimiento y en determinadas aplicaciones de robots industriales.

### 8.7.4 Características principales

La implementación de tecnología CNC transforma significativamente los procesos industriales, destacándose por las siguientes características [13]:

- **Calidad y precisión:** Nos da la certeza de obtener una pieza o producto con una acabado limpios y precisos una superior gracias a su exactitud milimétrica y a la facilidad para modificar los parámetros de diseño de la pieza a fabricar [13].
- **Simulación y complejidad:** Permiten la elaboración de geometrías muy complejas de forma sencilla y ofrecen la ventaja de poder simular virtualmente el proceso de corte antes de ejecutarlo físicamente [13].
- **Optimización de recursos:** Logran una línea de producción mucho más uniforme, lo que simplifica el control de calidad y permite tiempos de entrega casi inmediatos. Esto se traduce en una notable reducción de los costos de inventario, logística y fabricación [13].
- **Eficiencia operativa:** Reducen la fatiga y aumentan la seguridad laboral, dado que un solo operador tiene la capacidad de gestionar y supervisar múltiples máquinas de forma simultánea [13].

### 8.7.5 El componente humano

A pesar de que la maquinaria CNC opera bajo un principio casi totalmente automatizado, el rol del operador sigue siendo un factor indispensable para el éxito del proceso. El personal encargado de estas máquinas debe poseer una instrucción técnica fundamental y diversas aptitudes matemáticas, tales como nociones de álgebra, geometría y trigonometría, además de la capacidad para interpretar planos mecánicos. Adicionalmente, el operador debe dominar criterios técnicos como la correcta selección de las herramientas de corte, los métodos de sujeción de la materia prima, la

configuración inicial del equipo, la programación lógica (generalmente en código G) y los procedimientos de mantenimiento y operación [13].

## 8.8 Arquitectura de sistema de manufactura CNC

La arquitectura de una máquina de corte láser CNC se divide en múltiples etapas lógicas y físicas diseñadas para procesar información a altas velocidades y generar trayectorias con la máxima precisión posible. Para lograr esta ejecución en tiempo real, el sistema se estructura fundamentalmente en dos grandes áreas: la arquitectura de hardware y el entorno de los algoritmos de control [4].

### 8.8.1 Arquitectura Física del Sistema

A nivel de hardware, el control numérico computarizado se ramifica en dos etapas operativas claramente definidas:

**Figura 11.** Esquema general del sistema electrico principal




**Fuente:** [4]

- **Etapa de Control:** Funciona como el cerebro analítico del equipo. Está conformada por la computadora de diseño y la placa madre principal como el controlador Ruida RDC6445S, las cuales se encargan de procesar las instrucciones digitales y recibir las señales de entrada de los periféricos de

seguridad, tales como los sensores de puerta, los interruptores de encendido y los circuitos de paro de emergencia [4].

- **Etapa de Potencia:** Comprende los componentes electromecánicos encargados de ejecutar el trabajo físico. Esta etapa recibe las señales de la placa madre y las transfiere a los drivers controladores de los motores, a los actuadores mecánicos motores paso a paso de los ejes X y Y y a las fuentes de poder que energizan todo el sistema [4].

## 8.9 Controladores de procesamiento digital de señales (DSP)

### 8.9.1 ¿Qué es una placa base industrial (Controlador DSP)?

El procesador es el cerebro de cualquier máquina CNC. Su trabajo principal es recibir las órdenes que ingresa el usuario y hacer las operaciones necesarias para ejecutarlas. Básicamente, es el cerebro que procesa toda la información necesaria para traducir los vectores a señales de control para la máquina. A diferencia de una placa básica de computadora comercial, un controlador industrial como el de la serie Ruida está diseñado para ofrecer una alta estabilidad de hardware, integrando sistemas de rechazo de sobretensión y protección contra electricidad estática, factores críticos en un entorno de manufactura [13].

### 8.9.2 Características de Memoria

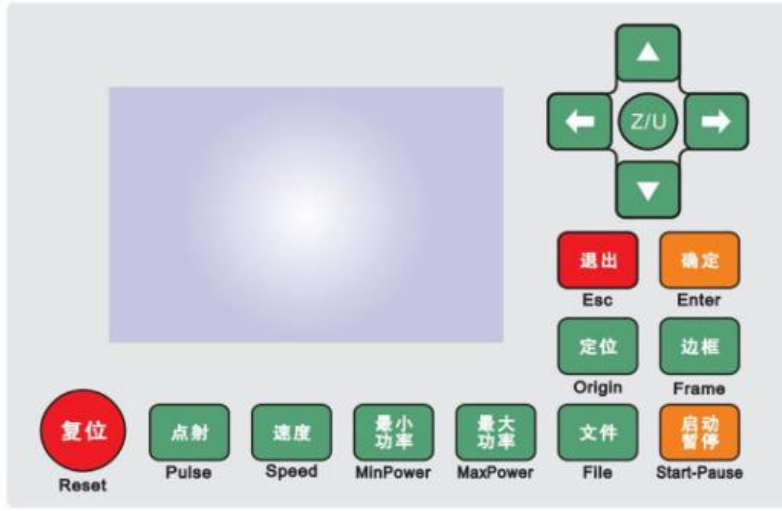
El procesador de una máquina CNC siempre trabaja junto a memorias dedicadas, las cuales le permiten ejecutar tareas al momento o almacenar archivos de forma permanente. Tomando como ejemplo la serie Ruida RDC644XG, estas placas bases cuentan con un almacenamiento de archivos no volátil de gran capacidad típicamente entre 128M y 256M dependiendo de la edición del hardware. Esta memoria incluye características de tolerancia a fallos, lo que significa que el controlador es capaz de comprobar defectos en las pistas de los archivos y verificar su formato. Esto permite que la máquina trabaje de forma completamente autónoma, ejecutando trabajos pesados sin riesgo de que un corte en la conexión con la computadora arruine el material [17].

### 8.9.3 Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

La interfaz de operador o HMI (Human-Machine Interface) contiene el panel de control físico y visual, siendo el puente directo entre el usuario y las funciones del DSP. En la tecnología Ruida, el HMI se presenta a través de una pantalla TFT intuitiva (por

ejemplo, a color de 3.5 pulgadas con resolución de 320x240 o 320x480) acompañada de un teclado de membrana. A través de esta interfaz, el operador no solo puede mover los ejes manualmente, sino también modificar los parámetros de las capas de corte (potencia mínima/máxima y velocidad) y visualizar de forma dinámica la vista previa del archivo y su barra de progreso en tiempo real [17].

**Figura 12.** Imagen del panel (HMI)




**Fuente:** [17]

**Inkscape:** Este software se utiliza para generar un archivo con código G a partir de un diseño que ya haya sido elaborado previamente [18].

**Universal Gcode Sender v 2.0 (UGS):** Este programa sirve para configurar la máquina, y también permite enviar el código G que fue generado previamente en Inkscape [18].

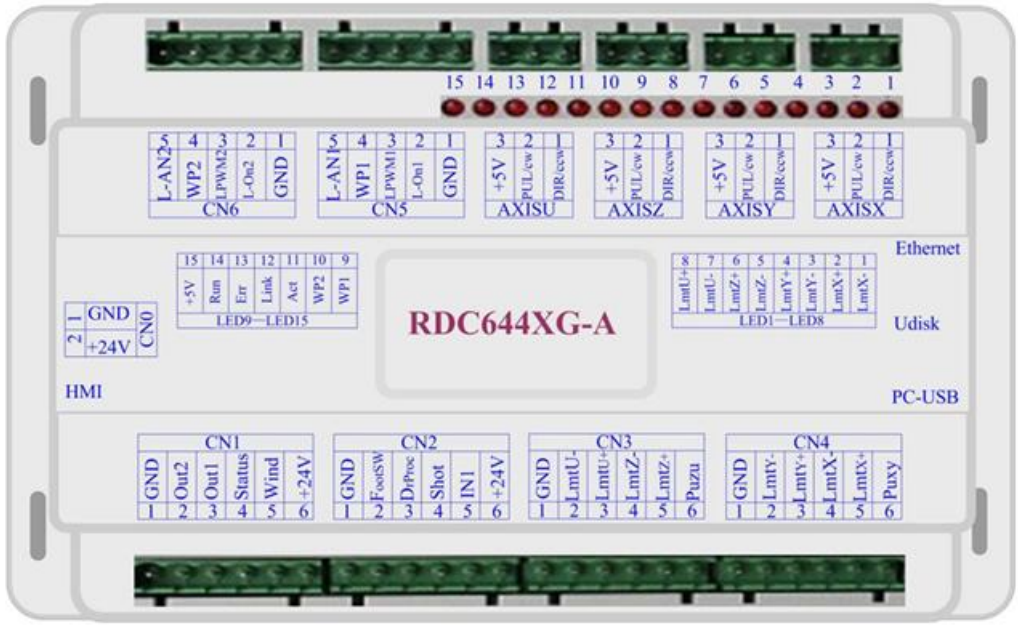
**LaserGRBL:** Se trata de un software que permite importar imágenes, ajustar los tonos, convertirlas en vectores ("vectorizar") e imprimir directamente con el láser. Además, cuenta con la opción de ajustar los distintos parámetros de la máquina [18].

### 8.9.4 Comunicación

Para que la placa base industrial reciba las coordenadas y el Código G, debe contar con protocolos de comunicación robustos. Los controladores Ruida modernos permiten la comunicación directa con la PC a través de una red Ethernet (10/100 MHz) o un puerto USB 2.0, contando con la capacidad de comprobar automáticamente cuál modo de comunicación se está utilizando. Adicionalmente, cuentan con una interfaz "Udisk" (puerto USB-A), diseñada para conectar memorias flash externas. Esto permite al

controlador leer, copiar a su memoria interna o eliminar archivos directamente desde el pendrive, logrando una independencia total del ordenador [17].

**Figura 13.** Controlador Ruida




**Fuente:** [17]

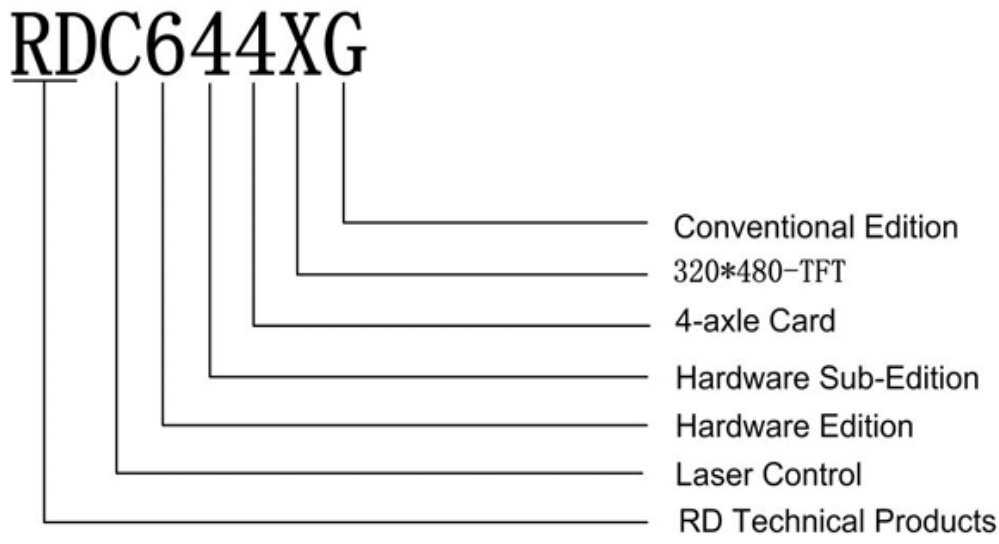
### 8.9.1 Controlador Ruida RDC6445G

El gobierno central de la cinemática y la modulación del rayo láser recae sobre la placa madre industrial Ruida de la serie RDC6445G. Este sistema embebido de nueva generación, basado en el procesamiento digital de señales (DSP), está diseñado específicamente para el control de grabado y corte por láser, destacando por su alta estabilidad de hardware y su robusta capacidad para rechazar interferencias electrostáticas y altos voltajes generados en el entorno de manufactura [4].

### 8.9.2 Nomenclatura del controlador

El diagrama del modelo desglosa el código alfanumérico **RDC644XG**, donde cada carácter define una especificación técnica de fabricación de la placa[17]:

**Figura 14.** Descripción del modelo del controlador.




**Fuente:** [17]

- **R y D:** Representan el origen y la aplicación del equipo, identificándolo como un producto técnico de la marca (RD Technical Products) enfocado netamente en el control de tecnología con láser [17].
- **C y 6:** Definen la versión y la subversión de la arquitectura física de la tarjeta madre (Hardware Edition y Hardware Sub-Edition) [17].
- **4:** Especifica la capacidad de actuación de la placa, indicando que el hardware soporta el gobierno y la cinemática para 4 ejes independientes (4-axle Card) [17].
- **4:** Describe las características de la interfaz visual, señalando la incorporación de una pantalla tecnología TFT con una resolución nativa de 320x480 píxeles [17].
- **XG:** Clasifica al controlador como una edición de configuración convencional (Conventional Edition), estandarizada para equipos de manufactura [17]

### 8.9.3 Especificaciones de rendimiento del controlador RDC644XG

**Tabla 2.** Rendimiento del controlador

**Fuente:** [17]

## 8.10 El lenguaje de maquina y código G

### 8.10.1 Definición y estructura del Código G

El Código G estandarizado internacionalmente bajo normas como la ISO 6983 o RS274

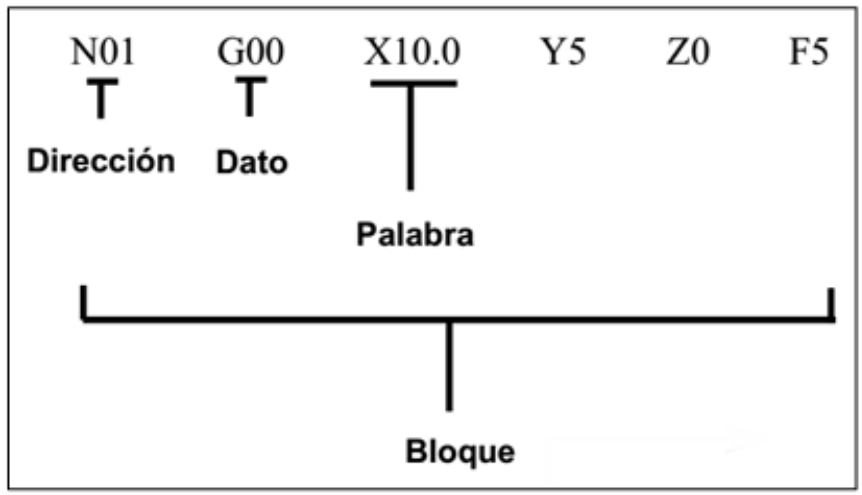
| Característica de Rendimiento | Especificación Técnica |
|---|---|
| **Alimentación eléctrica** | 24V en una dirección (compatible con fuente de 36V). |
| **Puertos de control láser** | Puerto digital bidireccional, configurable de forma independiente. |
| **Capacidad de memoria interna** | 128 MB a bordo. |
| **Velocidad de transferencia (USB)** | Muy rápida, compatible con discos de diferentes capacidades. |
| **Tolerancia a fallos lógicos** | Capacidad superior para detectar pistas defectuosas y errores de formato. |
| **Puertos de entrada (E/S)** | 4 vías de entrada (2 para uso general, 2 para usos dedicados/especiales). |
| **Puertos de salida (E/S)** | 4 vías de salida de alta capacidad (500 mA cada una), incluye protección contra corriente inversa. |
| **Gobierno de ejes cinemáticos** | Soporte para 4 ejes independientes. |
| **Interfaz de visualización (HMI)** | Pantalla TFT a color con resolución de 320x480 píxeles. |
| **Protocolos de comunicación** | Ethernet 10/100 MHz o USB 2.0 (con comprobación automática del modo de comunicación). |

es el lenguaje de programación de bajo nivel empleado universalmente en la industria para el Control Numérico Computarizado (CNC) [13].

