UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

(UAEM)

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
(IICBA)

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

(CIICAp)

“Desarrollo de una máquina CNC (Control Numérico Computarizado) para corte y grabado de piezas micrométricas”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Carlos Andrés Ferrara Bello

Directora:

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

SINODALES:

Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez
Dr. J Jesús Escobedo Alatorre
Dr. Ramón Cabello Ruíz
Dr. Pedro Vargas Chablé
Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

CUERNAVACA, MORELOS **mayo 2025**

RESUMEN

Este trabajo fue realizado con base en la necesidad que existe en los laboratorios de algunas universidades, escuelas o pequeños talleres en los que se cuenta con pocos recursos para obtener máquinas que les permitan grabar piezas, o bien, observar objetos de dimensiones micrométricas. La solución propuesta es el desarrollo de una máquina multifuncional capaz de grabar geometrías micrométricas que, a su vez, sea capaz de perfilar o escanear objetos con dimensiones desde 1 µm hasta 400 µm, diseñada y fabricada con partes impresas en PLA, y otras en PETG, y algunos dispositivos reciclados. Esto es, que se desarrolle de manera sostenible, reduciendo además su costo total.

El diseño alternativo de esta máquina para micromaquinado, se planeó para no utilizar motores a pasos para mover el área de trabajo, como sucede en la mayoría de los prototipos compactos hallados en la literatura, capaces de realizar tareas de micromaquinado. Desafortunadamente, esos motores son propensos a perder pasos si se supera la carga mecánica que pueden mover, además, estos pasos pueden generar vibraciones, que se transmiten a la zona de maquinado, lo que afecta a la precisión de las operaciones.

La máquina aquí propuesta, basa su funcionamiento en una novedosa plataforma flexible XYZ asimétrica, que permite reducir el número de elementos en su diseño. Esta plataforma permite posicionar a las piezas, así como al sistema de grabado, escaneo, perfilado y corte. Cabe señalar que, comúnmente estas plataformas se implementan con metales.

Para realizar las funciones de maquinado mencionadas, o bien, de observación, se utiliza dos tipos de láseres, los cuales son recuperado de unidades lectoras de DVD y de discos CD, de acuerdo con su función de grabado y corte, o bien, de observación y perfilado, respectivamente. Entre los materiales probados con éxito se encuentran

PVC, polietileno, tintas negras y filamentos para impresión 3D siempre y cuando el grosor no supere a 6.82 µm, que es la mayor profundidad de grabado lograda.

Esto es, en este trabajo se presenta una máquina constituida básicamente por un novedoso microposicionador XYZ flexible asimétrico, realizado en ABS, operado mediante actuadores piezoeléctricos, lo que reduce costos de implementación, pero incrementa la necesidad de un sistema de control de lazo cerrado para incrementar la precisión, disminuida por la presencia de histéresis inherente a los actuadores piezoeléctricos, lo cual fue logrado utilizando sensores de alta precisión. El sistema de grabado, escaneo, perfilado y corte se implementa mediante el uso de los láseres, con algunos elementos fabricados en PLA y PETG, mediante impresión 3D, por lo que, su costo de implementación y mantenimiento es relativamente bajo. Se logró además el grabado de piezas o elementos en el rango establecido, cumpliéndose con el objetivo general de este trabajo.

Es necesario mencionar que, a las funciones originalmente establecidas de grabado y corte se agregaron funciones de microscopía digital y perfilometría superficial, lo que permitió expandir las capacidades del sistema, sin requerirse modificaciones estructurales significativas. Esta adición surgió debido al potencial del control micrométrico implementado en los ejes de posicionamiento. Mediante el cambio del láser, por uno de menor potencia y modificaciones en el algoritmo de control, se logró el barrido necesario para generar datos, que permiten obtener imágenes de escaneo y perfilado. Con esto, se demostró la versatilidad del diseño de la máquina.

ABSTRACT

This work addresses the need identified in laboratories of universities, schools, and small workshops, where limited financial resources hinder access to specialized equipment for micro-scale engraving and observing micrometric objects. As a solution, a low-cost multifunctional machine was developed, capable of engraving micrometric geometries and performing object profiling and scanning within a dimensional range of 1 µm to 400 µm. The system was constructed using 3D-printed components in PLA and PETG and repurposed electronic devices, aligning with sustainable manufacturing principles and minimizing overall production costs.

In contrast to most compact micromachining prototypes reported in the literature, which rely on stepper motors to displace the working area, the proposed design eliminates such components. Stepper motors are susceptible to step losses under excessive mechanical loads and can introduce vibrations into the machining zone, compromising operational precision. To overcome these limitations, the proposed system is based on a novel asymmetric flexible XYZ positioning platform that reduces the number of mechanical components while maintaining functionality. Although such platforms are conventionally fabricated using metallic materials, this implementation utilizes ABS, contributing to cost and weight reduction.

The micromachining and observation functions are enabled through two types of laser diodes salvaged from CD and DVD reader units. Depending on their optical power and wavelength characteristics, these lasers are employed for engraving/cutting or observation/profilometry tasks, respectively. The system successfully operated with materials such as PVC, polyethylene, black inks, and various 3D printing filaments, provided their thickness does not exceed 6.82 µm—the maximum engraving depth achieved.

The core of the system consists of the aforementioned asymmetric flexible XYZ micropositioner driven by piezoelectric actuators. This configuration significantly reduces implementation costs; however, it introduces nonlinear effects, such as hysteresis, inherent to piezoelectric actuation. A closed-loop control system

incorporating high-precision sensors was implemented to mitigate this, thereby enhancing positional accuracy and repeatability.

The engraving, scanning, profiling, and cutting subsystems were fabricated using a combination of PLA and PETG components via additive manufacturing, resulting in low implementation and maintenance costs. The successful fabrication of structures within the defined micrometric range confirms the fulfillment of the system's primary design objective.

Additionally, the original capabilities of engraving and cutting were extended to include digital microscopy and surface profilometry. These enhancements were achieved without significant structural modifications, enabled by the high-resolution control of the positioning axes. By integrating a lower-power laser and modifying the control algorithm, the system can perform raster scanning for data acquisition, facilitating the generation of scanned and profiled images. These results underscore the versatility and adaptability of the proposed machine architecture.

AGRADECIMIENTOS

Manifiesto mi más sincero agradecimiento al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) y a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) por permitirme realizar mi formación académica en sus instalaciones.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada.

Agradezco a los miembros comité tutoral por sus correcciones y recomendaciones emitidas para lograr este trabajo de tesis.

Miembros del Comité tutoral:

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres
Dr. J Jesús Escobedo Alatorre
Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez
Dr. Ramón Cabello Ruíz
Dr. Pedro Vargas Chablé

Expreso también, mi más sincero agradecimiento a la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres por su continuo apoyo, su paciencia al compartirme su conocimiento y sus consejos que me motivaron a cumplir mis metas.

A mis compañeros de laboratorio de Diseño de Dispositivos Electrónicos y Microelectromecánicos de CIICAp, parte del Laboratorio Nacional en Microtecnología y Semiconductores (LaNMiSe).

DEDICATORIA

A mis padres Edith Bello Diaz y René Sergio Ferrara Rojas, sin su apoyo incondicional no hubiera podido llegar a esta etapa de mi vida.

Índice de contenido

Índice de contenido 9
Lista de Tablas 12
Lista de Figuras 13
1. INTRODUCCIÓN 18
1.1 Introducción 18
1.2 Antecedentes 19
1.3 Justificación 21
1.4 Hipótesis 22
1.5 Objetivo General 23
1.6 Objetivos Específicos 23
1.7 Alcance 24
1.8 Limitaciones 25
1.9 Metodología 25
2. MARCO TEÓRICO 30
2.1 Máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC) 30
2.1.1 Tipos de máquina CNC 30
2.1.2 Arquitectura general de una máquina de control numérico computarizado 33
2.2 Plataformas de posicionamiento flexibles 37
2.2.1 Principio de funcionamiento de las plataformas flexibles 37
2.2.2 Tipos de actuación de microplataformas 38
2.3 Actuadores piezoeléctricos 39
2.3.1 Efecto piezoeléctrico 39
2.4 Sistemas de control 40
2.4.1 Sistema de control de lazo abierto 41
2.4.2 Sistema de control de lazo cerrado 42
2.4.3 Control PID 44
2.5 Sensores de micro desplazamientos sin contacto 46
2.5.1 Sensores de corriente de Eddy o de Foucault 47
2.5.2 Ópticos 48
3. DESARROLLO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL 51