Este lenguaje se estructura mediante líneas secuenciales llamadas bloques, las cuales contienen información geométrica y tecnológica. Precisamente, el lenguaje se divide en dos grupos [19]:

- **Códigos G:** Son los encargados de definir el tipo de movimiento y la trayectoria espacial que seguirá el cabezal láser. Ejemplos clásicos son G00 para un posicionamiento rápido sin corte, G01 para una interpolación lineal que sería básicamente un corte en línea recta, y G02/G03 para interpolaciones circulares en este caso sería cortes curvos [19].
- **Códigos M:** Controlan las funciones físicas auxiliares del hardware de la máquina, tales como el encendido, la modulación y el apagado del haz láser, o la activación de sistemas de refrigeración [19].

**Figura 15.** Programa máquina CNC




**Fuente:** [12]

**Tabla 3.** Tipo de código G.

| Comando | Función y Aplicación en el Mecanizado |
|---|---|
| **G00** | Desplazamiento lineal a máxima velocidad para ubicar la herramienta sin efectuar cortes. |
| **G01** | Avance rectilíneo controlado a la velocidad de trabajo programada. |
| **G02** | Trayectoria en arco o círculo en el sentido de las agujas del reloj (horario). |
| **G03** | Trayectoria en arco o círculo en dirección opuesta a las agujas del reloj antihorario. |

| Comando | Función y Aplicación en el Mecanizado |
|---|---|
| **G04** | Suspensión temporal de la trayectoria por un lapso medido en segundos. |
| **G17** | Activa la superficie de trabajo bidimensional en el plano XY. |
| **G18** | Activa la superficie de trabajo bidimensional en el plano ZX. |
| **G19** | Activa la superficie de trabajo bidimensional en el plano YZ. |
| **G20** | Establece la unidad de medida del programa en pulgadas. |
| **G21** | Establece la unidad de medida del programa en milímetros sistema métrico. |
| **G28** | Retorno automático del cabezal al sistema de referencia o cero máquina. |
| **G40** | Desactiva el ajuste o la compensación del radio de la herramienta de corte. |

**Fuente:** [20]

**Tabla 4.** Tipo de código M.

| Código M | Instrucción y Funcionamiento |
|---|---|
| **M00** | Detención obligatoria del ciclo hasta confirmación manual del operador. |
| **M01** | Pausa facultativa del programa, dependiente de la configuración activa en el panel. |
| **M02** | Conclusión de la secuencia de mecanizado en ejecución. |
| **M30** | Finalización del programa con reinicio del puntero al inicio del código. |
| **M03** | Encendido del husillo principal en sentido de giro horario. |
| **M04** | Encendido del husillo principal en sentido de giro antihorario. |
| **M05** | Corte total del movimiento de rotación del husillo. |
| **M06** | Ejecución de la maniobra de cambio del instrumento de corte. |
| **M08** | Activación de la bomba del fluido de refrigeración. |
| **M09** | Desactivación del suministro del fluido refrigerante. |
| **M47** | Reinicio automático de la lectura desde la primera línea del archivo. |

**Fuente:** [21]

### 8.10.2 Algoritmos de Control y Espacios de Ejecución

Para que la máquina opere de forma sincronizada, los algoritmos normalmente tienen la estricta tarea de gestionar el flujo de datos ordenado. Para garantizar la velocidad y robustez del equipo, estos bloques de control se dividen en tres espacios de trabajo [4]:

- **Espacio de usuario:** Es el entorno base donde opera el sistema operativo de la computadora (como Windows), ejecutando las funciones comunes de interfaz sin opciones mayores de priorización [4] .

- **Espacio de baja latencia (Soft Tiempo Real):** En este nivel intermedio se desarrollan tareas que deben cumplir con un tiempo promedio de iteración, permitiendo manipular el programador de tareas y la asignación de prioridades para asegurar fluidez [4].

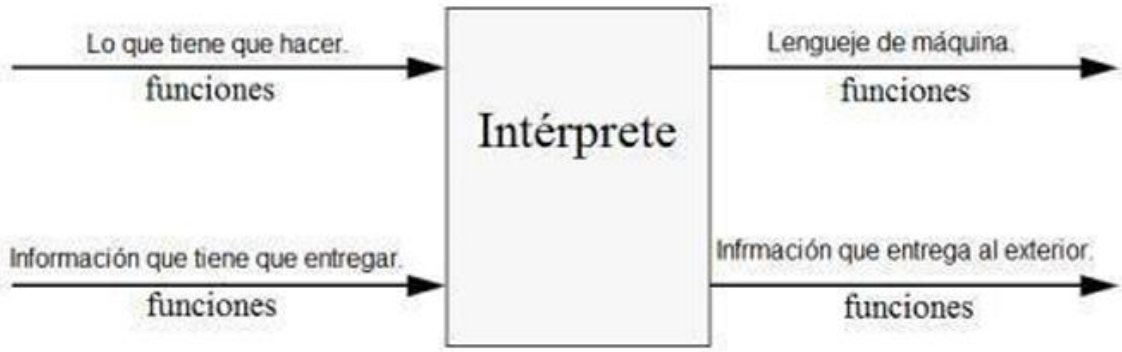
- **Zona de tiempo real riguroso:** Representa el área crítica del control. Aquí los procesos deben responder exacto en el momento programado, manteniendo un ritmo constante y sin margen de error mientras la máquina está activa. [4].

### 8.10.3 El Intérprete de Código G y Flujo de Datos

Cualquier máquina CNC utiliza Código G como lenguaje principal. Mediante un programa interno de lectura, el equipo interpreta los datos sobre medidas, ritmos de avance y la potencia requerida en el láser. Dicho análisis se realiza mediante dos pasos principales.[4]:

- **Lectura y evaluación:** La primera etapa lee las funciones programadas junto con la información adicional acerca de las limitantes impuestas para los trazos del diseño [4].
- **Generación de trayectorias:** La segunda etapa entrega la información procesada al siguiente bloque lógico del sistema, convirtiéndola en "funciones canónicas". A partir de aquí, los datos pasan por el planificador de rutas, la cinemática inversa y los reajustes correspondientes hasta llegar al generador de pasos y PWM, el cual dictará el movimiento final de los motores [4].

**Figura 16.** Diagrama de bloque del intérprete



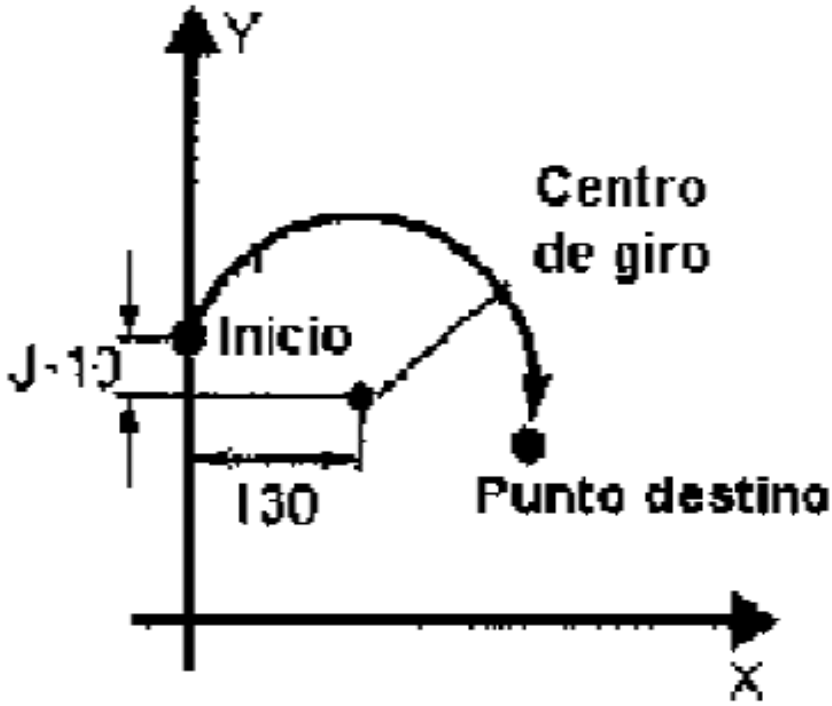

**Fuente:** [4]

### 8.10.4 Conversión de vectores a coordenadas matemáticas

En el flujo de trabajo de la manufactura CNC, los diseños suelen originarse en programas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) mediante gráficos vectoriales (archivos como .cdr, .svg, o .dwg). A diferencia de las imágenes rasterizadas o mapas de bits que se componen de píxeles estáticos, un gráfico vectorial está codificado puramente mediante entidades matemáticas ya sean puntos, líneas y curvas [2].

El proceso por el cual el algoritmo intérprete convierte estos vectores en movimientos reales implica extraer las coordenadas matemáticas X, Y que definen los puntos de inicio y fin de cada trazo del diseño vectorial. Una vez que el intérprete obtiene estos puntos, utiliza sistemas de ecuaciones geométricas para calcular la trayectoria en el plano cartesiano. Por ejemplo, al leer un vector curvo, el algoritmo modela la ecuación de una circunferencia calculando el centro de giro y el radio para generar el vector tangente unitario. Esta interpolación matemática determina exactamente en qué instante y a qué velocidad deben girar los motores de los ejes X e Y para reproducir esa curva con precisión micrométrica sobre el material de trabajo [2].

**Figura 17.** Ejemplo de movimiento G02




**Fuente:** [13]

### 8.10.5 Sistemas CAD/CAM

Es una tecnología que se maneja desde una computadora para realizar el proceso de realizar la pieza. Gracias a esta tecnología, los productos pueden fabricarse de forma más rápida, precisa y económica [22].

### 8.10.6 Tecnología CAM

Este sistema se emplea en computadoras para realizar tareas técnicas relacionadas con la fabricación y el ensamblaje, por ejemplo, diseñar los esquemas de corte, trazar los soportes de las piezas y desarrollar el código para la máquina CNC.. La función clave de la tecnología CAM es ofrecer utilidades que trabajen a partir de los diseños digitales hechos en CAD, agregando la información técnica necesaria para que la pieza pueda fabricarse correctamente [22].

La tecnología CAM surgió inicialmente para codificar piezas en sistemas CNC. Gracias a que opera de forma externa (*off-line*), evita interrumpir el trabajo de las máquinas

mientras se programa, una ventaja operativa que también se aprovecha al controlar brazos robóticos o autómatas programables [22].

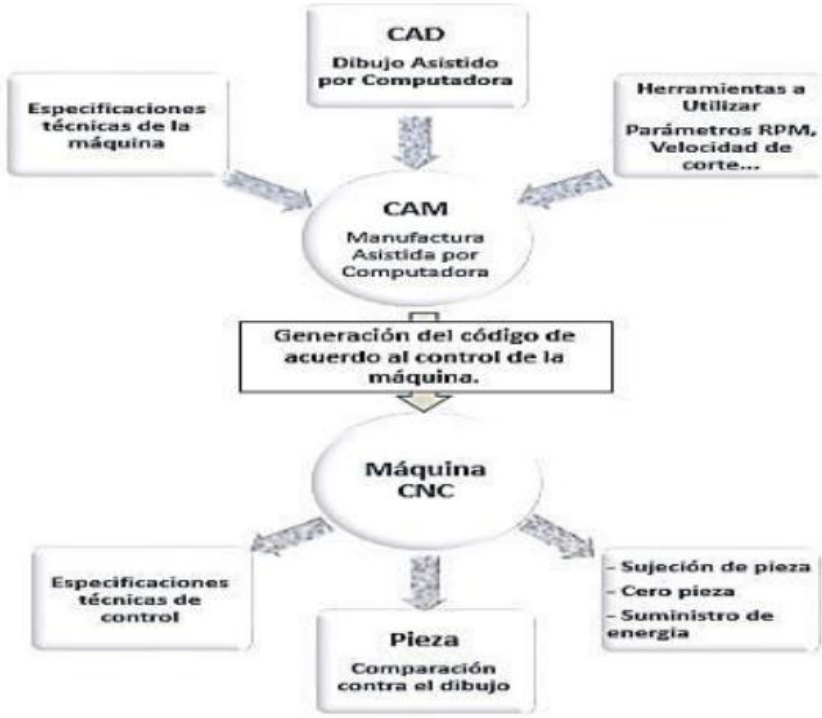
Entre las ventajas que ofrece la codificación de instrucciones se encuentran [22]:

- Cuenta con una interfaz sencilla de utilizar.
- El operador puede indicar de forma gráfica las trayectorias deseadas directamente sobre el modelo CAD.
- El código se genera de manera automática.
- El usuario tiene la posibilidad de indicar qué superficies desea mecanizar, qué herramientas utilizar, entre otros datos necesarios.

### 8.10.7 Tecnología CAD

Las siglas CAD provienen del inglés "Computer Aided Design", que en español significa diseño asistido por computador. Mediante uno o varios equipos informáticos, la tecnología CAD permite desarrollar, ajustar y mejorar bocetos de forma completamente dinámica, lo cual ayuda a mejorar tanto la productividad como la precisión del diseñador. Otro aspecto importante es que la información generada puede guardarse en medios magnéticos.