3.1 Diseño de actuador piezoeléctrico 51
3.2 Diseño del microposicionador 58
3.3 Modelo del microposicionador 61
3.4 Simulación del microposicionador 65
3.4.1 Análisis estructural estático 65
3.4.2 Análisis modal 70
3.5 Desplazamiento en los ejes X e Y del microposicionador 72
3.6 Caracterización del sensor de microdesplazamiento inductivo 77
3.7 Prueba de funcionamiento de los sensores en una segunda versión de los actuadores piezoeléctricos 81
4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL PRIMER DISEÑO DE CONTROL DE LAZO CERRADO 87
4.1. Sistema de control de lazo cerrado básico 87
4.2. Pruebas del circuito de control de los actuadores piezoeléctricos 89
4.3. Resultados de las pruebas del sistema de control de lazo cerrado básico 94
5. IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS AL SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO 110
5.1. Pruebas del circuito de control rediseñado de los actuadores piezoeléctricos 110
5.2. Mejoras implementadas del sistema de control de lazo cerrado 117
5.3. Implementación física del sistema de control de lazo cerrado mejorado 122
6. RESULTADOS CON EL SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO MEJORADO 126
6.1. Resultados de las pruebas de grabado 128
6.1.1. Calibración deficiente de sensores de microdesplazamiento 133
6.1.2. Calibración correcta de los sensores de microdesplazamiento 136
6.2. Resultados de las pruebas experimentales de la función de perfilometría superficial 141
6.3. Resultados de las pruebas experimentales de la función de microscopia digital 149
7. Conclusiones 157
ANEXO A. DATOS TÉCNICOS DE LA MÁQUINA MULTIFUNCIONAL 170
ANEXO B. RECONOCIMIENTOS Y PUBLICACIONES 172
A.B.1. Artículo publicado en: Micromachines MDPI, 2023 172
A.B.2. Artículo publicado en: Actuators MDPI, 2021 173
A.B.3. Artículo aceptado en: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2022 174

A.B.4. Reconociemiento de la: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2020 175
A.B.5. Reconociemiento de la: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2020 176
A.B.6. Constancia de: MEXICAN DIGITAL LIF COMMUNITY, 2021 177
A.B.7. Certificado de Aceptación Artículo MDPI, 2021 177
A.B.8. Constancia de curso “Introducción y seguridad laboral de cuartos limpios ISO 6 e ISO 7” 2021 178
A.B.9. Estancia de Investigación en CIDESI, 2022 179
A.B.10. Certificado de Aceptación Artículo MDPI, 2023 180
A.B.11. Reconocimiento por participación en concurso de posters, 2023 180
A.B.12. Reconocimiento por participación como tallerista, 2023 181
ANEXO C. CODIGO IMPLEMENTADO 183
A.C.1. Código de programación del microcontroladore STM32F103C8T6 encargado de convertir señales digitales a señales analógicas y de controlar de forma general la máquina..... 183

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Desempeño de los sistemas de microposicionamiento XYZ basados en actuadores piezoeléctricos. 39
Tabla 3.1. Dimensiones y parámetros de desempeño de los buzzers individuales. 52
Tabla 3.2. Propiedades de materiales, (Tymrak et al., 2014), (Dhaliwal & Dundar, 2020), (Rybachuk et al., 2017), (Tarrazó-Serrano et al., 2018), (Grupo XDS, 2016),(RODRIGUEZ RAMIREZ et al., 2019). 65
Tabla 3.3. Resultados obtenidos cuando la fuerza es aplicada en el eje X, Y, así como fuerzas aplicadas simultáneamente en XY. 69
Tabla 3.4. Comparación de desplazamiento en los ejes X e Y para el ABS. 69
Tabla 3.5. Primeras tres frecuencias modales para el microposicionador fabricado en PLA, PETG y ABS. 71
Tabla 3.6. Máximos desplazamientos logrados en la plataforma de trabajo realizada en diferentes materiales. 75
Tabla 4.1. Comparación de parámetros de las tres pruebas realizadas. 106
Tabla 7.1. Costo del prototipo. 160

Lista de Figuras

Figura 1.1. Micromáquina nombrada mMT (Lee, Mayor, & Ni, 2006). 20
Figura 1.2 Configuración en 3 ejes de la micromáquina nombrada CMSS-CNC (Saputra & Atmaja, 2013). 20
Figura 1.3 Diseño de la máquina para micromaquinado, Hadia Micromill-5X (Zariatin, Kiswanto, & Ko, 2016). 21
Figura 1.4 Diagrama de bloques de la metodología planteada. 25
Figura 2.1. Ejemplo de Torno de motor (mqaperu.com, 2023). 31
Figura 2.2. Ejemplo de fresadora (demaquinasyherramientas, 2015). 32
Figura 2.3. Arquitectura general de una máquina CNC (P. Zhang, 2008) 33
Figura 2.4. Diagrama a bloques de un sistema de lazo abierto básico (Salivahanan et al., 2015). 42
Figura 2.5. Esquema general de un sistema de control de lazo cerrado (Salivahanan et al., 2015). 43
Figura 2.6. Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), basada de (Chinmay Vilas Samak et al., 2018). 45
Figura 2.7. Principio de funcionamiento de un sensor de corrientes de Eddy. Cuanto más se acerque la bobina al objetivo, las corrientes inducidas generar un campo magnético que se opone al generado por la bobina y provoca que la resistencia efectiva de la bobina aumente. 48
Figura 2.8. Esquema del principio de funcionamiento de un sensor óptico de desplazamiento utilizando la técnica de triangulación. Basada de (Berkovic & Shafir, 2012). 49
Figura 3.1. Buzzer piezoeléctrico: (a) Descripción de las dimensiones y b) Vista transversal. 52
Figura 3.2. Actuador piezoeléctrico. (a) Diagrama esquemático del stack piezoeléctrico con seis zumbadores, para los ejes de desplazamiento X e Y. Vista transversal, y (b) su implementación usando una estructura hecha en PLA. (c) Diagrama esquemático del stack piezoeléctrico con dos buzzers, para el eje de desplazamiento Z, y (d) su implementación usando una estructura fabricada en PLA. . 54
Figura 3.3. Deformación de los buzzers piezoeléctricos utilizados para (a) ejes X, Y y b) eje Z 55
Figura 3.4. Configuración experimental para registrar el desplazamiento de los tres actuadores tipo stack para los ejes XYZ. 56
Figura 3.5. Grafica del desplazamiento de salida en función del voltaje aplicado para (a) Actuador piezoeléctrico tipo stack para el eje Z, (b) y (c) Actuador piezoeléctrico tipo stack para los ejes X e Y.58
Figura 3.6. (a) Identificación de los elementos flexibles en el interior del posicionador y (b) diagrama equivalente para el eje Y. Elementos de identificación correspondientes a (c) el posicionador y (d) el diagrama equivalente para el eje X. 64
Figura 3.7. (a) eje-X, and (b) eje-Y desplazamientos obtenidos de la simulación en ANSYS. Los resultados fueron conseguidos aplicando la fuerza en el eje donde los desplazamientos fueros medidos. 67
Figura 3.8. a) eje-X (b) eje-Y desplazamiento obtenido aplicando la misma fuerza en ambos ejes al mismo tiempo. 68
Figura 3.9. Máximo esfuerzo equivalente cuando la fuerza es aplicada en cada eje simultáneamente. 68
Figura 3.10. Desplazamiento de salida en los ejes X e Y, respectivamente, (a) y (b), para ABS. (c) y (d) para PETG. (e) y (f) para PLA. 76
Figura 3.11. Sensor inductivo modelo SMU 9200-15N-001 de la marca KAMAN. 77
Figura 3.124. Montaje experimental para caracterizar los sensores inductivos. 78

Figura 3.13. Comportamiento de la tensión de salida del sensor en la presencia de un objeto de aluminio que se aproxima con incrementos de 50 µm. 79
Figura 3.14. Resolución teórica que puede ser obtenida empleando un conversor analógico/digital ADS1115 (16 bits) con una configuración de rango de +/- 6.144V (1 bit = 0.1875mV. 79
Figura 3.183.15. Implementación de la función de cuarto orden en el código del microcontrolador dsPIC33EP256MU806. 80
Figura 4.1. Representación del sistema de control de lazo cerrado empleado para realizar las primearas pruebas de grabado. 88
Figura 4.2. Diagrama electrónico para alimentar al actuador piezoeléctrico, clasificado como regulador conmutado. 90
Figura 4.3. Implementación del diagrama en una placa circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés). 91
Figura 4.4. Esquema experimental para las pruebas de velocidad de respuesta del controlador para el actuador piezoeléctrico (diseño preliminar). 92
Figura 4.5. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de entrada de 0.735 Hz. 93
Figura 4.6. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de entrada de 5.2 Hz. 93
Figura 4.7. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de entrada de 16.9 Hz. 94
Figura 4.8. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en un microcontrolador para formar una trayectoria cuadrada. 95
Figura 4.9. Montaje experimental del primer prototipo de la máquina para corte y grabado por láser, implementando el algoritmo de control de lazo cerrado básico. 96
Figura 4.10. Montaje experimental del primer prototipo de la máquina para corte y grabado por láser implementando el algoritmo de control de lazo cerrado básico. 97
Figura 4.11. Montaje del láser de DVD posicionado sobre la zona de trabajo, operando a una potencia de aproximadamente 400 mW (2.85 V y 140 mA). 97
Figura 4.12. Resultado de la prueba de grabado sobre un trozo de placa de FR-4 cubierta de tinta negra. 100
Figura 4.13. Muestra de la placa FR-4 obtenida con en el microscopio Keyence. 100
Figura 4.14. Medición de profundidad de valles grabados con el láser de DVD. Figura superior izquierda, fotografía en relieve. Superior derecha, acercamiento a la zona deseada. Inferior, gráfica del perfil de profundidad, indicando una profundidad mayor a 6.82 µm. 101
Figura 4.15. Medición para obtener ángulos en cavidades. Figura superior izquierda, fotografía en relieve. Superior derecha, acercamiento a la zona deseada. Inferior, gráfica del ángulo formado en la cavidad, el cual es de 130.26°, con una cresta de 5.56 µm y un valle en 1.08 µm. 102
Figura 4.16. Medición de profundidad de valles grabados con el láser de DVD. Figura superior izquierda, fotografía en relieve. Superior derecha, acercamiento a la zona deseada. Inferior, gráfica del perfil de profundidad, indicando una profundidad mayor a 14.11 µm. 103
Figura 4.17. Dimensiones de un cuadrado grabado por láser. El microscopio incorpora diferentes herramientas para poder acotar las muestras observadas. 104
Figura 4.18. Medición de los picos formados por el grabado con el láser de DVD. La imagen superior izquierda muestra una fotografía en relieve, mientras que la imagen superior derecha presenta un acercamiento a la zona de interés. En la parte inferior, se observa la gráfica del perfil del grabado, donde se identifican dos picos principales: el de la izquierda, con una altura de 5.2 µm, y el de la derecha, con una altura de 3.4 µm. 105