**Figura 18.** Proceso de mecanizado en un CNC.




**Fuente:** [23]

## 8.11 Principio de los motores paso a paso

### 8.11.1 Fundamento electromagnético básico

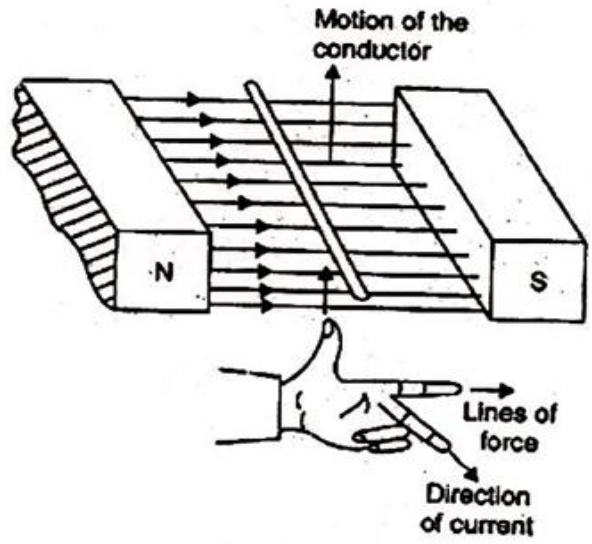
El funcionamiento de los actuadores depende de la combinación entre energía eléctrica y campos magnéticos. El giro en un motor ocurre por el principio de Fleming, el cual explica que la electricidad dentro de un entorno magnético genera un empuje. Esta fuerza electromagnética determina el desplazamiento y se representa con la ecuación de Lorentz [24].

$$F = BIL \tag{5}$$

Donde:

- $B = Densidad\ de\ flujo\ magnético\ en\ Teslas\ (T)$
- $I = Corriente\ eléctrica\ en\ Amperios\ (A)$
- $L = Longitud\ efectiva\ del\ conductor\ en\ metros\ (m)$
- $F = Fuerza\ en\ Newtons\ (N)$

**Figura 19.** Regla de la mano izquierda.

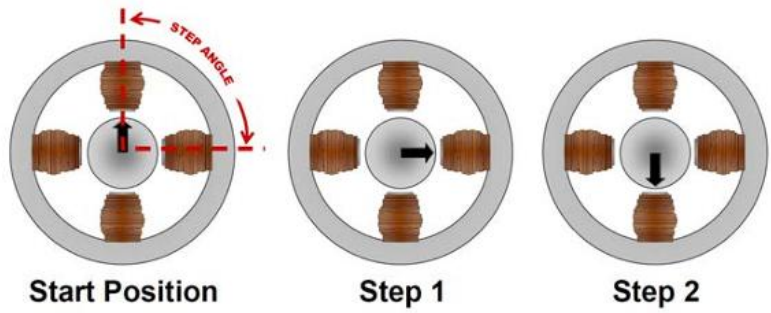



**Fuente:** [24]

### 8.11.2 Cinemática discreta (El concepto de "Paso")

A diferencia de los motores convencionales de giro continuo, los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos diseñados específicamente para convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos. Por esta razón, se les considera motores digitales, ya que avanzan una cantidad exacta de grados llamada ángulo de paso por cada pulso recibido. Esta naturaleza discreta los hace ideales para la robótica y el posicionamiento CNC, ya que permiten un control de movimiento de alta exactitud en lazo abierto (es decir, sin necesidad de usar sensores de retroalimentación), bastando únicamente con contar matemáticamente el número de pasos emitidos por el microcontrolador para saber la ubicación exacta del motor [24].

**Figura 20.** Ángulo de paso de 90 grados.

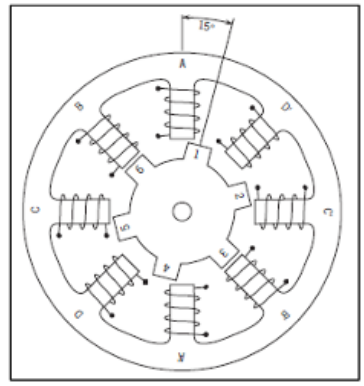


**Fuente:** [24]

### 8.11.3 Tipos de motores y características mecánicas

Podemos clasificar los motores paso a paso en tres tipos principales: híbridos, de imán permanente y de reluctancia variable. Este último funciona con un eje interno metálico y un cuerpo externo rodeado de cables. Al pasar energía por el cuerpo externo, este jala las puntas del eje y logra que la pieza avance paso a paso. La figura 3 muestra su vista interna. [25].

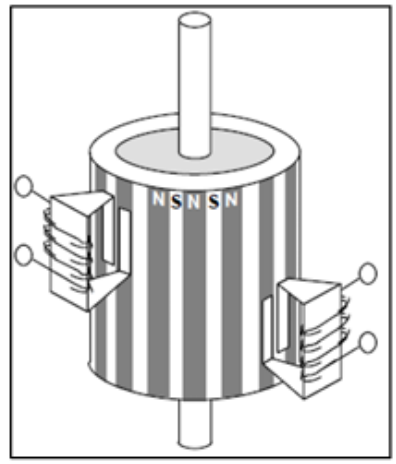
**Figura 21.** Motor paso a paso de reluctancia variable




**Fuente:** [25]

Por su parte, el motor paso a paso de imán permanente se caracteriza por tener una resolución baja y un costo bajo, con ángulos de paso que normalmente van de 7.5° a 15°. Tal como lo dice su nombre, este motor incluye un imán permanente dentro de su estructura. Este diseño no utiliza un centro con dientes, sino un imán colocado a lo largo del eje. Dicha imantación le da más fuerza magnética y un empuje de rotación mucho mayor que al de reluctancia variable [25].

**Figura 22.** Motor de imán permanente




**Fuente:** [25]

Para cerrar, el motor híbrido junta lo mejor del modelo de imán permanente y del de reluctancia variable. Aunque su costo es mayor, brinda más velocidad, fuerza y giros muy exactos (normalmente de 0,9° a 3,6°). Esto se debe a que su centro combina salientes con imanes que guían el magnetismo, haciendo que el equipo sea más potente en reposo y en avance [25].

A la hora de dimensionar e implementar estos actuadores en una arquitectura de control, es vital evaluar cinco características electromecánicas fundamentales [24]:

1. **Pasos por vuelta:** Representa la cantidad exacta de impulsos eléctricos necesarios para que el eje complete una revolución geométrica de 360°. En el estándar industrial de los motores híbridos, el valor típico es de 200 pasos por vuelta lo que otorga la resolución de 1.8° por paso.
2. **Par motor (Holding torque):** Es la fuerza de retención o agarre que ejerce el motor mientras está energizado, pero en estado de reposo. Una consideración crítica en el diseño cinemático es que este par disminuye a medida que el motor incrementa su velocidad de giro.
3. **Corriente por fase:** Define el amperaje nominal que puede soportar con seguridad cada bobina interna; este parámetro varía estructuralmente según el tipo y tamaño del motor.
4. **Tensión (Voltaje):** Corresponde al índice de voltaje máximo que admite el actuador. Existe una relación directa entre el voltaje aplicado y la velocidad operativa máxima que el motor puede desarrollar.

5. **Inercia:** Es la resistencia física del rotor a cambiar su estado de movimiento. Para sistemas mecatrónicos, a menor inercia del rotor, el sistema adquiere mayor capacidad para ejecutar aceleraciones y desaceleraciones bruscas sin riesgo de perder pasos durante la trayectoria.

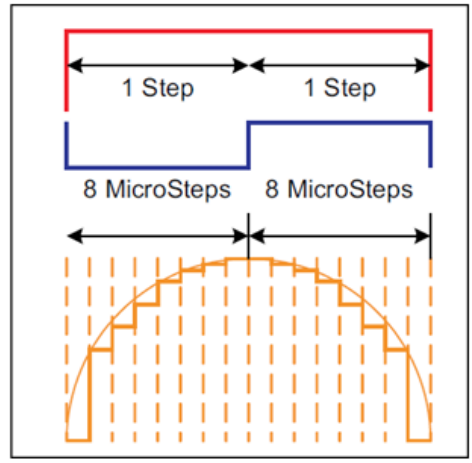
### 8.11.4 Secuencia de micropasos

Al usar micropasos, el movimiento de la máquina ya no se hace a saltos como en los métodos tradicionales. En su lugar, cada paso normal se fragmenta en varias partes mínimas, lo que elimina las vibraciones y produce un recorrido mucho más fluido . Usar la secuencia de micropasos en cualquier motor trae varias ventajas, entre ellas: una mejor respuesta en el torque, menos vibración durante el funcionamiento del motor y una menor probabilidad de que se presente resonancia en el motor [25].

La idea principal detrás de los micropasos es lograr que la corriente que circula por las bobinas del motor no cambie de forma brusca entre su valor máximo en una dirección y su valor máximo en la dirección contraria. Por lo general, cuando se habla de micropasos se hace referencia al uso de funciones seno y coseno, con el fin de que la corriente se comporte de manera parecida a una onda sinusoidal, como la de una corriente alterna. En la figura 9 se muestra un ejemplo de cómo se ve esta forma de onda de corriente en la bobina de un motor cuando se aplican micropasos [25].

Cada paso completo del motor se divide, mediante esta técnica de control, en 8 pasos más pequeños. En cada uno de ellos se controla que la corriente en la bobina llegue a un nivel específico ya establecido, de manera que, al combinarse todos los micropasos, la forma de onda de la corriente se acerque lo más posible a la forma deseada, que en este caso es una señal sinusoidal [25].

**Figura 23.** Micropasos en la bobina del motor.




**Fuente:** [25]

### 8.11.5 Sincronización del controlador con la etapa de actuación y corte

Para que la cinemática discreta de los motores se ejecute correctamente, debe existir un puente de comunicación de alta velocidad desde la placa base industrial. El controlador Ruida RDC644XG gobierna la etapa de potencia enviando señales lógicas direccionales de 5V hacia las interfaces de los drivers [17].

Sin embargo, el sistema exige una sincronización perfecta que va más allá del simple movimiento de los ejes espaciales. Mientras el controlador gestiona las interpolaciones matemáticas de los motores, emite simultáneamente una señal de modulación por ancho de pulsos (PWM) dedicada exclusivamente a gobernar la fuente de alta tensión que alimenta el tubo de $CO_2$ de la máquina. Esta coordinación algorítmica exacta entre los tiempos de encendido del láser de y el micro-posicionamiento de los motores paso a paso es lo que garantiza cortes limpios en curvas complejas, evitando quemaduras excesivas por retrasos electromecánicos en los vértices del diseño [17].

### 8.11.6 Características físicas y topología bipolar del estándar NEMA 17

Dentro del diseño de arquitecturas automatizadas a pequeña y mediana escala, los actuadores bajo el estándar NEMA 17 se posicionan como una de las alternativas más confiables. La designación "NEMA" estandariza principalmente las dimensiones físicas de la brida de montaje del motor, lo que facilita enormemente el diseño mecánico de las piezas de acople y transmisión [24].

**Figura 24.** Nema 17.



| **Parámetro Operati** | |
|---|---|
| Modelo de actuador | |
| Dimensiones físicas | cluyendo el eje) |
| Masa aproximada | |
| Geometría del eje | ongitud de 25 mm |
| Resolución de giro | ión) |
| Alimentación y cons | nte de 1,7 A |
| Par de torsión (Torque) | 4 kg/cm |
| Propiedades electromagnéticas | Resistencia de 3,3 Ω e inductancia de 2,8 mH por bobinado |

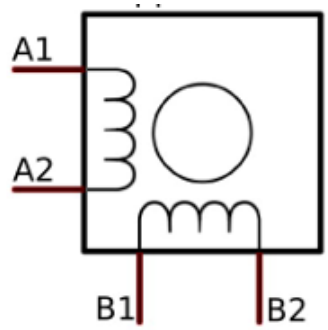
**Fuente:** [26]

El motor NEMA 17 es el que se va a encargar de realizar los movimientos de los ejes X y Z. Este tipo de motor es muy utilizado en proyectos como impresoras 3D y máquinas CNC, ya que se adapta bien a este tipo de aplicaciones. Es un motor bipolar que avanza en pasos de 1.8°, es decir, necesita 200 pasos para completar una vuelta completa. Cada una de sus bobinas soporta una corriente de 1.7A y puede generar un torque de hasta 4 Kg/cm [26].

**Tabla 5.** Especificación del motor paso a paso Gema 17

**Fuente:** [20]

**Figura 25.** Los cuatros hilos del motor paso a paso bipolar.



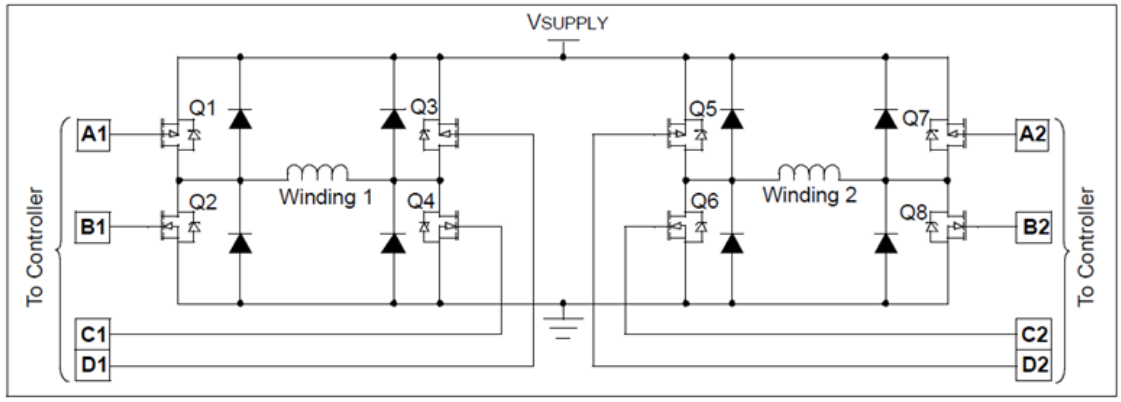

**Fuente:** [24]

### 8.11.7 Control de potencia e inversión electromagnética (Circuito Puente en H)

Para lograr la inversión de polaridad que exige un motor bipolar, es imperativo el uso de un circuito de potencia específico conocido como Puente en H. Este circuito electrónico se configura estratégicamente mediante interruptores de estado sólido, típicamente transistores MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), los cuales permiten o bloquean el paso de la corriente hacia las bobinas del motor. El principio de funcionamiento del Puente en H se basa en la activación diagonal de estos transistores. Por ejemplo, al encender los transistores Q1 y Q4 (manteniendo apagados Q2 y Q3), la corriente fluye a través de la bobina en una dirección (de izquierda a derecha), generando una polaridad magnética específica. Para lograr el siguiente paso del motor, el hardware de control invierte la lógica: enciende Q2 y Q3, y apaga Q1 y Q4, forzando a la corriente a fluir en sentido contrario de derecha a izquierda [24].