Figura 4.19. Visualización de la muestra con una configuración de luz diferente a los casos anteriores. 106
Figura 5.1. Diagrama electrónico del controlador, clasificado como regulador lineal. 112
Figura 5.2. Implementación del diagrama controlador para los actuadores piezoeléctricos (diseño actual) en Protoboard. 113
Figura 5.3. Pruebas de velocidad de respuesta del controlador para actuador piezoeléctrico (diseño nuevo). 114
Figura 5.4. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de 0.561 Hz. 115
Figura 5.5. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de 15.149 Hz. 115
Figura 5.6. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de 101.061 Hz. 116
Figura 5.7. Diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado final. 118
Figura 5.8. Sistema de control basado en amplificadores operacionales 121
Figura 5.9. Módulo de control de lazo cerrado. Circuito electrónico del módulo de control de lazo cerrado. 122
Figura 5.10. Implementación del Sistema. 123
Figura 5.11. Diagrama de bloques de la conexión general del sistema. 124
Figura 6.1 Prototipo con múltiples funciones. 127
Figura 6.2. (a) Parámetros de vectorización y dimensiones de la geometría, (b) tiempo estimado de grabado y trayectoria. 130
Figura 6.3. Montaje experimental para observar el movimiento de una geometría Yin-Yang. 131
Figura 6.4. Trayectoria del desplazamiento registrado donde el objetivo fue generar una geometría Yin-Yang. 132
Figura 6.5. Montaje del láser de DVD posicionado sobre la zona de trabajo, operando a una potencia de 399 mW (2.85 V y 140 mA). 133
Figura 6.6. Observación del grabado con una lente de 1.4x (aprox. 4x en pantalla). 134
Figura 6.7. Observación del grabado con una lente de 9x (aprox. 60x en pantalla). 134
Figura 6.8. Observación del grabado con una lente de 40x aprox. 135
Figura 6.9. Grabado sobre una muestra de FR-4 cubierta con tinta negra. 137
Figura 6.10. Grabado sobre una muestra de aluminio cubierta con tinta negra. 137
Figura 6.11. Diferente vista de la muestra de aluminio cubierta con tinta negra. 138
Figura 6.12. Comparación del grabado respecto a un cabello con grosor de aproximadamente 40 µm. 138
Figura 6.13. Perforación de una muestra de polietileno de grosor aproximado de 50 µm, lograda con una potencia eléctrica del láser de 399 mW. 140
Figura 6.14. Perforación de una muestra de polietileno de grosor aproximado de 50 µm, lograda con una potencia eléctrica del láser de 399 mW. En esta imagen spot del láser logró un enfoque más fino comparado con el mostrado en la Figura 6.13. 140
Figura 6.15. Sensor de microdesplazamiento implementado con el Pick-up modelo SF-P151. 141
Figura 6.16. Placa de FR-4 pulida con una lija de agua con grano número 1500. 142
Figura 6.17. Gráfica 3D de los datos registrados de la muestra. El segmento analizado fue de 82 µm x 82 µm con pasos de 2 µm (1681 datos). 143
Figura 6.18. Trozo de un disco DVD. 145
Figura 6.19. Gráfica 3D de los datos registrados de la muestra. El segmento escaneado fue de 82 µm x 82 µm, con pasos de 2 µm (1681 datos). 145

Figura 6.20. Cuadro de aluminio de 1 cm por lado. 146
Figura 6.21. Mapa de elevación de las rayaduras de aluminio. Área de escaneo de 82 µm x 82 µm, las mediciones se realizaron con un barrido en ambos ejes con incrementos de 2 µm. Nota: Recuerde que la manera correcta de interpretar a los resultados es una inversión. 146
Figura 6.22. Muestra de Silicio con una rejilla de ranuras grabadas con DRIE. 147
Figura 6.23. Gráfica 3D de las ranuras grabadas. Área de escaneo de 200 µm x 200 µm, las mediciones se realizaron con un barrido en ambos ejes con incrementos de 5 µm. 148
Figura 6.24. Vista de los contornos del mapa de elevación de la muestra de Silicio. 148
Figura 6.25. Material altamente reflectante recuperado de un disco HDD. 149
Figura 6.26. Señal de error de enfoque SFE obtenida con el material altamente reflectante. 150
Figura 6.27. Muestra de FR-4, parcialmente reflectante. 150
Figura 6.28. Señal de error de enfoque SFE obtenida con el material parcialmente reflectante. 151
Figura 6.29. Placa FR-4 cubierta de soldadura en pasta. 152
Figura 6.30. SFE en diferentes puntos de una sección de 82 µm x 82 µm. El barrido de desplazamiento se realizó con pasos de 2 µm (1681 datos). 152
Figura 6.31. Imagen capturada de la soldadura en pasta por un microscopio industrial. 153
Figura 6.32. Trozo de CD. 154
Figura 6.33. Escaneo de imagen en un área 82 µm x 82 µm. Incremento de desplazamiento de 2 µm. 154
Figura 6.34. Escaneo de imagen en un área 41 µm x 41 µm. Incremento de desplazamiento de 1 µm. 155

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los argumentos que dar origen a la realización de esta tesis. Se inicia con los antecedentes sobre diferentes diseños de máquinas para micromaquinado por control numérico computarizado que se han reportado en la literatura reciente, en seguida se expone el problema en el contexto del tema y se procede a plantear las bases para la realización de esta tesis.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Los continuos avances en la tecnología permiten introducir cada vez más micro partes en varios tipos de productos desde industriales hasta los de uso común. Desde hace más de una década, existe una demanda de dispositivos con dimensiones micrométricas (0.1 µm – 100 µm) y milimétricas (0.1 mm – 10 mm), para satisfacer necesidades en diversas áreas sofisticadas, tales como la automotriz, la aeroespacial, la electrónica, la medicina, la biomedicina, la óptica, etc. (Özel, Liu, & Dhanorker, 2009), (Qin, 2015).

Algunos ejemplos de dispositivos que están construido por partes micrométricas son: las boquillas de inyección de combustible para automóviles, equipo de inspección de órganos internos del cuerpo humano, herramientas médicas para microcirugía, sensores de tipo MEMS (Sistemas Microelectromecánicos), etc. (Bhattacharyya, 2015).

Existen varias tecnologías y procesos usados para fabricar componentes en miniatura. Con base en los materiales utilizados, las tecnologías de micromanufactura pueden clasificarse en dos categorías: a base de silicio y no silicio.

- En la primera, se utilizan tecnologías empleadas en el campo de los MEMS como la tecnología fotolitográfica (C-W. & G-J., 2012) y la tecnología LIGA (*Lithography Electroforming Moulding*) (Khan Malek & Saile, 2004).
- Mientras que, en la manufactura no basada en silicio, típicamente se trabaja con materiales como: metales, cerámicos, polímeros, vidrios y compuestos; para esto es común recurrir a procesos de microfresado (Rincon Ardila, Wasnievski, Del Conte, & Abackerli, 2015) y procesos de microperforación (Hof & Ziki, 2017).

Desde hace pocas décadas, la tecnología fotolitográfica empleada en la industria de los semiconductores, basada en silicio, era la más empleada en tareas de micromanufactura, debido a la capacidad de producción en masa y la alta exactitud en

las piezas manufacturadas (Liow, 2009). Sin embargo, los productos basados en silicio tienen limitaciones intrínsecas (Baidyk & Kussul, 2009), (Yan, Sun, Liang, & Dong, 2007), algunos ejemplos son:

- Las geometrías están limitadas a diseños en 2.5 dimensiones, es decir geometrías en 2D extruidas para formar un sólido en 3D.
- Los materiales empleados deben ser compatibles con el silicio.
- El desempeño mecánico es regido por un solo material.
- Elevado costo de manufactura de prototipos.

1.2 Antecedentes

La tecnología de micromanufactura en la que nos enfocaremos se basa en el uso de tecnologías tradicionales de tratamiento mecánico de materiales. En este caso, para fabricar piezas de dimensiones micrométricas es necesario construir micromáquinas herramientas automáticas y micro manipuladores, cuyas dimensiones sean proporcionales a los productos fabricados (Baidyk & Kussul, 2009).

En 1996, en Ucrania, se realizaron algunos de los primeros trabajos sobre micromáquinas de bajo costo, con la idea de realizar prototipos a partir de diferentes generaciones (Kussul, Rachkovskij, Baidyk, & Talayev, 1996).

En años recientes, los investigadores han producido diferentes prototipos de máquinas de relativo bajo costo para micromanufactura. En la Figura 1.1, se presenta un prototipo de micromáquina con dimensiones de 150×70×140 mm.