Adicionalmente, el diseño de este circuito incluye diodos conectados en paralelo a cada transistor MOSFET. La función de estos componentes es vital para la supervivencia del controlador, ya que actúan como barreras de protección contra los picos de voltaje residuales que se generan en las bobinas inductivas cada vez que se produce una conmutación rápida de energía [24].

**Figura 26.** Circuito de control de un motor bipolar.




**Fuente:** [24]

## 8.12 Controladores de potencia (Drivers)

### 8.12.1 El driver como etapa de potencia y amplificación

En la arquitectura de cualquier sistema de CNC o micro máquina herramienta, existe una frontera estricta entre la etapa de procesamiento lógico (control) y la etapa de actuación física mecánica. El controlador principal como una placa base DSP Ruida o un microcontrolador es el cerebro responsable de calcular las trayectorias e interpolaciones matemáticas; sin embargo, las señales electrónicas que emite operan a voltajes muy bajos comúnmente entre 3.3V y 5V y corrientes del orden de los miliamperios. Esta energía es minúscula e incapaz de mover físicamente la masa de los motores o vencer la resistencia mecánica del proceso de corte [27].

Por lo tanto, el diseño básico y fundamental de un sistema de control de movimiento exige obligatoriamente la integración de un módulo intermedio denominado manejador o amplificador, conocido universalmente en la industria como drivers o controlador de potencia. La función primordial de este componente es actuar como un puente traductor de energía: recibe las señales lógicas de baja intensidad emitidas por el controlador de movimiento y las convierte en corrientes eléctricas de alta potencia [27].

A través de esta amplificación, el driver logra suministrar a los actuadores los motores eléctricos paso a paso la tensión y el amperaje exactos que necesitan para magnetizar sus bobinas, generar el par de fuerza o torque necesario y ejecutar los desplazamientos. Simultáneamente, este dispositivo aísla y protege a la placa base, garantizando que el

retorno de corrientes fuertes generadas por los motores no dañe los delicados circuitos lógicos del sistema de control [27].

### 8.12.2 Interfaz lógica de control: Señales PUL, DIR y ENA

Para que la traducción de la lógica a la acción mecánica sea exitosa, debe existir un canal de comunicación estandarizado entre el controlador principal placa base DSP y el driver. En los sistemas CNC industriales, como los gobernados por los controladores de la serie Ruida, esta comunicación se realiza unidireccionalmente enviando señales digitales de bajo voltaje típicamente 5V desde la placa hacia las entradas optoacopladas del driver. Esta interfaz se fundamenta en tres señales críticas [24]:

- **Señal PUL (Pulsos o STEP):** Es la señal responsable del avance cinemático. El controlador genera una onda digital de modulación por ancho de pulsos (PWM) en la que cada cambio de estado o "flanco" (la transición de voltaje bajo a alto) le indica al driver que debe suministrar la energía necesaria para que el motor avance exactamente un paso o micro-paso. Por consiguiente, la distancia total recorrida depende de la cantidad de pulsos emitidos, mientras que la velocidad de rotación del motor es directamente proporcional a la frecuencia de esta señal.
- **Señal DIR (Dirección):** Es una señal lógica discreta de propósito general (GPIO) encargada de establecer el sentido de giro del rotor. Al ser una señal binaria, el controlador la mantiene en un valor lógico alto (5V) para forzar al motor a girar en un sentido (por ejemplo, horario), y cambia a un valor lógico bajo (0V) cuando requiere invertir la trayectoria (antihorario).
- **Señal ENA (Habilitación, Enable o SLEEP):** Esta señal actúa como un interruptor de seguridad y ahorro energético. Su función es habilitar o deshabilitar el suministro de corriente de alta potencia desde el puente en H hacia las bobinas del motor. Cuando la señal de habilitación se desactiva, el motor queda "libre", perdiendo su par de retención (*holding torque*). Esto resulta útil cuando el sistema entra en estado de reposo, evitando sobrecalentamientos innecesarios tanto en el actuador como en el controlador de potencia.

### 8.12.3 Proceso de conmutación final

El ciclo concluye dentro de la arquitectura interna del driver. Una vez que las entradas optoacopladas reciben y decodifican los patrones de pulsos y dirección (PUL y DIR)

enviados por la placa Ruida, el microprocesador interno del driver ejecuta los algoritmos de división de paso (microstepping). Finalmente, ordena a los transistores de la etapa de potencia abrir y cerrar los circuitos, permitiendo que la energía de las fuentes de alimentación (típicamente de 24V o 36V) fluya hacia el motor híbrido, logrando el corte de precisión deseado [24].

## 8.13 Distribución energética en sistema automatizados

### 8.13.1 Principio de aislamiento galvánico e interferencia electromagnética

En el diseño de sistemas mecatrónicos y arquitecturas CNC de precisión, la estabilidad electrónica es tan crítica como la robustez mecánica. Un error de diseño frecuente en la integración de equipos es alimentar todos los componentes de la máquina desde una única fuente de poder compartida. Esta práctica resulta perjudicial debido a la interferencia electromagnética y a la generación de ruido eléctrico. Si la etapa de procesamiento comparte la misma red eléctrica que la etapa de fuerza, los picos de consumo térmico y los arranques mecánicos provocan caídas de tensión repentinas conocidas como brownouts que pueden reiniciar los microprocesadores, congelar la placa base o causar la pérdida de pasos durante el mecanizado. Para mitigar estos riesgos, la arquitectura eléctrica debe dividirse rígidamente en tres subsistemas de potencia independientes. [24]

### 8.13.2 Etapa lógica y de control (Fuente de 24V DC)

La primera fuente de voltaje está dedicada exclusivamente a la inteligencia de la máquina. Controladores industriales de Procesamiento Digital de Señales como las placas base DSP de la serie Ruida y los periféricos de seguridad con sensores tales como: finales de carrera, sensores de flujo de agua y botoneras de la interfaz HMI, operan bajo un estándar estricto de 24V en corriente continua. Al asignar una fuente conmutada independiente y filtrada para esta etapa, se garantiza que el microprocesador reciba un flujo eléctrico completamente limpio. Esto asegura que la lectura del Código G, las interpolaciones matemáticas y la emisión de los pulsos hacia los drivers se ejecuten sin fluctuaciones ni pérdida de datos [17].

Una fuente de voltaje es un dispositivo electrónico encargado de suministrar energía eléctrica a un circuito o dispositivo, entregando dicha energía en forma de corriente eléctrica con un valor de tensión específico. Este dispositivo toma una forma de energía inicial, ya sea proveniente de la red eléctrica o almacenada en una batería, y la transforma en una corriente eléctrica estable y controlada, la cual cumple con los requisitos de voltaje necesarios para el circuito o dispositivo al que se encuentra conectada [28].

**Figura 27.** Fuente de voltaje.




**Fuente:** [28]

### 8.13.3 Etapa de actuación mecánica y protección Bulk (Fuente de 36V DC)

La segunda fuente de alimentación está destinada a la fuerza bruta del sistema: los drivers y los motores paso a paso bipolares (NEMA 17 o NEMA 23). Estos actuadores exigen picos de amperaje muy elevados para mantener el par de retención magnética y vencer la inercia durante aceleraciones rápidas, por lo que suelen ser alimentados con fuentes de 36V DC o superiores. El aislamiento de esta etapa es obligatorio debido a un fenómeno físico: cuando el motor decelera o frena bruscamente, sus bobinas inductivas actúan como un generador, produciendo fuerzas contraelectromotrices que devuelven picos de alto voltaje hacia el controlador. Para contrarrestar esto, el diseño de la etapa de potencia incluye circuitos de protección pasiva Circuito Bulk, basados en capacitores electrolíticos de gran tamaño colocados en paralelo con la fuente, los cuales absorben esta energía de retorno y evitan que el voltaje residual destruya los componentes del driver [24].

La fuente de corriente continua tiene como función principal proporcionar la energía necesaria para alimentar los drivers encargados de controlar los motores de la máquina CNC. Además, permite suministrar energía a la controladora, la cual requiere una alimentación adecuada para gestionar correctamente el movimiento de los motores [29].

Para este sistema se ha seleccionado una fuente de alimentación de 24 V y 14,6 A, obteniendo una potencia aproximada de 350 W. Una de las características de esta fuente es que permite ajustar el voltaje de salida dentro de un rango aproximado de 20 V a 30 V, mediante el ajuste de una resistencia variable [29].

Aunque el voltaje nominal de los motores puede ser considerablemente menor que el voltaje suministrado por la fuente, esto no significa que los motores reciban directamente todo ese voltaje. Los drivers utilizados para su control regulan la corriente que circula por las bobinas de los motores, permitiendo trabajar de manera adecuada y segura [29].

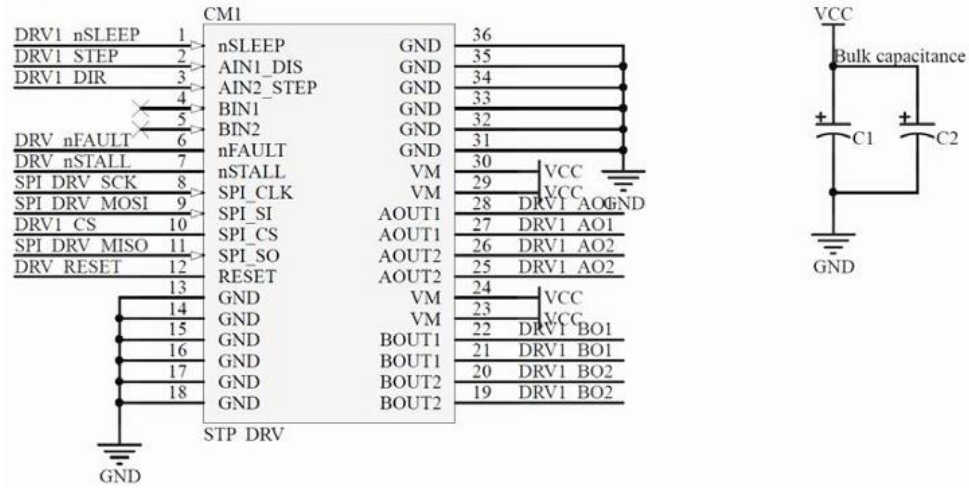
El uso de un voltaje de alimentación superior al voltaje nominal de los motores puede proporcionar ciertas ventajas en el funcionamiento del sistema, principalmente relacionadas con el aumento de la velocidad de giro y una respuesta más rápida de los motores. Además, el control adecuado de la corriente permite disminuir el calentamiento de los motores durante su funcionamiento. Por esta razón, la selección de la fuente de alimentación debe considerar tanto las características de los motores como los requerimientos de los drivers y de la controladora [29].

**Figura 28.** Fuente de voltaje.



**Fuente:** [29]

**Figura 29.** Esquemáticos de drivers y del circuito bulk.




**Fuente:** [24]

### 8.13.4 Etapa de excitación láser (Fuente de Alta Tensión - Flyback)

Finalmente, el subsistema de corte requiere una topología eléctrica completamente distinta a las dos anteriores. Para lograr excitar la mezcla de gases internos de un tubo láser de CO2 de 50W, se necesita una fuente especializada comúnmente conocida como Flyback capaz de generar un pico de ignición inicial que ronda los 20,000 voltios, descendiendo luego a un alto voltaje de trabajo continuo. Esta fuente cuenta con su propia etapa de rectificación y conmutación. Por cuestiones de seguridad industrial y prevención de arcos voltaicos, se aísla físicamente del resto de la máquina. Se comunica con la placa base Ruida únicamente mediante señales de baja potencia 5V lógicos a través de optoacopladores, recibiendo las instrucciones de disparo L-ON y la

modulación de intensida L-PWM sin mezclar jamás la alta tensión con los circuitos de control [10], [17].

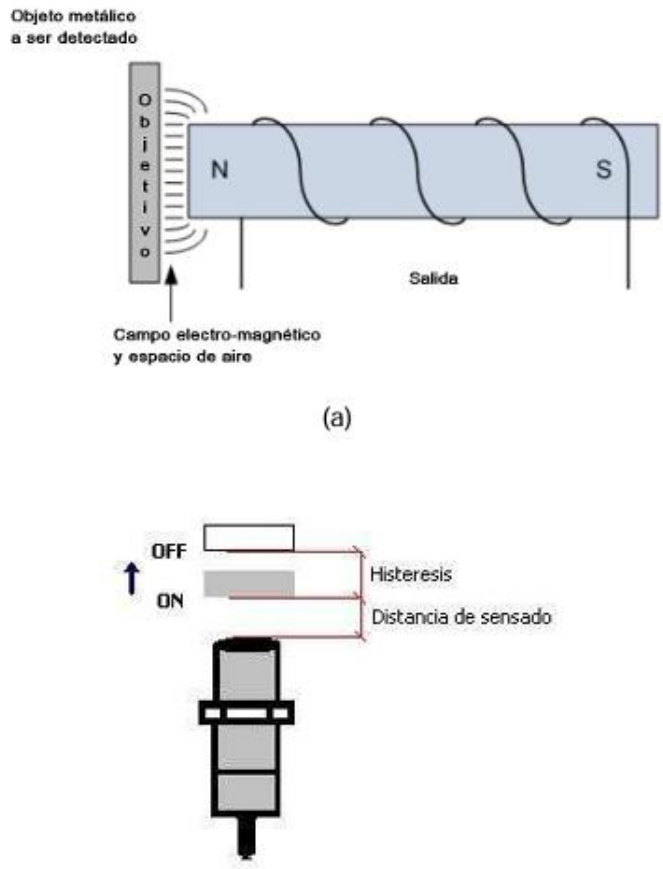
## 8.14 Elemento de seguridad y control de posición

### 8.14.1 Sensores de proximidad inductivos

En la arquitectura de las máquinas herramienta, la detección de los componentes móviles y los límites de carrera se realiza mediante sensores de proximidad inductivos, también conocidos en el ámbito del control como sensores de corriente de Eddy. La principal ventaja de estos dispositivos es que trabajan sin contacto físico directo, basando su detección en la emisión de un campo electromagnético [13].

A nivel constructivo, este tipo de sensor aloja internamente una bobina envuelta en un núcleo de hierro, formando un lazo inductivo. El principio de funcionamiento establece que cuando un material ferromagnético penetra en el área de este campo electromagnético, la inductancia de la bobina experimenta un cambio significativo. Esta variación es interpretada inmediatamente por el circuito electrónico interno del sensor, el cual produce una señal o variación en su voltaje de salida. Esta característica permite al controlador establecer posiciones precisas sin sufrir desgaste mecánico [13].

**Figura 30.** Principio del funcionamiento de un detector inductivo.




**Fuente:** [13]

### 8.14.1 Sensor de proximidad (final de carrera)

El sensor de proximidad, también conocido como sensor de contacto o interruptor de límite, es un dispositivo utilizado para detectar cuando un elemento alcanza una determinada posición. Está compuesto principalmente por un cuerpo que contiene los contactos eléctricos y un cabezal encargado de detectar el movimiento o contacto [30].

Estos sensores pueden trabajar normalmente como contactos normalmente abiertos (NA) **o** normalmente cerrados (NC). Cuando el cabezal es accionado por el movimiento de la máquina, los contactos internos cambian de estado, permitiendo enviar una señal al sistema de control [30].

En el desarrollo del proyecto se utilizaron dos sensores de final de carrera para controlar los límites de desplazamiento del motor paso a paso. Estos sensores fueron instalados sobre las bases de acrílico de aproximadamente un centímetro de espesor, como se

muestra en la Figura 8. Su función principal es detectar los extremos del recorrido de la banda y evitar que el mecanismo continúe desplazándose más allá de los límites establecidos [30].

# 9 METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

## 9.1 Tipo de investigación

El desarrollo de este proyecto se basa en una investigación aplicada y tecnológica. Básicamente, la idea no fue inventar nuevas teorías, sino usar los conocimientos que ya tenemos sobre máquinas CNC, sistemas de enfriamiento y láseres para resolver una necesidad real de la universidad. Lo que hicimos fue acoplar y configurar todos los accesorios para dejar la máquina funcionando al 100%. Esto trae un beneficio directo y bastante práctico, ya que moderniza el laboratorio de electromecánica y lo deja listo para trabajar.

Por otro lado, la validación del equipo se hizo mediante una investigación experimental. Esto significa que realizamos pruebas reales con la máquina donde fuimos cambiando la velocidad y la potencia del láser de manera un poco aleatorias. El objetivo de hacer esto era observar y anotar cómo reaccionaba el material, por ejemplo, qué tan ancho quedaba el surco Kerf y qué tanto se quemaban los bordes de la pieza la Zona Afectada por el Calor o ZAC. Todas estas pruebas las hicimos cortando planchas de MDF, acrílico y polietileno.

Finalmente, el proyecto incluye una investigación de campo dentro del laboratorio, ya que no nos quedamos solo en simulaciones de computadora. Todo el trabajo se hizo de forma física en el lugar: tomamos las medidas reales con el calibrador pie de rey, configurando dentro del software ciertos parámetros para así poder obtener el mejor resultado también ver como se movían nuestros motores de acuerdo a las medidas con el software comparado con las medidas reales que hacia la máquina para ver el margen de error que tiene y probamos que la extracción de humo funcionara bien. Al hacer todas las pruebas directamente sobre el equipo instalado, nos aseguramos de que los parámetros de corte que obtuvimos sirvan de verdad para trabajos reales.

## 9.2 Diseño experimental

El diseño experimental se llevo a cabo una mitología que constan de tres fases secuenciales, cada una de estas fases están en base con cada uno de mis objetivos específicos, pruebas que se iban a realizar con el fin de obtener un fundamento que sea aceptable y cien porcietno verificable Gracias a este enfoque de trabajo, el proyecto avanzó de manera organizada, abarcando desde la fundamentación teórica y la pruebas experimentales como también las adecuaciones termomecánico, hasta la puesta en marcha y la calibración exacta del equipo.

**Tabla 6.** Fases metodológicas del proyecto

| Fase | Nombre | Objetivo Principal | Entregable Clave |
|---|---|---|---|
| **1** | Evaluación y adecuación termomecánica | Evaluar el dimensionamiento y acoplamiento de los sistemas periféricos (refrigeración, neumática, extracción) para garantizar la seguridad operativa. | Matriz de validación termomecánica y sistemas periféricos 100% operativos. |
| **2** | Caracterización cinemática y de control | Analizar la resolución de movimiento de los ejes mecánicos y sintonizar la comunicación directa con el software de diseño CAD/CAM. | Equipo calibrado geométricamente y registros de validación de desplazamiento espacial. |
| **3** | Diseño de experimentos (DOE) y optimización paramétrica | Correlacionar las variables de corte (espesor, velocidad, potencia) para materiales de ingeniería (MDF, acrílico, polietileno). | Matriz de optimización paramétrica del proceso de corte térmico. |

**Fuente:** Los autores.

### 9.2.1 Fase 1: Evaluación y acoplamiento termomecánico

En esta primera etapa nos enfocamos en preparar físicamente la máquina para que el tubo láser de CO2 de 50W pueda trabajar por durante tiempo prolongados sin fallar y teniendo el cuidado para que su vida útil no se acorte, cuidando también que el

laboratorio de electromecánica se mantenga como un lugar seguro para todos sin ningún riegos hacia los operarios. Para dejar lista toda esta parte térmica y mecánica, dividimos la instalación en tres pasos clave:

### A. Implementación del sistema de refrigeración de lazo cerrado

Como el tubo de CO2 esta en funcionamiento genera muchísimo calor al momento de encender el gas, por lo tanto es obligatorio enfriarlo constantemente. Para lograr esto, armamos un circuito de refrigeración por agua impulsado por una bomba sumergible. El sistema funciona como un lazo cerrado: conectamos las mangueras de silicona desde el depósito de agua directo a la entrada de abajo del tubo láser, haciendo que el retorno salga por la parte de arriba. Lo conectamos de esta manera a propósito para que las burbujas de aire se purguen solas y no se queden atrapadas en el cristal. Además, nos pusimos como regla estricta que la temperatura del agua siempre debe mantenerse entre los 15 °C y 25 °C; de lo contrario, corremos el riesgo de que el tubo sufra un choque térmico y se fracture en caso contrario dependiendo del ambiente se procura enfriar el agua con dos botellas de agua congeladas hasta obtener la temperatura adecuada.

**Figura 31.** Bomba de agua modelo (GP-316) de 15W



**Fuente:** Los autores.

### B. Acoplamiento de la asistencia neumática

Para evitar que los materiales se quemen o se prendan en llamas al momento de cortarlos, y para cuidar los lentes del equipo, le instalamos un compresor de aire. Lo que hicimos fue pasar una manguera flexible de poliuretano por toda la cadena portacables de la máquina, hasta conectarla directamente en la boquilla del cabezal láser. Este chorro de aire a presión nos hace dos trabajos fundamentales: primero, sopla y expulsa todo el material derretido para que la ranura de corte Kerf quede limpia; y segundo, funciona como un escudo que impide que el humo y las salpicaduras de resina suban y ensucien el lente focal ya que si se ensucian o se empañan la quina perderá potencia a la hora de realizar un corte.

**Figura 32.** Compresor modelo (ACO_004) de 55W

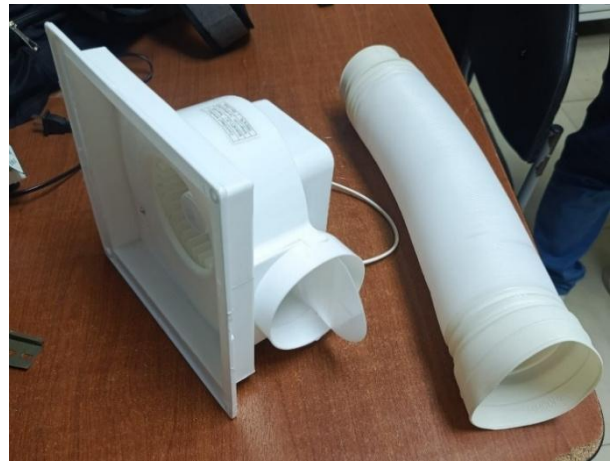



**Fuente:** Los autores.

### C. Instalación del sistema de extracción de gases

Al cortar materiales como MDF o acrílico con el láser, se genera mucho humo y polvo que hace daño respirar. Para solucionar esto, le instalamos un extractor en la parte trasera de la máquina. A este equipo le conectamos un tubo flexible corrugado que saca todo ese aire desde la cabina de corte directo hacia afuera del laboratorio. Lo que hace este sistema es succionar constantemente el humo mientras estamos trabajando. Así, evitamos que los gases tóxicos se queden encerrados en el taller y nos aseguramos de mantener un ambiente completamente seguro para todos.

**Figura 33.** Extractor de humo.



**Fuente:** Los autores.

**Validación de la Fase 1:** Antes de pasar a la configuración electrónica calibración de los motores y probar el láser, teníamos que estar completamente seguros de que nuestros tres sistemas de adecuación estaban bien instalados. Para lograrlo, preparamos una tabla de revisión donde evaluamos cómo se comportaba la máquina tanto apagada como en pleno funcionamiento.

**Protocolo de prueba en vacío y validación termomecánica:** Para comprobar que todo quedó bien acoplado, hicimos una prueba de funcionamiento continuo en el taller. Encendimos al mismo tiempo la bomba de refrigeración, el compresor de aire y el extractor de humo, y los dejamos trabajando sin parar durante 30 minutos. Durante ese tiempo, estuvimos vigilando de cerca que cada equipo funcionara bien por su cuenta y que no hubiera fallas al operar todos juntos bajo presión. Los resultados de esta prueba los dejamos anotados en la siguiente matriz de inspección:

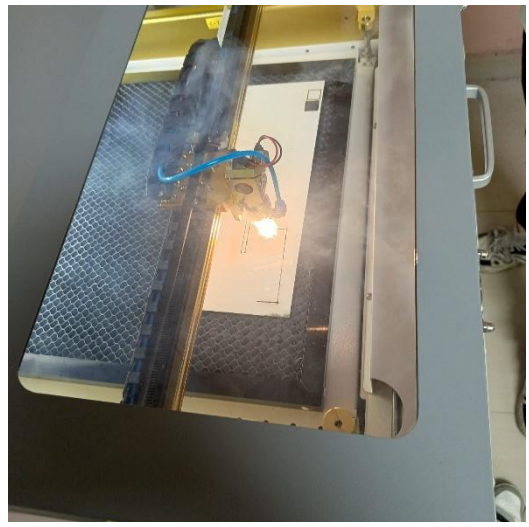
**Tabla 7.** Registro de validación de los subsistemas termomecánico.

| **Subsistema Evaluado** | **Parámetro de Control** | **Herramienta / Instrumento** | **Condición Nominal (Esperada)** | **Resultado de Validación (Prueba)** | **Estado** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Refrigeración** | Estanqueidad del circuito | Inspección visual. | 0% fugas en acoples y mangueras. | Sin presencia de goteo | Aprobado |

| Subsistema Evaluado | Parámetro de Control | Herramienta / Instrumento | Condición Nominal (Esperada) | Resultado de Validación (Prueba) | Estado |
|---|---|---|---|---|---|
| | cerrado, con pedazos de hielo. | | | en el cabezal ni en el tubo. | |
| **Refrigeración** | Temperatura de operación | Termopar / Sensor de temperatura | 15 °C – 25 °C | 18.5 °C (Mantenida durante 30 min. de prueba) | Aprobado |
| **Asistencia Neumática** | Flujo continuo en cabezal | Manómetro / Inspección táctil | Presión constante sin obstrucciones. | Flujo de aire focalizado y libre de humedad. | Aprobado |
| **Extracción de Gases** | Capacidad de succión | Prueba de humo trazador | Evacuación total del humo en la recámara. | Presión negativa correcta, sin escape de olores al exterior. | Aprobado |

**Fuente:** Los autores.

**Figura 34.** Prueba de humo trazador.



**Fuente:** Los autrores.

### 9.2.2 Fase 2: Caracterización cinemática y de control

Una vez validados los periféricos termomecánico, se procedió a la configuración del sistema de posicionamiento. El objetivo de esta fase fue garantizar que las instrucciones geométricas emitidas por el software se traduzcan en movimientos físicos exactos del cabezal láser, asegurando la correcta sintonización entre la placa controladora Ruida y los motores paso a paso NEMA 17. Esta caracterización se dividió en dos pruebas fundamentales:

#### A. Calibración Cinemática (Resolución de los Motores)

Ya con los sistemas térmicos y de ventilación validados y 100% funcionando correctamente, pasamos a configurar la parte del movimiento de mis motores haciendo comparación con las medidas de mi software con las medidas en el ámbito real. El objetivo aquí era muy claro: lograr que lo que dibujamos en la computadora sea exactamente lo que la máquina mueva en la vida real. Para eso, tuvimos que realizar una pruebas de lo que es el eje X,Y con el fin de saber si en la vida real mi motores NEMA 17 recorrían la misma distancia que se tenia en el software. Dividimos este trabajo en dos pruebas principales:

- **Lo que se diseña:** Un vector cuadrado exacto de 50.00 mm x 50.00 mm en el software CAD/CAM.

- **Lo que se demuestra:** Mandamos a trazar ese cuadrado a una potencia bien baja y luego medimos el resultado físico con el calibrador pie de rey. Con esto comprobamos si los motores de verdad estaban recorriendo la distancia que les dictaba el Código G. Si notábamos algún margen de error por ejemplo, que midiera 49.8 mm en el eje X y 50.1 mm en el eje Y, entrábamos al panel del controlador y ajustábamos los parámetros hasta que la medida saliera perfecta. Con esto dejamos confirmada la correcta comunicación entre la placa base y los drivers de potencia.

**Figura 35.** Calibración dimensional de los X,Y.



**Fuente:** Los autores.

### B. Evaluación del Comportamiento Dinámico y Holgura Mecánica

En la práctica, hacer que la máquina corte en línea recta es fácil porque el movimiento es constante. El verdadero desafío mecánico está en las curvas o cuando hace cambios bruscos de dirección. En esos momentos, los motores de los ejes X e Y tienen que trabajar al mismo tiempo, acelerando y frenando de manera coordinada. Si las bandas de distribución que tiene la maquina están muy flojas lo que crea un juego mecánico u holgura, si están demasiado tensas, o si la estructura vibra porque el cabezal se mueve muy rápido, el corte va a salir torcido. Por eso, el objetivo de esta prueba fue comprobar que el chasis y las correas que tienen la maquina soportaran bien estos movimientos bruscos sin deformar la pieza.