Otro prototipo interesante se presenta en la Figura 1.2, cuyo diseño está formado por módulos que permiten cambiarse de posición para lograr una diferente configuración de la máquina, con el propósito de conseguir diferentes formas de micromaquinado. De acuerdo con los autores, esta máquina puede alcanzar resoluciones en los movimientos de hasta 55 nm.

En la Figura 1.3, se muestra el diseño de otra máquina para micromanufactura de tres ejes (XYZ), que al igual que el prototipo anterior, utiliza motores de pasos para mover los ejes, siendo capaz de realizar contornos con paredes de un espesor de hasta 50 µm con desviaciones de ± 0.150 µm. También tiene la capacidad de producir microimpulsores con un diámetro de 2 mm y 3 mm (Saputra & Atmaja, 2013).

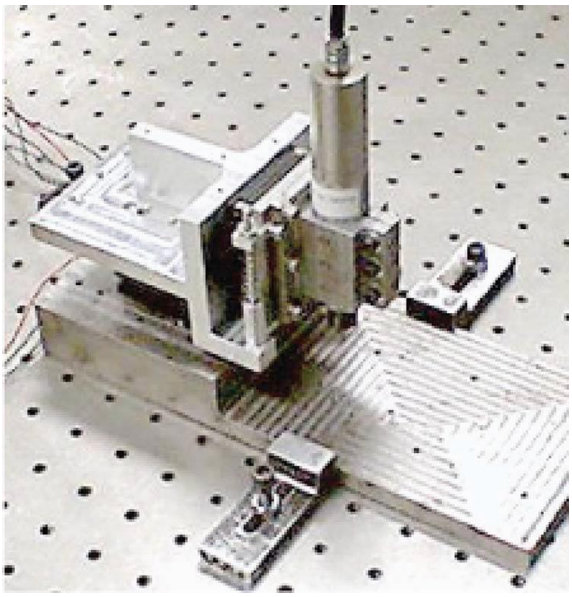


Figura 1.1. Micromáquina nombrada mMT (Lee, Mayor, & Ni, 2006).

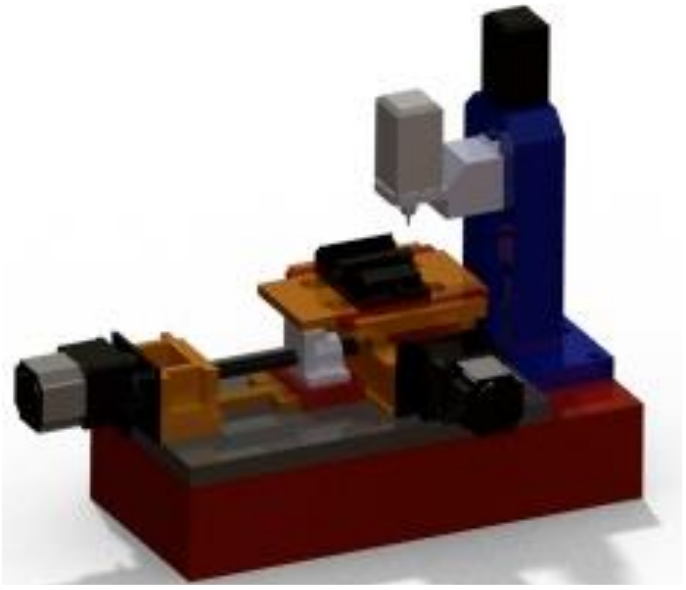


Figura 1.2 Configuración en 3 ejes de la micromáquina nombrada CMSS-CNC (Saputra & Atmaja, 2013).

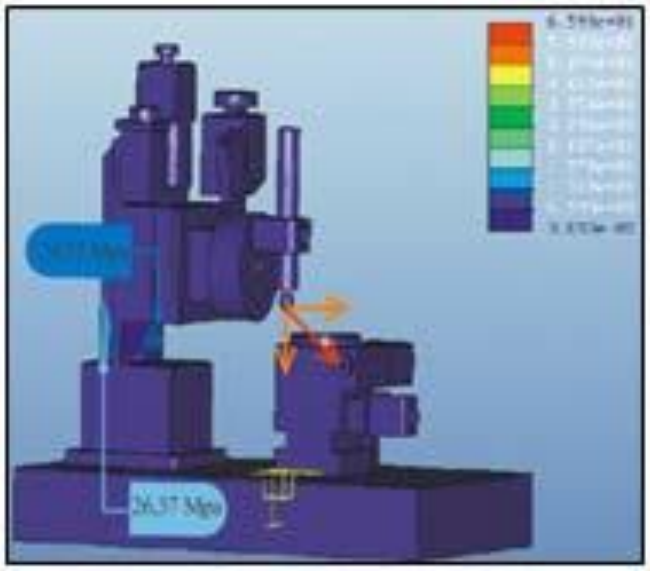


Figura 1.3 Diseño de la máquina para micromaquinado, Hadia Micromill-5X (Zariatin, Kiswanto, & Ko, 2016).

1.3 Justificación

Los diseños de máquinas se han presentado, demuestran que es posible realizar equipos compactos capaces de realizar tareas de micromaquinado y con un costo relativamente bajo que los vuelve atractivos. Sin embargo, la mayoría de estos prototipos utilizan actuadores conocidos como motores de pasos para mover el área de trabajo, dichos motores son propensos a perder pasos si se supera la carga mecánica que éstos pueden mover, además, los pasos del motor pueden generar vibraciones que se transmiten a la zona de maquinado, las cuales afectan la precisión de la operación. Para solucionar los problemas anteriores es preciso incorporar un sistema que controle vibraciones y un sistema de control que permita corregir el problema de pérdida de pasos; lo cual puede ocasionar un incremento considerable en el costo de implementación del prototipo.

Debido a la demanda de dispositivos micrométricos que se mencionaron anteriormente y a los inconvenientes de las máquinas dedicadas a la micromanufactura que emplean motores a pasos, en esta tesis se propone un diseño alternativo a las máquinas para micromaquinado que emplean motores de pasos.

Se espera que el nuevo diseño de la máquina no utilice motores a pasos o combinar su operación con otro tipo de actuador, esto con la finalidad de evitar los inconvenientes antes señalados y alcanzar una precisión mayor en los movimientos de la máquina a desarrollar. Las expectativas del nuevo diseño son:

- ✓ Factible de desarrollar con elementos comunes del mercado.
- ✓ Costo de implementación menor a las que se han reportado en la literatura reciente.
- ✓ Lograr grabar, escanear y obtener perfilados en una escala micrométrica o milimétrica,

Piezas maquinadas con un acabado que permita implementarlas en un sistema mecánico.

1.4 Hipótesis

Debido a la amplia demanda de microcomponentes para su utilización en microestructuras o micromáquinas, así como las desventajas que existen al utilizar métodos de fabricación existentes, comentados en la introducción, se plantean las siguientes preguntas de investigación.

P1. ¿Es posibles desarrollar una máquina por control numérico computarizado, de bajo costo, para fabricar piezas de dimensiones micrométricas?

En las nuevas tecnologías, existen actuadores de alta precisión y elevada fuerza, que generan desplazamientos en la escala micrométrica. Esto hace posible la realización de tareas con un menor número de elementos. Además, existen mecanismos flexibles que tienen la ventaja de transmitir movimiento de manera eficiente. Por lo que, planteamos:

H1. “Una máquina compacta dedicada al grabado, escaneo y perfilado en escala micrométrica o milimétrica puede diseñarse e implementarse si se emplean en conjunto mecanismos tradicionales, como mecanismos flexibles e impulsados por actuadores piezoeléctricos. El costo de implementación puede reducirse si se desarrollan los principales elementos que la constituyen.”

P2. En caso de lograr fabricar una máquina para micromaquinado, ¿la precisión en las dimensiones de las piezas fabricadas será suficiente para obtener piezas con el tamaño que requiere la demanda en el sector de investigación?

H2. “Es necesario implementar un sistema de microposicionamiento y sujeción confiable para ubicar a la pieza u objetivo, así como implementar a un sistema de grabado láser, para maquinado, con las dimensiones requeridas”.

1.5 Objetivo General

Diseñar e implementar una máquina para operaciones de grabado, corte, perfilado y escaneo de piezas micrométricas en un sistema de coordenadas de tres ejes (XYZ), empleando mecanismos flexibles en su estructura y actuadores piezoeléctricos accionados por un control numérico computarizado.

1.6 Objetivos Específicos

- Analizar materiales accesibles de baja rigidez para la construcción de la máquina CNC.
- Con base en el material seleccionado para la estructura de la máquina CNC, analizar la posibilidad de utilizar mecanismos flexibles para generar los movimientos biaxiales (en el eje X e Y).
- Seleccionar el soffware CAD (Computer Aided Design) y de simulación.
- Realizar el diseño del dispositivo, lo más compacto posible, con los materiales usados.
- Desarrollar un sistema de lazo cerrado para los diferentes movimientos que incorpore el dispositivo, con el fin de aumentar la exactitud del maquinado.
- Desarrollar los sistemas de potencia y control de la máquina.
- Registrar el desplazamiento en los ejes de movimiento y cuantificar el error.
- Realizar los ajustes necesarios.

1.7 Alcance

El prototipo para micromaquinado por control numérico computarizado que implementaremos consistirá en módulos que operarán de forma conjunta para lograr movimientos precisos y con fuerza suficiente para realizar el trabajo requerido. Además, se espera que los módulos pueden ser intercambiados por otros con diferentes características, para conseguir resultados uniformes en los materiales compatibles para maquinar. Dichos módulos son los siguientes:

- El mecanismo de generación de movimiento en forma de pasos con incrementos constantes en los ejes X e Y. En este módulo están integrados los actuadores.
- El mecanismo de generación de movimiento en el eje Z.
- El sistema de control de lazo cerrado conformado por lo sensores, que miden el desplazamiento lineal, y la electrónica para controlar la activación de los actuadores.
- Sistema de maquinado, cuya función básica será el grabado.
- Interfaz de control con el usuario.

Con las características anteriores se tiene la expectativa que el nuevo diseño de la máquina CNC ostente las siguientes cualidades:

- ✓ Factible de desarrollar con elementos comunes del mercado.
- ✓ Costo de implementación menor a las que se han reportado en la literatura reciente.
- ✓ Lograr grabar, escanear y perfilar en una escala micrométrica o milimétrica.

Piezas maquinadas con un acabado que permita implementarlas en un sistema mecánico.

1.8 Limitaciones

Algunas limitaciones importantes para llevar a cabo esta tesis son:

- Bajo presupuesto disponible para la adquisición de materiales de fabricación y equipo de medición.
- Escasos dispositivos de maquinado en escala micrométrica en el mercado (láseres y brocas).
- Complejidad al trabajar en escala micrométrica sin instrumentos adecuado.
- Imprevistos inesperados que impidan el trabajo presencial en un laboratorio adecuado.

Limitación en el acceso a la información de artículos de revistas internacionales.

1.9 Metodología

Para poder desarrollar eficientemente los componentes mencionados y a la vez cumplir con los objetivos planteados, es necesario seguir al conjunto de procedimientos presentados en la Figura 1.4.

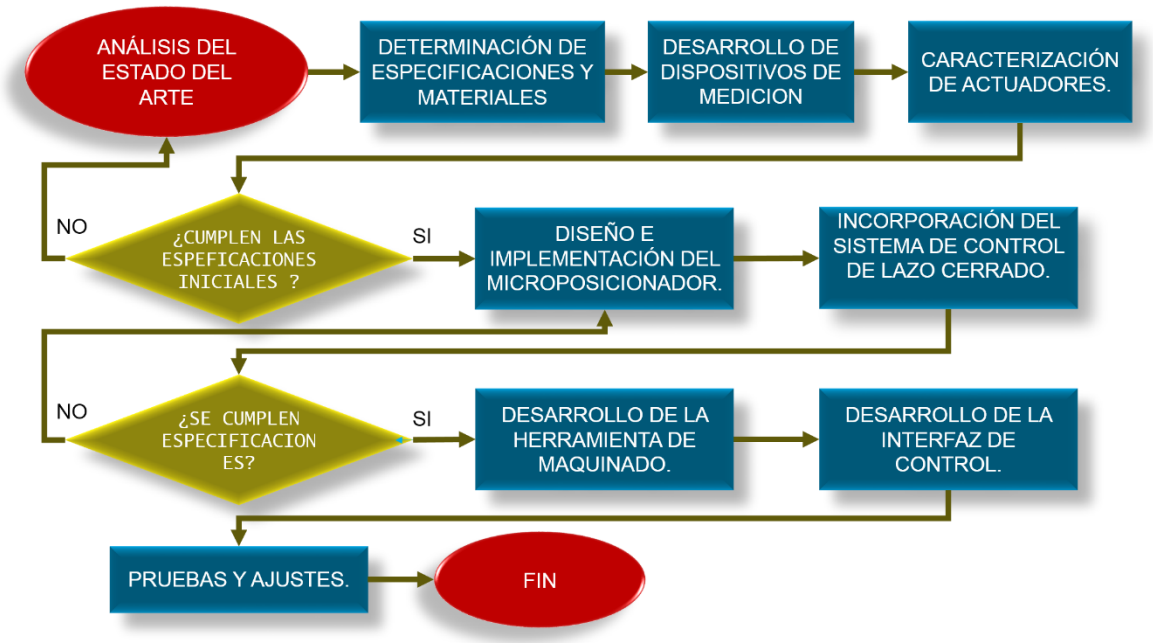


Figura 1.4 Diagrama de bloques de la metodología planteada.

Estos procedimientos se describen como sigue:

- ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.

Realizar un análisis sobre las máquinas CNC, dedicadas al maquinado de piezas micrométricas y milimétricas, que se han reportado en la literatura. Con especial enfoque los medios para generar movimientos con alta resolución, precisión y exactitud.

- DETERMINACIÓN DE ESPECIFICACIONES Y MATERIALES.

Se determinarán:

- El material conveniente para construir la estructura de la máquina.
- Los actuadores que se utilizarán.
- El método de maquinado con el que se experimentará.

Estos elementos serán decisivos para identificar las características de los materiales que podrán ser maquinados por la máquina que se desarrollará. Adicionalmente se estimarán los rangos aproximados del área de trabajo.

- INSTRUMENTACIÓN Y DESARROLLO ELECTRÓNICO

Teniendo las características de los diferentes elementos que conforman a la máquina CNC, se implementará la electrónica necesaria para poder controlarlos y la instrumentación para medir las variables de interés. Específicamente, los sensores de medición de microdesplazamiento, controladores de los actuadores, controlador del dispositivo de mecanizado y una tarjeta de adquisición de datos. Cabe mencionar que, es conveniente que los costos de implementación de esta sección sen los más bajos posibles, ya que, estos dispositivos pueden aumentar los costos finales de prototipo.

- CARACTERIZACIÓN DE ACTUADORES.

Se caracterizarán los actuadores, registrando su comportamiento respecto al tipo de alimentación y a la fuerza que podrán generar. Si se opta por actuadores piezoeléctricos, se cuantificará el error en su desplazamiento causado por el efecto de histéresis y se realizarán las pruebas necesarias para obtener sus gráficas de desempeño.

- DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MICROPOSICIONADOR.

De ser necesario, se diseñará e implementará un mecanismo flexible de una sola pieza para la plataforma de microposicionamiento. En caso de que el actuador genere un pequeño desplazamiento, se agregará un sistema de amplificación de movimiento. Este elemento será el encargado de realizar los movimientos en dos dimensiones. En este proceso será conveniente utilizar un Software de análisis por el Método de Elemento Finito, como ANSYS™, para comprobar el funcionamiento requerido del microposicionador y calcular de forma teórica, simulada y experimental los valores de desplazamiento y fuerza.

- INCORPORACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO.

Realizar un sistema de control en lazo cerrado para lograr una alta exactitud en los movimientos. Para esto, es importante realizar un modelo que describa el comportamiento del microposicionador, con diferentes condiciones.

- DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE MAQUINADO.

Con base en las características del sistema de microposicionamiento y los materiales empleados en la estructura se adaptará la herramienta de maquinado más conveniente a utilizar sobre el eje Z de la máquina. En caso de que el diseño del sistema de microposicionamiento permita el uso de más de un tipo de herramienta de maquinado, se diseñará la estructura de eje Z, de tal forma que permita un fácil intercambio de herramientas de maquinado.

- DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE CONTROL.

Lo siguiente será preparar la interfaz de control con el usuario, ya sea utilizando un software dedicado al control de máquinas CNC o realizando un software especialmente diseñado para el prototipo en cuestión. También se analizará la posibilidad de un sistema de monitoreo en tiempo real para prevenir posibles fallas en el proceso de grabado.

- PRUEBAS Y AJUSTES.

Pruebas experimentales para conocer el desempeño de la máquina sobre los materiales seleccionados. Se analizará y cuantificará la exactitud del maquinado logrado, así como sus limitaciones.

Para llegar a cumplir con los procedimientos anteriores, es necesario contar con cierto equipo de: medición de microdesplazamiento, manufactura y monitoreo; por lo cual, de no contar con dicho equipo en el laboratorio “Diseño de Dispositivos Electrónicos y Microelectromecánicos”, se optará por realizar una estancia en un centro de investigación que cuente con el equipo requerido, u otra alternativa posible.

Para trabajar con piezas de tamaño micrométrico será necesario contar con herramientas capaces de manipular dichas piezas, una opción es utilizar micropinzas para este fin. Lo cual, es factible debido al trabajo anterior de tesis de maestría, en la que se desarrolló una micropinza de bajo costo y con una apertura aceptable para trabajar en la escala micrométrica. Además, los elementos e instrumentación utilizados con la micropinza, pueden ser un buen punto de partida para el trabajo que proponemos.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

En este capítulo se proporcionan las bases teóricas fundamentales para el desarrollo de las Máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC), así como una explicación detallada de los sistemas y componentes que las conforman.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC)

Desde los inicios de la tecnología, la humanidad ha buscado formas de simplificar y optimizar sus actividades manuales, inventando máquinas que no sólo facilitan el trabajo, sino que también incrementan su eficiencia y rapidez. Las primeras máquinas creadas por el ser humano eran rudimentarias y estaban construidas con materiales básicos, diseñadas para tareas simples que requerían fuerza física o repetición. Sin embargo, a medida que la tecnología ha avanzado, estas máquinas han evolucionado significativamente en términos de complejidad, precisión y automatización.