- **Lo que se diseña:** En el programa en RDWorks dibujamos una trayectoria de prueba que tenía de todo un poco: líneas rectas largas, círculos perfectos y esquinas con ángulos rectos de 90 grados.
- **Lo que se demuestra:** Mandamos a cortar este diseño para ver si el equipo tenía alguna falla física al moverse. Si al terminar de cortar veíamos que el círculo salía ovalado, o que las esquinas quedaban redondeadas y con marcas de vibración, era evidente que teníamos un problema con la tensión de las correas o que la máquina iba muy rápido. Al notar esto, ajustábamos la tensión de las bandas a mano y le bajábamos

**Validación de la Fase 2:** Para comprobar que el ajuste de los motore de acuerdo a mi software fue exitoso antes de pasar a la experimentación termodinámica con materiales, se ejecutó una prueba de repetibilidad bajo los siguientes parámetros de control:

**Tabla 8.** Registro de validación de caracterización cinemática.

| Parámetro Evaluado | Condición de Prueba | Herramienta de Medición | Tolerancia Aceptable | Resultado de Prueba | Estado |
|---|---|---|---|---|---|
| **Precisión dimensional (Eje X)** | Vector de 50.00 mm | Calibrador Pie de Rey | ± 0.1 mm | 50.1 mm | **Aprobado** |
| **Precisión dimensional (Eje Y)** | Vector de 50.00 mm | Calibrador Pie de Rey | ± 0.1 mm | 50.1 mm | **Aprobado** |
| **Holgura mecánica** | Trazado de círculo de Ø 30 mm | Calibrador Pie de Rey | Diferencia entre ejes < 0.2 mm | 0.01 mm | **Aprobado** |

**Fuente:** Los autores.

### 9.2.3 Fase 3: Diseño de experimentos (DOE) y optimización paramétrica

Una vez que terminamos de acoplar todos los accesorios y dejamos los ejes perfectamente calibrados, pasamos a la fase de las pruebas reales. El objetivo de esta etapa era ver en la práctica cómo la velocidad de la máquina y la potencia del láser afectaban la calidad final de la pieza, fijándonos especialmente en dos cosas: el ancho

del surco que deja el láser Kerf y qué tanto se queman los bordes Zona Afectada por el Calor o ZAC.

La idea final de todo esto era armar una tabla de parámetros óptimos para cortar tres materiales muy usados en la industria: MDF de 3.0, 4.0 y 5.5 mm, acrílico de 2.0, 3.0 y 5.0 mm y polietileno de 2.0, 3.0 y 5.0 mm. Un detalle importante es que las pruebas con los grosores de 5.0 mm y 5.5 mm las hicimos para llevar el equipo al límite. Como las especificaciones teóricas de la máquina nos garantizaban un corte óptimo solo hasta los 4.0 mm, queríamos evaluar la capacidad real de penetración del tubo láser exigiéndolo al máximo de estrés térmico.

Para lograr todo esto, estructuramos nuestro diseño experimental evaluando los siguientes puntos:

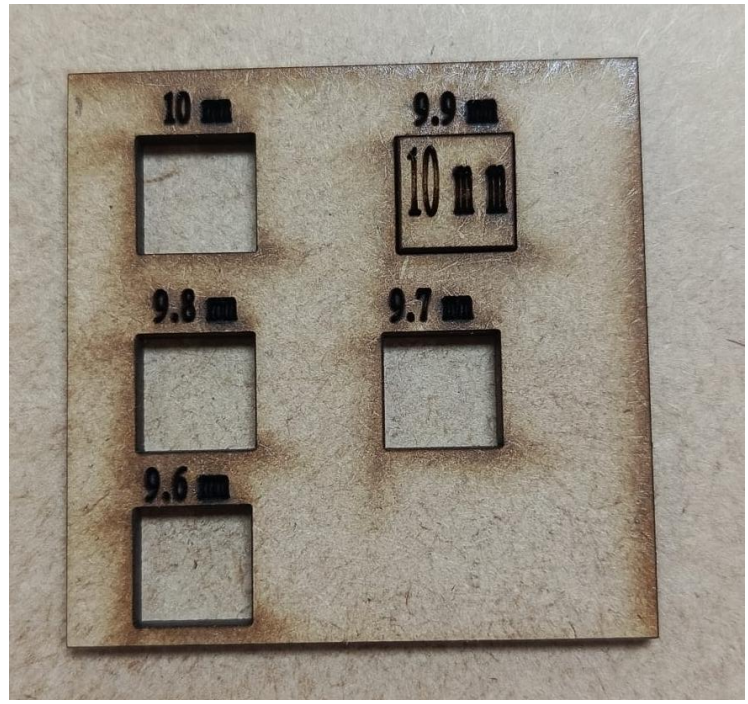
### A. Determinación del ancho de corte (Kerf) y pruebas de encaje

En la práctica, cuando el rayo láser atraviesa una plancha, no hace un corte invisible; en realidad quema y evapora una línea muy fina de material. Ese material que desaparece y se vuelve humo deja un pequeño espacio vacío al que llamamos Kerf (ancho de corte). Si no tomamos en cuenta esta pérdida, cualquier pieza que diseñemos para que encaje a presión como un rompecabezas nos va a quedar floja, porque físicamente será un poco más pequeña que nuestro dibujo en la computadora. El objetivo de esta prueba era encontrar exactamente cuánto material se come el láser, para que el operador del laboratorio sepa cuánto debe compensar en el programa antes de cortar.

- **Lo que se diseña:** En el software RDWorks o en cualquier otro software externo como Inventor, SolidWorks o AutoCAD etc, dibujamos dos piezas de prueba tipo macho y hembra. La pieza macho era un cuadradito exacto de 10.0 mm x 10.0 mm. La pieza hembra era una base con varios agujeros cuadrados en el centro que iban achicándose poco a poco: 10.0 mm, 9.9 mm, 9.8 mm, 9.7 mm y 9.6 mm.
- **Lo que se demuestra:** Mandamos a cortar estas piezas y luego empezamos a probar metiendo el cuadradito macho en los distintos agujeros de la hembra. El agujero donde el macho entraba a presión perfecta nos daba matemáticamente el

Kerf. Por ejemplo, si nuestro cuadradito diseñado de 10.0 mm encajaba exacto en el agujero dibujado de 9.8 mm, comprobábamos físicamente que el láser se consumió 0.2 mm de material. Ese es el valor exacto de compensación geométrica que hay que usar para los futuros trabajos.

**Figura 36.** Probeta de caja y espiga para la determinación empírica del Kerf y tolerancias de ensamble.




**Fuente:** Los autores.

### B. Análisis del acabado y la Zona Afectada por el Calor (ZAC)

Cuando la máquina corta en línea recta, el láser avanza rápido y deja un borde bastante limpio. El verdadero problema térmico lo notamos en las esquinas, en los ángulos muy cerrados o en las curvas. En esas partes, la máquina por pura física tiene que frenar un poco para poder cambiar de dirección. Al ir más lento, el rayo láser pasa más tiempo quemando el mismo punto un poco mas de tiempo, lo que termina quemando un poco o derritiendo de más los bordes del material. A esto lo conocemos técnicamente como Zona Afectada por el Calor (ZAC). El objetivo de esta prueba fue revisar a ojo cómo quedaba el acabado de las piezas para poder afinar las velocidades directamente en el controlador.

- **Lo que se diseña:** En el software de RDWorks dibujamos una pieza de prueba probeta que era un cuadrado exterior de 100 mm x 100 mm. Adentro le pusimos una estrella para probar cómo cortaba las esquinas bien en punta, y un círculo para ver cómo le iba con las curvas continuas.
- **Lo que se demuestra:** Al cortar esta probeta, se inspeccionan físicamente los bordes. Si los vértices de la estrella presentan un exceso de carbonización, se evidencia una sobreexposición térmica por desaceleración. Esto justifica la necesidad de ajustar las rampas de aceleración o la potencia mínima en el controlador Ruida para garantizar cortes limpios en geometrías complejas.

**figura 37.** Verificación metrológica del desplazamiento cinemático en los ejes cartesianos mediante grabado superficial.



**Fuente:** Los autores.

## C. Ejecución de la Matriz de Optimización Paramétrica

### 1. Análisis termodinámico en Tableros de Fibra de Densidad Media (MDF)

Nuestras primeras pruebas de configuración las hicimos sobre planchas de MDF. Como este material está hecho a base de madera, al pasarle el láser no se derrite, sino que se quema y se evapora de golpe. Por esta razón, encontrar los parámetros ideales fue un trabajo de puro equilibrio: si hacíamos que la máquina avanzara muy lento o le metíamos demasiada potencia, la Zona Afectada por el Calor (ZAC) crecía rapidísimo. El

resultado era que los bordes quedaban totalmente carbonizados y el surco de corte (Kerf) se hacía mucho más ancho de lo normal.

Para solucionar esto, armamos las siguientes tablas. Ahí dejamos anotados los valores exactos que encontramos para que la máquina corte el material de una sola pasada, dejando los bordes lo más limpios y menos quemados posible.

**Tabla 9.** Matriz de optimización paramétrica (Material: MDF / Espesor: 3.0 mm)

| **Prueba** | **Velocidad de Avance (mm/s)** | **Potencia Láser (%)** | **Ancho de Corte - Kerf (mm)** | **Calidad del borde (ZAC)** | **Estado / Observación** |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 30 | 45 | - | Corte superficial (no traspasa) | **Rechazado** (Velocidad excesiva) |
| **02** | 25 | 45 | - | Corte incompleto en cara inferior | **Rechazado** |
| **03** | 15 | 25 | 0.15 | Limpio, color caramelo uniforme | **ÓPTIMO** (Punto dulce) |
| **04** | 15 | 30 | 0.18 | Ligeramente tostado | **Aceptable** |
| **05** | 10 | 50 | 0.22 | Carbonizado moderado, humo visible | **Rechazado** (Velocidad muy baja) |

**Fuente:** Los autores.

**Tabla 10.** Matriz de optimización paramétrica (Material: MDF / Espesor: 4.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 20 | 55 | - | Corte incompleto | **Rechazado** |
| **02** | 10 | 30 | 0.16 | Desprendimiento con ligera resistencia | **Aceptable** |
| **03** | 15 | 35 | 0.18 | Borde tostado regular, sin escoria | **ÓPTIMO** |
| **04** | 10 | 60 | 0.22 | ZAC extensa, marcas de quemadura | **Rechazado** |
| **+— +05** | 8 | 60 | 0.25 | Carbonizado severo | **Rechazado** |

**Fuente.** Los autores.

**Tabla 11.** Prueba limite operativo (Material: MDF / Espesor: 5.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 10 | 80 | - | Ranura profunda pero incompleta | **Rechazado** |
| **02** | 8 | 80 | 0.22 | Corte forzado, requiere presión manual | **Rechazado** |
| **03** | 6 | 80 | 0.28 | Carbonizado moderado a severo | **Aceptable al límite** |

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **04** | 4 | 85 | 0.32 | Carbonizado severo, pérdida geométrica | **Límite operativo superado** |
| **05** | 3 | 85 | 0.38 | Riesgo de ignición, borde destruido | **Rechazado** |

**Fuente.** Los autores.

**Figura 38.** Degradación térmica severa (Prueba rechazada)



**Fuente:** Los autores.

**Figura 39.** Acabado óptimo.



**Fuente:** Los autores.

## 2. Análisis termodinámico en Acrílico

Después de encontrar los parámetros ideales para la madera (MDF), pasamos a hacer las pruebas con los plásticos rígidos. El acrílico reacciona de una forma muy distinta al rayo láser. Como es un material sintético y no tiene fibras, no se carboniza ni se quema; lo que hace el láser es derretirlo y evaporarlo súper rápido.

El desafío con este material es que, si le metíamos mucho calor, la pieza se derretía de más y se deformaba. Por eso, en las siguientes tablas dejamos anotada la calibración optima que tuvimos que hacer para controlar la temperatura. El objetivo principal que logramos con estos ajustes fue que los bordes del corte no quedaran deformes o blanquecinos, sino súper lisos, pulidos y totalmente transparentes.

**Tabla 12.** Matriz de optimización paramétrica (Material: Acrílico / Espesor: 2.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 50 | 35 | - | Corte superficial, no traspasa | **Rechazado** |
| **02** | 20 | 35 | 0.12 | Borde estriado, opaco y rugoso | **Aceptable** |
| **03** | 20 | 30 | 0.15 | Corte limpio, borde liso y brillante | **ÓPTIMO** (Punto dulce) |
| **04** | 15 | 50 | 0.18 | Ligero derretimiento en esquinas | **Aceptable** |
| **05** | 10 | 55 | 0.22 | Borde derretido, deformación térmica | **Rechazado** (Velocidad muy baja) |

**Fuente.** Los autores.

**Tabla 13.** Matriz de optimización paramétrica (Material: Acrílico / Espesor: 3.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 20 | 60 | - | Corte incompleto en cara inferior | **Rechazado** |
| **02** | 15 | 30 | 0.15 | Borde con ligeras estrías verticales | **Aceptable** |

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **03** | 15 | 35 | 0.18 | Borde totalmente transparente y liso | **ÓPTIMO** |
| **04** | 10 | 65 | 0.22 | Deformación térmica leve en vértices | **Rechazado** |
| **05** | 8 | 65 | 0.26 | Aparición de burbujas, exceso de material fundido | **Rechazado** |

**Fuente.** Los autores.

**Tabla 14.** Prueba de limite operativo (Material: Acrílico / Espesor: 5.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 10 | 75 | - | Ranura profunda pero no traspasa | **Rechazado** |
| **02** | 8 | 75 | 0.18 | Corte forzado, requiere presión para separar | **Aceptable al límite** |
| **03** | 6 | 80 | 0.22 | Borde liso y pulido, excelente acabado | **ÓPTIMO** |
| **04** | 4 | 80 | 0.28 | Derretimiento visible, pérdida de tolerancia | **Rechazado** |

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **05** | 2 | 85 | 0.35 | Llama visible, material arruinado térmicamente | **Límite operativo superado** |

**Fuente.** Los autores.

### 3. Análisis termodinámico en Polietileno

Posterior a la optimización paramétrica del acrílico, la validación operativa concluye con la evaluación del polietileno. Este material termoplástico, caracterizado por un punto de fusión significativamente menor, exige un control riguroso de la velocidad de avance para evitar quemaduras severas en la ranura soldadura térmica y la acumulación excesiva de rebaba. Las tablas a continuación establecen la ventana operativa óptima para superar estas limitantes intrínsecas del material, garantizando una separación geométrica limpia.

***Tabla 15.*** Matriz de optimización paramétrica (Material: Polietileno / Espesor: 2.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 35 | 45 | - | Corte superficial, no traspasa | **Rechazado** |
| **02** | 30 | 45 | 0.14 | Corte con ligera rebaba superior | **Aceptable** |
| **03** | 30 | 25 | 0.16 | Borde limpio, sin adherencia | **ÓPTIMO** (Punto dulce) |

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **04** | 20 | 50 | 0.20 | Borde engrosado por fusión | **Rechazado** |
| **05** | 15 | 50 | - | Pieza soldada nuevamente por calor | **Rechazado** (Velocidad muy baja) |

**Fuente.** Los autores.

**Tabla 16.** Matriz de optimización paramétrica (Material: Polietileno / Espesor: 3.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 25 | 55 | - | Corte incompleto en cara inferior | **Rechazado** |
| **02** | 20 | 55 | 0.16 | Presencia de hilos de plástico finos | **Aceptable** |
| **03** | 30 | 20 | 35 | Borde uniforme, rebaba mínima | **ÓPTIMO** |
| **04** | 12 | 60 | 0.24 | Deformación térmica en los vértices | **Rechazado** |
| **05** | 8 | 60 | 0.30 | Fusión severa, pérdida de geometría | **Rechazado** |

**Fuente.** Los autores.

**Tabla 17.** Prueba de limite operativo (Material: Polietileno / Espesor: 5.0 mm)

| Prueba | Velocidad de Avance (mm/s) | Potencia Láser (%) | Ancho de Corte - Kerf (mm) | Calidad del borde (ZAC) | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 12 | 75 | - | Ranura profunda con material fundido | **Rechazado** |
| **02** | 10 | 75 | 0.22 | Corte forzado, rebaba gruesa | **Aceptable al límite** |
| **03** | 15 | 35 | 0.26 | Borde fundido regular, separación limpia | **ÓPTIMO** |
| **04** | 6 | 80 | 0.34 | Exceso de fusión, esquinas redondeadas | **Rechazado** |
| **05** | 4 | 85 | 0.42 | Riesgo de ignición, goteo de material | **Límite operativo superado** |

**Fuente.** Los autores.

### D. Análisis paramétrico para marcado y grabado superficial

A diferencia del corte, donde el objetivo es traspasar el material con una alta concentración térmica a baja velocidad, el grabado superficial requiere la cinemática inversa. Se busca una alta velocidad de desplazamiento combinada con una baja potencia del tubo láser para generar un desgaste, decoloración o texturizado térmico únicamente en la capa superior del sustrato, sin comprometer su integridad estructural. Este proceso es fundamental para la rotulación, identificación y trazabilidad de las piezas mecánicas.

- **Lo que se diseña:** En el software de control RDWorks se importa un diseño de vectores cerrados como texto o logotipos institucionales y se configura la capa de trabajo en modo Barrido/Grabado en lugar de modo Corte.
- **Lo que se demuestra:** Al ejecutar el grabado sobre los diferentes sustratos, se evalúa visualmente el nivel de contraste, la legibilidad geométrica y la profundidad del surco. Esto permite estandarizar los parámetros para que el usuario del equipo logre marcados nítidos sin causar ignición en la superficie.

**Tabla 18.** Matriz de optimización para grabado superficial (Material: MDF)

| Prueba | Velocidad de Barrido (mm/s) | Potencia Láser (%) | Nivel de Contraste | Calidad visual y táctil | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 150 | 20 | Excesivo (Negro carbón) | Surco muy profundo, exceso de hollín, pérdida de detalles finos. | **Rechazado** |
| **02** | 200 | 25 | Alto (Café oscuro) | Buena legibilidad, pero deja residuos de polvo quemado al tacto. | **Aceptable** |
| **03** | 200 | 20 | Óptimo (Café tostado) | Letras nítidas, bordes definidos, superficie lisa y sin hollín. | **ÓPTIMO** |
| **04** | 400 | 10 | Muy bajo (Casi invisible) | El láser apenas decolora la superficie, texto difícil de leer. | **Rechazado** |

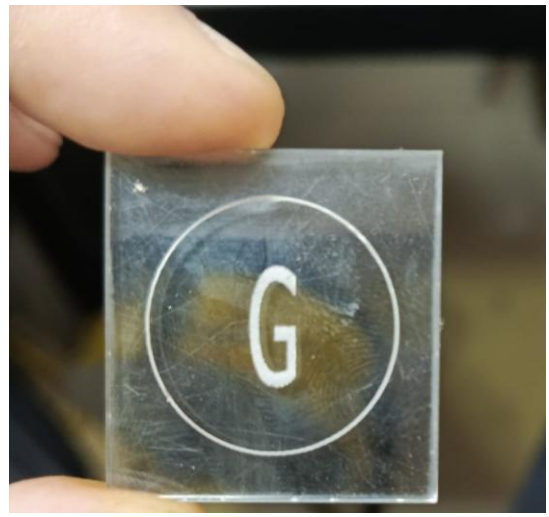
**Fuente.** Los autores.

**Tabla 19.** Matriz de optimización para grabado superficial (Material: Acrílico).

| Prueba | Velocidad de Barrido (mm/s) | Potencia Láser (%) | Nivel de Contraste | Calidad visual y táctil | Estado / Observación |
|---|---|---|---|---|---|
| **01** | 150 | 25 | Alto (Profundo) | Exceso de calor funde el surco, bordes derretidos y pérdida de resolución. | **Rechazado** |
| **02** | 150 | 15 | Medio (Esmerilado) | Acabado aceptable, aunque se siente ligeramente rugoso al tacto. | **Aceptable** |
| **03** | 150 | 13 | Óptimo (Blanco mate) | Efecto "Frost" (congelado) impecable, liso al tacto, excelente contraste. | **ÓPTIMO** |
| **04** | 300 | 15 | Muy bajo (Transparente) | Grabado irregular, el láser no alcanza a opacar la superficie de forma pareja. | **Rechazado** |

**Fuente.** Los autores.

**Figura 40.** Inspección visual de los resultados óptimos de contraste y textura en grabado superficial por barrido sobre sustratos de diferente densidad.




**Fuente.** Los autores.

# 10 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## 10.1 Resumen de la Ejecución Experimental

Poner a funcionar la cortadora láser CO2 de 50W en el laboratorio no se trató solo de conectar la máquina y sus aparatos externos, sino de asegurarnos de que todo el equipo trabaje de forma segura, estable y con medidas 100% reales. Para lograr esto, dividimos el trabajo práctico en el taller en tres fases:

### 10.1.1 Adecuación Termomecánica y Seguridad (Fase 1)

Antes de lanzar el primer rayo láser, lo más urgente era proteger el tubo de vidrio de 50W, porque genera un calor tremendo al encenderse. Como la máquina ya venía ensamblada, nuestro trabajo aquí fue acoplar todo el sistema periférico. Para que el cristal no se trizara por el sobrecalentamiento, armamos el circuito cerrado con la bomba de agua y estando en constante vigilancia en ciertos momento poniendo pedazos de hielo y así manteniendo el agua en la temperatura adecuada, logrando que el tubo trabajara siempre fresco (entre 15 °C y 25 °C). Además, le adaptamos el compresor de aire directo a la maquina donde tenía una conexión directa a la boquilla del láser; ese chorro a

presión es clave para empujar la basura del corte y evitar que el humo nos ensucie el lente. Para rematar la seguridad, conectamos el extractor de gases en la parte de atrás, sacando todo el humo tóxico del laboratorio. Con esto, el equipo quedó listo para aguantar horas de trabajo sin poner en riesgo nuestra salud.

### 10.1.2 Calibración del Movimiento o Cinemática (Fase 2):

De nada sirve tener un láser si corta chueco o fuera de medida. Así que en esta etapa nos metimos con el cerebro de la máquina el controlador Ruida y los motores paso a paso. En palabras sencillas, le enseñamos a la máquina a moverse exacto. Cortamos un montón de cuadrados y círculos de prueba y los fuimos midiendo uno por uno con el calibrador pie de rey. Jugamos con los parámetros del sistema hasta que logramos lo ideal: si en el software dibujábamos algo de 50 mm, el láser nos cortaba exactamente 50 mm físicos, casi sin margen de error.

### 10.1.3 Pruebas de Corte y Optimización (Fase 3):

Esta fue la etapa de pura prueba y error en el laboratorio. Agarramos los tres materiales que más vamos a usar en el laboratorio MDF, acrílico y polietileno en distintos grosores y nos pusimos a cortar. La meta no era solo que el láser lograra pasar al otro lado de la plancha, sino que el borde quedara con un acabado estético y profesional. Aquí medimos un detalle clave llamado Kerf, que es ese milímetro de material que el láser evapora al cortar. Saber esto es importante para que cuando los compañeros diseñen piezas que van ensambladas a presión, no les queden flojas o queden más pequeñas. Al final, fuimos descartando todas las velocidades y potencias que nos dejaban la madera negra o los plásticos derretidos, y nos quedamos solo con los valores que daban un corte de muy buena calidad.

## 10.2 Matriz Consolidada de Parámetros Óptimos y Límites Operativos

Todo ese esfuerzo y material gastado en las pruebas de la Fase 3 lo resumimos en la siguiente tabla general. En la práctica, esta matriz viene a ser el manual de configuración rápida para la máquina. La idea es que cualquier estudiante o profesor que venga a usar el láser no tenga que estar adivinando parámetros ni quemando material a ciegas. En esta tabla ya les dejamos la combinación exacta de velocidad y potencia para que el MDF, el acrílico y el polietileno se corten de manera perfecta y con buenos resultados.

Además, pusimos a propósito las pruebas que hicimos con los materiales más gruesos de 5.0 mm para dejar por escrito hasta dónde da el límite real del láser de 50W y que también no se debe de llevar hasta ese punto para asi garantizar la vida útil del tubo de CO2. Así, el operador sabrá exactamente hasta qué punto puede exigirle a la máquina sin quemar la pieza o poner en riesgo el tubo.

**Tabla 20.**Matriz general de parámetros óptimos y límites para corte y grabado (Tubo CO2 - 50W).

| **Proceso** | **Material** | **Espesor (mm)** | **Velocidad (mm/s)** | **Potencia Láser (%)** | **Kerf Promedio (mm)** | **Acabado Resultante** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Corte** | MDF | 3.0 | 15 | 25 | 0.15 | Borde limpio, color caramelo |
| **Corte** | MDF | 4.0 | 15 | 35 | 0.18 | Borde tostado, sin escoria |
| **Corte** | MDF | 5.0 | 6 | 80 | 0.28 | Límite operativo (Carbonizado) |
| **Corte** | Acrílico | 2.0 | 20 | 30 | 0.15 | Borde liso y brillante |
| **Corte** | Acrílico | 3.0 | 15 | 35 | 0.18 | Totalmente transparente |
| **Corte** | Acrílico | 5.0 | 6 | 80 | 0.22 | Liso y pulido perfecto |
| **Corte** | Polietileno | 2.0 | 30 | 25 | 0.16 | Limpio, sin adherencia |
| **Corte** | Polietileno | 3.0 | 20 | 25 | 0.18 | Uniforme, rebaba mínima |

| Proceso | Material | Espesor (mm) | Velocidad (mm/s) | Potencia Láser (%) | Kerf Promedio (mm) | Acabado Resultante |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Corte** | Polietileno | 5.0 | 15 | 35 | 0.26 | Fundido regular, separación |
| **Grabado** | MDF | N/A | 200 | 15 | N/A | Café tostado, excelente nitidez |
| **Grabado** | Acrílico | N/A | 150 | 15 | N/A | Blanco mate (efecto frost) |

**Fuente:** Los autores

### 10.3 Análisis dimensional y pérdida de material (Kerf)

Después de hacer las pruebas de encaje con las piezas macho y hembra el cuadradito de 10 mm, comprobamos en la práctica que el rayo láser no hace un corte invisible o de grosor cero. El calor tan intenso evapora una pequeña línea de material dejando un surco vacío, y durante los cortes descubrimos que este espacio cambia de tamaño por dos factores clave: el grosor de la plancha y cuánta potencia le exijamos a la máquina.

Al revisar nuestra tabla de resultados, notamos un patrón muy claro. Cuando cortamos materiales delgados (de 2.0 mm o 3.0 mm) como el acrílico o el MDF, el cabezal avanza rápido y esa ranura de corte (Kerf) se mantiene súper fina y estable, rondando apenas los 0.15 mm o 0.16 mm.

Sin embargo, la situación térmica cambia por completo cuando trabajamos con las planchas gruesas de 5.0 mm. Para que el láser de 50W logre pasar al otro lado, tuvimos que bajar drásticamente la velocidad y subir la potencia hasta el 80%. Al pasar el rayo láser de forma tan lenta y concentrando tanta energía en un solo punto, la ranura lógicamente fue mas ancha, llegando a comerse hasta 0.28 mm de material en el MDF y 0.26 mm en el polietileno.

### 10.4 Aplicación práctica en el laboratorio

Estos resultados nos dejan una conclusión muy clara: no existe un solo número mágico de compensación que sirva para todo en esta máquina. Si los compañeros del laboratorio necesitan fabricar piezas que encajen a presión perfecta, tienen que revisar obligatoriamente nuestra tabla para saber cuánto material se va a quemar dependiendo del grosor que vayan a cortar.

Una vez que tengan ese dato, deben ingresarlo en su programa de diseño como Autodesk Inventor o SolidWorks. Así, el software compensa la medida asi realizando el dibujo un poco más grande para reponer esa línea de corte que el láser se va a comer. Si no se toman en cuenta estas medida de la perdida de material, las piezas ensambladas sobre todo en los materiales gruesos, siempre les van a quedar flojas o con juego mecánico.

## 11 IMPACTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y TÉCNICOS

### 11.1 Impacto Técnico

Lo principal aquí es que logramos modernizar nuestro laboratorio de Ingeniería Electromecánica. Antes, para fabricar cosas, tocaba hacerlo a mano o con máquinas tradicionales, y ahora por fin dimos el salto a usar programas de computadora conectados directo a una máquina láser CNC.

Y no fue solo enchufar la máquina y ya. Le instalamos todo lo necesario para que no se recaliente la bomba de agua, la manguera de aire y el extractor de humo, así que ahora puede trabajar horas seguidas sin dañarse. Además, como calibramos súper bien los motores y dejamos listos los parámetros, la máquina realizara cortes exactos, sin que las piezas queden flojas o chuecas. Básicamente, le dejamos a la universidad un equipo funcionando como si fuera de una gran industria.