Un ejemplo notable de esta evolución es el desarrollo de las máquinas herramientas de Control Numérico Computarizado (CNC). Las primeras máquinas se diseñaron para ser controladas en un 100% por un operador. En las máquinas modernas con sistemas CNC el operador ya no controla directamente los movimientos de la máquina. En las máquinas convencionales, solo el 20% del tiempo se dedicaba a remover material, es decir a realizar el trabajo requerido. Con la introducción de controles electrónicos, el tiempo real de corte ha aumentado al 80% o incluso más. También, se ha reducido el tiempo requerido para posicionar la herramienta de corte en cada ubicación de mecanizado (Krar & Gill, n.d.).

Asimismo, se han desarrollado máquinas herramientas que se utilizan para fabricar otras máquinas o ciertas partes, conocidas como “máquinas madre”. Con el progreso constante de la tecnología, estas máquinas han mejorado, desde sistemas manuales, hasta sofisticadas máquinas de control numérico computarizado mejorando significativamente su precisión y velocidad en los procesos de mecanizado y confirmado su propósito como máquina nodriza en la industria (Suh et al., 2008).

2.1.1 Tipos de máquina CNC

De acuerdo con (Suh et al., 2008), las máquinas CNC se pueden clasificar como “máquinas que cortan” (Ali & Mohsin, 2021) y las “máquinas que no cortan” (Saund &

DeVlieg, 2013).Las máquinas de corte remueven material para dar la forma deseada, algunos ejemplos de estas máquinas son: fresadoras, tornos, máquinas de electroerosión. Por otro lado, las máquinas que no cortan transforman la forma del material en bruto aplicando fuerza o simplemente trasladando un material a otra posición; algunos ejemplos son: prensas, sistemas robóticos, brazos robóticos, tejedoras, entre otras.

Con base en la clasificación anterior, a continuación, se presenta algunos tipos de máquinas de tipo corte.

Torno

El torno de motor es una máquina eficaz que se ha utilizado por mucho tiempo para fabricar piezas redondas; ya que es una de las máquinas herramienta más eficientes y productivas, (Fig. 2.1). La mayoría de estos tornos operan en dos ejes principales:

Eje X: controla el movimiento lateral de la herramienta de corte. Un desplazamiento en X negativo (-X) acerca la herramienta hacia la línea central del husillo, mientras que un desplazamiento en X positivo (X+) la aleja de esta línea.

- Eje Z: regula el movimiento longitudinal del carro, permitiendo que se acerque o se aleje del cabezal.
-



Figura 2.1. Ejemplo de Torno de motor (mqaperu.com, 2023).

Fresadora

La fresadora ha sido una de las máquinas herramienta más versátiles en la industria (Fig. 2.2), permitiendo realizar una amplia variedad de operaciones, como fresado, contorneado, tallado de engranajes, taladrado, mandrinado y escariado, entre otras. Estas máquinas pueden programarse en tres ejes:

- Eje X: controla el movimiento de la mesa hacia la izquierda o la derecha.
- Eje Y: regula el desplazamiento de la mesa hacia y desde la columna.
- Eje Z: gestiona el movimiento vertical, ya sea hacia arriba o hacia abajo, del husillo o la rodilla.

Gracias a su diseño flexible, la fresadora es esencial para procesos de mecanizado que requieren precisión y adaptabilidad.



Figura 2.2. Ejemplo de fresadora (demaquinasyherramientas, 2015).

Fresadora para maquinados micrométricos

El aumento en la demanda de componentes y sistemas en escala micro y miniatura ha impulsado el desarrollo de la micro y nanotecnología. La micro fabricación se ha convertido en una tecnología esencial para la producción industrial de micro

productos y la implementación de procesos eficientes en escalas micrométricas y nanométricas. Las partes de estas máquinas son similares a las fresadoras convencionales; pueden ser robustas máquinas de banco o diseños desarrollados por investigadores.

Una diferencia importante entre las máquinas CNC convencionales y las dedicadas al micromaquinado es el tipo de herramientas de corte empleadas. Mientras que en las máquinas convencionales se suelen utilizar herramientas de diamante natural, en el micromaquinado se emplean herramientas de materiales avanzados, como recubrimiento de carburo de tungsteno, CVD (Depósito Químico de Vapor), CBN (Nitruro Cúbico de Boro) y diamante para obtener mayor precisión y durabilidad en aplicaciones a escala micro y nano (Ron Pethig & Dante Espinosa, 2008).

2.1.2 Arquitectura general de una máquina de control numérico computarizado

Un sistema de Control Numérico por Computadora consta principalmente de tres componentes fundamentales:

- El software
- La unidad electrónica de control
- El equipo de procesamiento

Estos elementos trabajan en conjunto para automatizar los procesos de fabricación, mejorando la precisión, la repetibilidad y la eficiencia. En la figura 2.3 se representa un diagrama de la arquitectura de una máquina CNC.



Figura 2.3. Arquitectura general de una máquina CNC (P. Zhang, 2008) .

Software CNC

Es el programa encargado de generar y gestionar las señales de control necesarias para accionar los ejes de la máquina herramienta. Dichas señales se generan a partir de un archivo en formato G-Code, el cual contiene instrucciones específicas para las operaciones de mecanizado, como el movimiento de la herramienta, la velocidad de corte, la velocidad de avance y la velocidad del husillo.

Existen una variedad de programas, tanto de código abierto como de pago. Los de código abierto tienen la ventaja de ser gratuitos, altamente personalizables y con una comunidad activa que contribuye a su mejora continua, mientras que los de pago suelen ofrecer soporte técnico profesional, interfaces más amigables y funcionalidades avanzadas que pueden ser cruciales para operaciones de mecanizado complejas.

Algunos de los programas populares para el control de máquinas herramienta son:

- Linux CNC: Un software de código abierto ampliamente utilizado para el control de máquinas CNC.
- Mach3: Un software de pago conocido por su facilidad de uso y compatibilidad con una amplia gama de máquinas CNC.
- GRBL: Un firmware de código abierto para controlar máquinas CNC, especialmente popular en proyectos de bricolaje y pequeñas máquinas.
- Fusion 360: Un software de pago que integra diseño CAD/CAM y control CNC.

También existen programas que utilizan láser para corte y grabado, algunos de los más destacados son:

- LaserGRBL: Un software gratuito y de código abierto diseñado específicamente para controlar máquinas láser.
- LightBurn: Un software de pago muy popular por su interfaz intuitiva y potentes herramientas de diseño y control para máquinas láser.

- RDWorks: Un software comúnmente utilizado con máquinas láser chinas, que ofrece una amplia gama de funcionalidades para el corte y grabado láser.

En cuanto a los archivos G-Code, estos se generan a partir de programas de diseño asistido por computadora (CAD) y fabricación asistida por computadora (CAM). Estos programas permiten diseñar piezas en 3D y luego traducir esos diseños en instrucciones precisas (G-Code) que las máquinas CNC pueden interpretar para realizar operaciones de mecanizado, corte o grabado.

Algunos de los programas más utilizados para generar G-Code, tanto de código abierto como de pago, son:

- FreeCAD: Una herramienta de diseño CAD 3D de código abierto que incluye módulos CAM para generar G-Code.
- Blender + CAM Add-ons: Es un software de modelado 3D pero incorpora complementos adecuados puede usarse para generar G-Code.
- OpenSCAD: Un software de código abierto para modelado 3D paramétrico.
- Fusion 360: Ofrece una versión gratuita para uso personal, pero su versión completa y profesional es de pago. Combina herramientas CAD, CAM y CAE en un solo entorno.
- SolidWorks CAM: Software de pago, generalmente incluido como un módulo adicional en SolidWorks.
- Aspire: Software de pago especializado en diseño y fabricación para mecanizado 2D y 3D, muy popular en la creación de piezas decorativas y tallados.
- VCarve Pro: Una herramienta de pago, especialmente utilizado en proyectos de carpintería y grabado.
- Mastercam: Uno de los programas CAM más reconocidos en la industria, de pago, con una amplia gama de funcionalidades para mecanizado avanzado.

- AutoCAD + Inventor CAM: Combinación de herramientas de diseño y fabricación de pago.

Unidad de Control de la Máquina (MCU)

Es el sistema de control electrónico encargado de interpretar el programa en G-Code y convertirlo en señales eléctricas, las cuales son enviadas a los motores y actuadores de la máquina herramienta.

En las máquinas más avanzadas, se integra un sistema de retroalimentación mediante sensores, lo que permite mejorar la precisión, sincronización y eficiencia en las operaciones de mecanizado (Shi et al., 2015).

Básicamente, la unidad de control es una tarjeta electrónica que se comunica con la computadora a través de algún tipo de puerto o interfaz. Esta comunicación permite transferir las instrucciones del G-Code a la máquina, coordinando los movimientos de los ejes, la velocidad del husillo, la velocidad de avance y otras funciones críticas.

Actualmente, existen diferentes MCU que integran estas tecnologías de comunicación, ofreciendo soluciones adaptadas a las necesidades de cada máquina CNC. Algunas de las más populares son:

- Arduino + GRBL: Comunicación serial a través de USB.
- Raspberry Pi: Ethernet o USB.
- Mesa Electronics: Ethernet.
- SmoothStepper: USB o Ethernet.
- Dynomotion: USB.
- Mach3 + Tarjetas de puerto paralelo: Puerto paralelo.

Estas opciones de comunicación permiten adaptarse a diferentes necesidades, desde proyectos pequeños y de bajo costo hasta aplicaciones industriales de alta precisión.