### 11.2 Impacto Social

En la parte social y académica, este proyecto es una gran ventaja que beneficia directamente a toda la comunidad de estudiantes y profesores de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas. Al dejar la máquina 100% operativa y acompañada de

nuestra tabla de parámetros ya calibrada, estamos dejando lista y dando a conocer el uso de esta tecnología.

Esto significa que los estudiantes de los primeros semestres ya no van a tener que enfrentarse a la frustración de operar la máquina a ciegas, ni correr el riesgo de sufrir algún accidente y sabiendo el debido parámetro para que la maquina funciones en las adecuaciones correcta si que sufra daños el tubo laser, porque ya cuentan con una guía segura y probada a seguir. Además, al dejar instalado el sistema de extracción de gases, nos aseguramos de que el laboratorio sea un ambiente de trabajo que cumple con todas las normas de salud necesarias. Así protegemos las vías respiratorias de cualquier operador, evitando que respiren el humo tóxico que se genera cuando se queman los plásticos y las maderas.

### 11.3 Impacto Económico

El impacto económico de tener esta cortadora láser funcionando se resume en un beneficio altamente positivo: el ahorro directo a la hora de necesitar algún trabajo donde se requiere un corte grabado o marcado. Antes, cuando los estudiantes necesitaban fabricar piezas complejas, maquetas o prototipos para sus tesis o proyectos de semestre, les tocaba buscar locales terciarios para que nos realicen este tipo de funciones, pagando dinero de sus bolsillos por horas de servicio en talleres privados. Al tener este equipo disponible directamente en nuestro laboratorio universitario, ese gasto desaparece casi por completo para todos los compañeros.

Por otro lado, la matriz de configuraciones que desarrollamos evita que la gente esté adivinando cómo cortar a base de prueba y error provocando perdidas de materiales por no saber en qué potencia y velocidades trabajar. Esto se traduce en un ahorro gigante de dinero al momento de usar materiales que son costosos, como las planchas de acrílico o el MDF. Ya nadie va a desperdiciar material botándolo a la basura por culpa de cortes que salieron defectuosos, derretidos o carbonizados.

# 12 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

## 12.1 Presupuesto de la maquina láser y modulo

**Tabla 21.** Presupuesto total.

| CANTIDAD | MATERIALES | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|---|---|---|---|
| 1 | Maquina làser | 1700 | 1700 |
| 4 | Garrucha 4" 110M | 3.75 | 15.00 |
| 4 | Tubo Cuadrado 25x25 | 11.90 | 47.60 |
| 4 | Tool Galvanizado | 19.15 | 76.60 |
| 3 | Esmalte Blanco (Pintura Blanca) | 5.15 | 15.45 |
| 2 | Diluyente Laca | 1.80 | 3.60 |
| 1 | Wash Primer 500 | 11.00 | 11.00 |
| 1 | Tubo Cuadrado 20x20 | 10.40 | 10.40 |
| 1 | Bisagra 3/8"x3 A | 0.80 | 0.80 |
| 1 | Seguro para puerta | 1.50 | 1.50 |
| 3 | Agarraderas para cajones | 1.25 | 3.75 |
| 4 | Rieles para cajones (pares) | 5.00 | 20.00 |
| **TOTAL** | | | **1905.7** |

**Fuente:** *Los autores*

## 12.2 Materiales donados por la universidad.

| CANTIDAD | MATERIALES |
|---|---|
| 1 | CPU I7 |
| 1 | TECLADO |
| 1 | MONITOR |
| 1 | MOUSE |

**Fuente:** *Los autores*

# 13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 13.1 Conclusiones

Primero, concluimos que conectar bien la bomba de agua, el aire y el extractor no es algo opcional, sino totalmente obligatorio para que la máquina no sufra daños. Logramos que el tubo láser trabaje siempre fresco entre 15 °C y 25 °C, y comprobamos que el aire y el extractor hacen un trabajo excelente manteniendo limpio el lente y sacando todo el humo tóxico del taller.

Segundo, comprobamos que el cerebro de la máquina la tarjeta controladora Ruida se entiende a la perfección con los programas que usamos en la carrera, como Inventor o

SolidWorks. Al calibrar los motores, demostramos que la máquina corta en la vida real casi exactamente lo que dibujamos en la computadora, con un error mínimo de menos de 0.1 milímetros. Esto es fundamental para que las piezas no queden chuecas ni con juego mecánico.

Tercero, nos dimos cuenta de que para que un corte salga limpio y de buena calidad si que sufra quemaduras, todo depende de combinar bien la velocidad y la potencia según el material. Con las pruebas que hicimos en MDF, acrílico y polietileno, logramos controlar qué tanto se queman los bordes y medimos exacto cuánto material se hace humo al cortar Kerf. Con la tabla de parámetros que dejamos armada, los estudiantes ya no van a tener que estar adivinando y los cortes les saldrán bien desde el primer intento.

### 13.2 Recomendaciones

Recomendamos cambiar el agua destilada del depósito cada mes. Si no se hace, el agua se puede llenar de algas, lo que podría causar daños o llenarse de inpurezas en el tubo láser. También es clave enseñarle a quienes vayan a usar la máquina cómo limpiar los espejos y el lente principal usando un pedazo de tela de microfibra que usualmente de usan en las ópticas; así evitamos que el rayo pierda potencia y pueda trabajar con la mayor eficiencia.

Sugerimos fuertemente a los profesores y estudiantes que, cuando vayan a diseñar piezas que deban encajar a presión como engranajes o uniones, miren sí o sí nuestra tabla de configuraciones. Tienen que compensar el grosor que se come el láser Kerf directamente en su dibujo en la computadora antes de mandarlo a cortar si se saltan este paso, las piezas les van a quedar flojas y bailando.

Por último, aunque en nuestras pruebas comprobamos que la máquina sí avanza a cortar plásticos gruesos de 5.0 mm, recomendamos no hacerlo por costumbre o de manera continua. Trabajar con el láser al 80% de su capacidad a cada rato va a desgastar y dañar el tubo súper rápido. Para las prácticas normales de laboratorio en la carrera, lo más sano para el equipo es utilizar siempre materiales de 2.0 mm o máximo 3.0 mm.

# 14 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] R. Caiminagua y K. Guadalupe, «Desarrolo de maquina CNC de corte laser con materiales de bajo costo», Thesis, Universidad Politécnica Saleciana Sede: Guayaquil, Guayaquil-Ecuador, 2022. Accedido: 18 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: [https://dspace.ups.edu.ec/](https://dspace.ups.edu.ec/)

[2] A. Pérez, «DISEÑO DE UNA CORTADORA LÁSER CNC DE CO2 PARA ACRÍLICOS Y MADERA», Thesis, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Lima, 2015. Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/)

[3] J. Duchi y B. Saguay, «DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE AJUSTE FOCAL PARA MÁQUINAS CNC DE CORTE LÁSER CO2 Y SU IMPLEMENTACIÓN PILOTO EN LA EMPRESA INNOKEY UBICADA EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA», Thesis, Riobamba-Ecuador, 2024. Accedido: 18 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: [http://dspace.espoch.edu.ec/](http://dspace.espoch.edu.ec/)

[4] J. Pacheco, «Diseño e implementación de un cuarto eje de bajo coste de una cortadroa láser de CO2 para el grabado de superficies cilíndricas», Thesis, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca-Ecuador, 2023. Accedido: 19 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25262/4/UPS-CT010632.pdf

[5] I. P. Mora, J. José, y S. Martín, «Diseño e implementación de una máquina CNC con funcionalidad de taladradora», Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2016. Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/72c7a99e-dd8f-4e54-bc3a-922379e1686a/content

[6] J. Godoy, «IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA GRABADO RÁPIDO SOBRE TELA PARA EL LABORATORIO DE FABRICACIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA», Thesis, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, Quito-Ecuador, 2016. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13689

[7] D. Santiago y L. Sanchez, «TESIS PROFESIONAL REDISEÑO DE MÁQUINA LÁSER CNC», Thesis, INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, Veracruz, 2012. Accedido: 14 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/2353

[8] H. Francisco, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO POR CORTE CO2 LÁSER DE 40 WATTS PARA ACRÍLICO DE HASTA 4 mm», Thesis, UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR, Quito-Ecuador, 2014. Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/652/1/T-UIDE-0597.pdf#page=23&zoom=100,109,430

[9] I. Delgado y J. Machuca, «Desarrollo e implementación de un Sistema CNC de corte por láser de 5.5 W de potencia», Thesis, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, Guayaquil-Ecuador, 2019. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/52862/1/T-111176%20%20%20Delgado%20Mendoza%2c%20Ignacio%20Javier%20%26%20Machuca%20Salinas%2c%20Jaime.pdf#page=22&zoom=100,90,114

[10] J. Rivera, «ESTUDIO DEL PROCESO DE CORTE LÁSER DE CO2 DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADA CON FIBRA DE ABACÁ», Thesis, Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador, 2019. Accedido: 24 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uta.edu.ec/items/40a7d0b8-ed7c-4fad-bcc8-b3482a8f39b1

[11] P. Catota, J. Rodriguez, J. Espín, y E. Chuquitarco, «Diseño y construcción de un prototipo de máquina multifunción para la manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado CNC», mar. 2025, Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10145206https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10145206

[12] D. Narváez, «Diseño y construcción de un prototipo de cortadora y grabadora láser CNC para el Centro de Investigación I2TEC de la UNL.», Thesis, Universidad Nacional de LOJA, Loja-Ecuador, 2023. Accedido: 22 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dspace.unl.edu.ec/items/b208ba16-070c-44bb-b2c9-11fea7a893cb

[13] E. Freile, «AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA FRESADORA MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL», Thesis, Quito-Ecuador, 2009. Accedido: 24 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1572

[14] S. Aguila y L. Armando, «Diseño de máquina de control numérico computarizado para la transformación de varillas de metal a baja escala», Thesis, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, 2020. Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Sierra_Del%20Aguila_Dise%C3%B1o_m%C3%A1quina_control%20num%C3%A9rico1.pdf

[15] B. Chucaralao y S. Llivicasa, «DISEÑO DE UNA MÁQUINA LÁSER PARA CORTE Y GRABADO DE MATERIALES NO METÁLICOS EN LA EMPRESA "S.T.S"», Thesis, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA, Cuenca-Ecuador, 2021. Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21439/1/UPS-CT009424.pdf

[16] J. Carrillo, «IMPLEMENTACION DE UN RETROFITA UN TORNO DE CONTROL NUMERICO CNC», Thesis, UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS, 2016. Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/efecbd9f-2656-4022-a5df-677e122545d0/content

[17] Ruida Technology, «Manual de usuario del controlador RDC644XG», Shenzhen-China, 2016. Accedido: 27 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.rdacs.com/en

[18] V. Flores, J. Chávez, D. Cuadrado, y D. Pilco, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CNC LÁSER PARA GRABADO EN MADERA», Ecuador, may 2020. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://revistatech.istcarloscisneros.edu.ec/index.php/tech/article/view/5/14

[19] B. Jaramillo y C. Sánchez, «Creación de una cortadora láser que permita producir material didáctico en los profesionales de educación inicial en la ciudad de

Quito.», Thesis, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2024. Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c1583250-f0c9-4116-ab0f-16861d6f6161/content

[20] B. Bermúdez y D. Iza, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA PARA CORTE Y GRABADO LÁSER POR CONTROL NUMÉRICO», Thesis, UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO, Quevedo-Ecuador, 2022. Accedido: 27 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/T-UTEQ-87.pdf

[21] J. Contreras y A. Custodio, «Desarrollo e Implementación de una Fresadora y Grabadora láser CNC para incrementar la versatilidad en la fabricación de piezas artesanales en acrílico y MDF», Thesis, Universidad César Vallejo, Trujillo-Perú, 2021. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/61945/Contreras_ZJE-Custodio_PAA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[22] R. Armas, «IMPLEMENTACIÓN DE UNA FRESADORA CNC CONTROLADA MEDIANTE TECNOLOGÍA CAM», Thesis, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL, Quito-Ecuador, 2020. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2417

[23] J. Armas y G. Chávez, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CORTADORA LASER CNC PARA EL GRABADO Y CORTE DE MADERA (MDF) DE UN ESPESOR 4mm PARA LA EMPRESA SERVIHARDMETALDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CORTADORA LASER CNC PARA EL GRABADO Y CORTE DE MADERA (MDF) DE UN ESPESOR 4mm PARA LA EMPRESA SERVIHARDMETAL», Thesis, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, Quito-Ecuador, 2021. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19961/1/UPS%20-%20TTS328.pdf

[24] P. Carrillo, «Implementacíon de módulo de movimiento de motores paso a paso con controlador integrado», Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid,

2018. Accedido: 25 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/52581/1/TFG_PABLO_CARRILLO_CARRASCO.pdf

[25] C. Rafael, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA FRESADORA CNC PARA LA FABRICACIÓN DE PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESOS», Thesis, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2015. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/1117

[26] D. Martinez, L. Aguilera, y R. Rivera, «Diseño e implementación mecánico y eléctrico de una máquina CNC con fines educativos.», en *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, dic. 2023, pp. 1-12. doi: 10.63728/riisds.v9i1.105.

[27] T. Albarrán, M. Ramírez, A. Molina, y R. Pérez, «ESTUDIO DE CONTROLADORES DE MOVIMIENTO CNC PARA MICRO MÁQUINAS HERRAMIENTA», en *Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, La Habana: Tecnológico de Monterrey, nov. 2012, pp. 1-11. Accedido: 25 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34187699/3.Estudio_de_microcontroladores_para_micro_maquinas-libre.pdf

[28] D. Sagñay, «IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA CNC APLICANDO ARDUINO PARA LA IMPRESIÓN Y PERFORACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS.», Thesis, TECNOLÓGICO UNIVERSITARIO VIDA NUEVA, Quito-Ecuador, 2023. Accedido: 15 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dspace.istvidanueva.edu.ec/xmlui/handle/123456789/375

[29] M. Oto, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC ROUTER DE TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO ARDUINO UNO Y EL DRIVER DRV8825», Thesis, INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO VIDA NUEVA, 2020. Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: http://dspace.istvidanueva.edu.ec/handle/123456789/115

[30] J. Celis, «SISTEMAS DE CONTROL DE POSICIÓN Y VELOCIDAD PARA MAQUINAS DE CNC USANDO PLC», Thesis, UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, 2010. Accedido: 16 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible

en: https://repository.upb.edu.co/server/api/core/bitstreams/cc5bc291-b1c2-4e8a-8dc4-6c21e9591899/content