Equipo de Procesamiento (Máquina Herramienta)

El equipo de procesamiento realiza los pasos necesarios para transformar la pieza diseñada en una pieza física terminada. Su funcionamiento está dirigido por la

MPU, que a su vez se controla mediante instrucciones contenidas en el programa de la pieza. En la mayoría de los sistemas CNC de tipo fresadora, el equipo de procesamiento consta de:

- Mesa de trabajo
- Husillo
- Rieles
- Motores paso a paso
- Sensores.

En sistemas CNC más sofisticados, se incorporan tecnologías adicionales para mejorar la eficiencia, precisión y seguridad, tales como:

- Sistemas de refrigeración
- Cambiadores automáticos de herramientas
- Sistemas de medición y calibración automática
- Cubiertas de protección
- Sistemas de visión artificial

2.2 Plataformas de posicionamiento flexibles

2.2.1 Principio de funcionamiento de las plataformas flexibles

Los sistemas de posicionamiento pueden desplazar espacialmente un objeto situado sobre su plataforma de trabajo, así mismo, se pueden incorporar una o varias pinzas para formar un sistema de posicionamiento más complejo, aumentando los grados de libertad. Actualmente, existen varios diseños de microposicionamiento que se han implementado con diferentes grados de libertad (DOF) en las direcciones X (Xu, 2014), XY (Wan & Xu, 2016), (X. Zhang et al., 2017) y XYZ (Kenton & Leang, 2012). Todos ellos tienen movimientos lineales en los ejes del plano cartesiano correspondiente.

Para lograr una alta precisión en los movimientos de los microposicionadores, los elementos móviles deben tener uniones sin espacios interiores o desviaciones (Chen et al., 1999). Para conseguir estas características se ha recurrido a la implementación de mecanismos flexibles. Estos mecanismos presentan ventajas con respecto a los mecanismos de cuerpo rígido, como el tiempo de montaje (Verotti, 2020), fabricación en serie, y ausencia de fricción en sus partes móviles, sin necesidad de lubricantes, ausencia de mantenimiento, o holgura, entre otras. Además, sus diseños pueden adaptarse a diferentes escalas dimensionales (Lobontiu, 2002), (Al-Jodah et al., 2021).

2.2.2 Tipos de actuación de microplataformas.

Los microposicionadores se basan en diferentes tipos de actuación, tales como:

- Electrotérmico (Nakic et al., 2016),
- Electrostático (Suthisomboon et al., 2020),
- Electromagnético (Khan et al., 2017),
- Aleación con memoria de forma (SMA) (Asua et al., 2008) y
- Piezoeléctrico (Q. Zhang et al., 2019).

Cabe destacar que, los actuadores piezoeléctricos son conocidos como dispositivos con mayor madurez tecnológica en el campo de los materiales activos, debido a sus altas características y una amplia gama de aplicaciones. Sus características son alta resolución, fuerza y frecuencia de funcionamiento, tiempo de respuesta rápido, larga vida útil, resistencia, compacidad, alta estabilidad a las interferencias electromagnéticas, rigidez y gran ancho de banda (Guo et al., 2015), ausencia de desgaste, etc. Por lo tanto, es natural que los actuadores piezoeléctricos se utilicen en sistemas de microposicionamiento (Safari & Akdoğan, 2008).

Sin embargo, la histéresis de los actuadores piezoeléctricos degrada considerablemente la precisión de posicionamiento del micro/nanosistema. La compensación de la histéresis es de una cuestión de gran importancia (Gan et al., 2017). Otras desventajas de los microactuadores piezoeléctricos son los altos voltajes

de actuación y el pequeño desplazamiento de salida, que limitan su potencial de aplicación.

2.3 Actuadores piezoeléctricos

2.3.1 Efecto piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos se caracterizan por su capacidad única de acoplamiento electromecánico, lo que les permite generar una carga eléctrica cuando se les aplica una tensión mecánica, fenómeno conocido como efecto piezoeléctrico directo. Asimismo, pueden experimentar una deformación mecánica en respuesta a un campo eléctrico aplicado, lo que se denomina efecto piezoeléctrico inverso (H. Liu et al., 2018).

La Tabla 2.1 muestra algunos posicionadores XYZ, actuados por piezoeléctricos, donde se pueden identificar sus principales características.

Tabla 2.1. Desempeño de los sistemas de microposicionamiento XYZ basados en actuadores piezoeléctricos.

Ref.	**Material**	**Factor de amplificación**	**Desplazamiento máximo X, Y, Z (μm)**	**Resolución (nm)**	**Frecuencia (Hz)**
(Tian et al., 2020)	Al 7075	8.1	128.1, 131.3, 17.9 (experimental)	8	262.8 y 365.9 (Frec. modal)
(Gao et al., 2016)	Al/7075	7.1	710 en todos los ejes (simulación)	-	76.4, 76.5, 79.6, 274.1, 326.7, 326.8 (Frecs. Modales (FEA))
(Li & Xu, 2011a)	Al/7075	8.29	165.8, 5.4, 6.5 (experimental)	180	49.59 (Frec. Modal. (FEA))

(X. Zhang & Xu, 2015a)	Al/7075	15.3	153 en todos los ejes (simulación)	-	-
(X. Zhang & Xu, 2015b)	Al/7075	9.31	120 en todos los ejes (simulación)	-	226 (Frec. modal)
(Kenton & Leang, 2012)	Al/7075	1	9, 9, 1 (experimental)	90	7000 (Frec. De operación)

De los microposicionadores analizados se deduce que los requisitos de control se reducen si la estructura de la plataforma tiene una mayor simetría en sus movimientos. Entonces, nuestro primer reto será generar una estructura con más posibilidades de comportamiento simétrico, considerando además las siguientes características: Un amplio rango de movimiento en los ejes XYZ, suficiente para ser competitivo con los sistemas de microposicionamiento analizados, con ventajas adicionales de bajo coste y un proceso de fabricación sencillo.

2.4 Sistemas de control

En la actualidad, existen numerosos procesos en el ámbito de la manufactura que requieren altos niveles de precisión, repetibilidad, estabilidad del proceso y una resolución elevada en el acabado de las piezas. Algunos ejemplos son: la fabricación de circuitos integrados, la producción de placas de circuito impreso, la fabricación de piezas automotrices y la elaboración de componentes médicos, entre otros. Para alcanzar estas características, se han desarrollado diversas soluciones tecnológicas, que van desde enfoques económicos hasta sistemas altamente sofisticados.

Una de las soluciones más económicas y ampliamente utilizadas es el uso de motores paso a paso. Estos motores se caracterizan por mover su eje en incrementos angulares precisos, lo que permite controlar mecanismos con una alta exactitud. Sin embargo, su principal limitación radica en cuando se utiliza un sistema sin retroalimentación, donde existe el riesgo de pérdida de pasos. Esto ocurre cuando se presentan fluctuaciones en la carga mecánica que superan la capacidad del motor o cuando hay interrupciones en el suministro de energía eléctrica (Derammelaere et al., 2014).

Para superar estas limitaciones, los sistemas de control más avanzados incorporan etapas de retroalimentación, lo que los convierte en sistemas de lazo cerrado. Estos sistemas monitorean constantemente la posición y velocidad del motor y se comparan con un valor de referencias deseado, corrigiendo desviaciones en tiempo real y garantizando movimientos precisos incluso bajo condiciones variables de carga (Ogata, 2010). De esta manera, los sistemas de control pueden clasificarse en dos categorías principales: sistemas de lazo abierto (sin retroalimentación) y sistemas de lazo cerrado (con retroalimentación).

2.4.1 Sistema de control de lazo abierto

Los sistemas de control de lazo abierto se componen principalmente de tres elementos fundamentales:

- **Entrada (Referencia):** Es la señal que define el valor deseado o el objetivo que se espera alcanzar en la salida.
- **Proceso (Sistema):** Es el conjunto de operaciones o transformaciones que se llevan a cabo para convertir la entrada en una salida.
- **Salida (Respuesta):** Es el resultado final del proceso, que representa la señal o acción obtenida.

En la siguiente figura se representa este modelo.

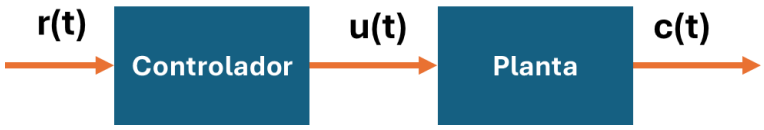


Figura 2.4. Diagrama a bloques de un sistema de lazo abierto básico (Salivahanan et al., 2015).

Aquí, r(t) es la señal de entrada, u(t) es la señal de control/actuación y c(t) es la señal de salida. En este sistema, la salida permanece inalterada para una entrada constante. En caso de discrepancia, la entrada debe ser modificada manualmente por un operario. Un sistema de control de bucle abierto es adecuado cuando hay tolerancia a la fluctuación en el sistema y cuando la variación de los parámetros del sistema puede manejarse con independencia de las condiciones ambientales.

En este tipo de sistemas de control, la entrada se determina únicamente con base en la experiencia previa o en un modelo del sistema, sin que exista retroalimentación de la salida. Esto significa que no se realiza una comparación entre la salida real y la entrada deseada, lo que puede resultar en errores o desviaciones significativas si el sistema se ve afectado por perturbaciones o cambios no previstos.

2.4.2 Sistema de control de lazo cerrado

A diferencia de los sistemas de control de lazo abierto, los sistemas de control de lazo cerrado incorporan etapas adicionales que permiten tener una retroalimentación de información de manera continua. Estas etapas son fundamentales para garantizar que el sistema pueda corregir errores y ajustar su comportamiento en tiempo real, lo que resulta en una mayor precisión y estabilidad.

Un ejemplo de un sistema sencillo de lazo cerrado corresponde a sistemas de control en los que la salida influye en la cantidad de entrada para mantener el valor de salida deseado, por ejemplo, en un Aire acondicionado con termostato, como se muestra en la Figura 2.5.

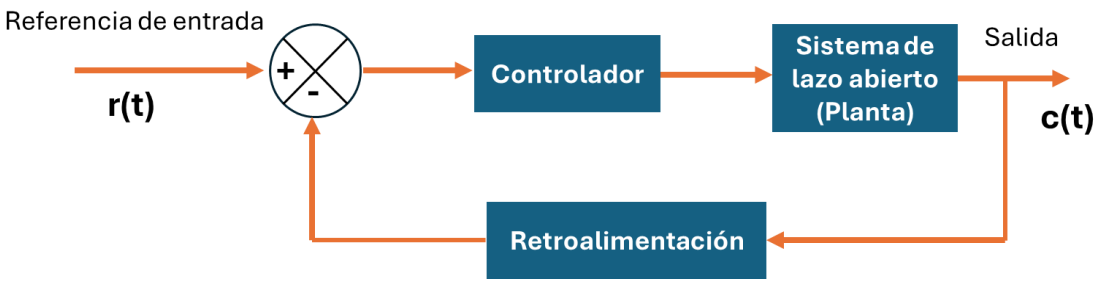


Figura 2.5. Esquema general de un sistema de control de lazo cerrado (Salivahanan et al., 2015).

Las principales etapas de un sistema de control de lazo cerrado son (Bonet Gil, 2018; Morgan & Haley, 2007):

- Sensor: Este componente es responsable de capturar la señal de salida del sistema y convertirla en una señal que pueda ser interpretada por el controlador. La precisión del sensor es crucial, ya que determina la calidad de la retroalimentación.
- Comparador: En esta etapa, la señal de salida medida se compara con la señal de referencia o valor deseado. La diferencia entre estas dos señales se conoce como error, el cual es utilizado para realizar ajustes en el sistema.
- Controlador: El controlador procesa la señal de error y determina la acción correctiva necesaria para minimizar o eliminar dicho error. Dependiendo del tipo de controlador (proporcional, integral, derivativo o una combinación de estos), se aplican diferentes estrategias de control.
- Actuador: El actuador recibe la señal del controlador y la convierte en una acción física que afecta al proceso controlado.
- Proceso: Es el sistema físico que se desea controlar, como un motor, un horno, un tanque de líquido, entre otros.

Estas dos etapas adicionales permiten que los sistemas de lazo cerrado sean más robustos y precisos, ya que pueden corregir errores en tiempo real y adaptarse a

cambios o perturbaciones en el sistema. Otro ejemplo, puede encontrarse en (Kula, 2024).

2.4.3 Control PID

Existen diferentes tipos de control de lazo cerrado utilizados en la industria para la operación de procesos. Sin embargo, uno de los más comunes y ampliamente implementados es el que emplea un algoritmo de control del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (Jamil et al., 2022). Este tipo de controlador combina las mejores características del control proporcional-derivativo (PD) y del control proporcional-integral (PI), lo que lo convierte en una solución versátil y eficaz para una amplia gama de aplicaciones (Ricardo Hernández Gaviño et al., 2010).

Cada una de las partes del algoritmo PID desempeña un papel específico en el ajuste de la salida del proceso (García Jaimes, 2009):

- **Acción Proporcional (P)**: Ajusta la posición del elemento final de control (como una válvula o un motor) en proporción directa a la desviación o error entre la variable controlada y el valor deseado (set-point). Cuanto mayor sea el error, mayor será la corrección aplicada. Sin embargo, por sí sola, la acción proporcional puede dejar un error residual en estado estacionario.
- **Acción Integral (I)**: Se encarga de eliminar el error residual en estado estacionario que la acción proporcional no puede corregir. Lo hace sumando los errores a lo largo del tiempo y ajustando la salida en función de esta acumulación. Esto permite que el sistema alcance el set-point de manera precisa, aunque puede introducir cierta lentitud en la respuesta.
- **Acción Derivativa (D)**: Anticipa el comportamiento futuro del error al considerar la velocidad de cambio de la desviación. Esto permite una corrección más rápida y evita oscilaciones excesivas en la respuesta del sistema. Sin embargo, un uso excesivo de la acción derivativa puede hacer que el sistema sea más sensible al ruido en la señal de medición.

La combinación de estas tres acciones (P, I y D), como se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura 2.6, permite que el controlador PID ofrezca una respuesta rápida, precisa y estable, adaptándose eficientemente a las dinámicas del proceso.

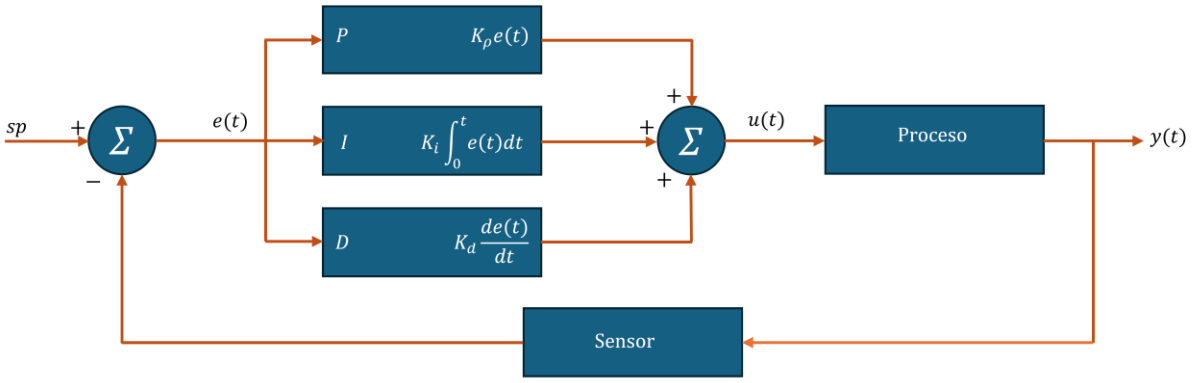


Figura 2.6. Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), basada de (Chinmay Vilas Samak et al., 2018).

Para procesos que utilizan microcontroladores o microprocesadores para realizar la actuación en la etapa de planta, se emplean controladores digitales. Estos controladores parten de un modelo continuo del PID y aplican técnicas de discretización, como la transformada Z, para adaptar el controlador a un entorno digital. La ecuación de un PID continuo está dada por (García Breijo, 2008):

$$u(t) = K_p\, e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (2.1)$$

donde:

$u(t)$: Salida del controlador

$e(t)$: Señal de error

K_p : Ganancia proporcional

K_i : Ganancia integral

K_d: Ganancia derivativa

Utilizando el método de integración trapezoidal (también conocido como regla de Tustin o transformación bilineal), la función de transferencia discreta del PID se puede expresar como (Ogata, 1996), (C. Kuo, 1996):

$$G(z) = \frac{(K_P + TK_I/2 + K_D/T)z^2 + (TK_I/2 - K_P - 2K_D/T)z + K_D/T}{z(z-1)} \qquad (2.2)$$

donde:

T: Periodo de muestreo

z: Operador de la transformada Z

Además del método de integración trapezoidal, existen otras técnicas de discretización ampliamente utilizadas (Dorf & Bishop, 2005), como:

- Método de Euler hacia adelante
- Método de Euler hacia atrás
- Método de diferencias finitas
- Método de mapeo polo-cero

Cada método tiene sus ventajas y desventajas en términos de precisión, estabilidad y facilidad de implementación, por lo que la elección del método de discretización depende de las características específicas del sistema y los requisitos de diseño.

2.5 Sensores de micro desplazamientos sin contacto

Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas de control de lazo cerrado incorporan una etapa de retroalimentación, la cual está integrada principalmente por uno o varios sensores específicamente seleccionados para el tipo de proceso a controlar.

En el caso particular de las máquinas herramientas, como tornos o fresadoras, estos sensores pueden estar integrados directamente en los ejes de movimiento (ejes

X, Y, Z) o en los cabezales de trabajo. Para sistemas de micromaquinado de alta precisión, los sensores pueden registrar desplazamientos en tiempo real con resoluciones micrométricas o incluso nanométricas, garantizando un control preciso de la posición y velocidad.

Es conveniente que estos sensores sean del tipo sin contacto (como encóders ópticos, sensores láser o inductivos) para evitar desgaste mecánico y aumentar la vida útil del sistema, minimizar interferencias en el movimiento de las piezas y mejorar la precisión, especialmente en aplicaciones donde vibraciones o fuerzas externas podrían afectar mediciones por contacto.

Además, en entornos de alta velocidad o con materiales delicados, los sensores sin contacto reducen el riesgo de daños en la pieza o el instrumento de medición, lo que los hace ideales para aplicaciones avanzadas de fabricación.

Los sensores sin contacto más utilizados en procesos de micromaquinado o en aquellos que requieren alta resolución en la medición son: capacitivos, de corrientes de Eddy, ópticos, transformadores de desplazamiento lineal variable (LVDT) e inductivos.

A continuación, nos centraremos en los sensores empleados en el desarrollo de esta tesis.

2.5.1 Sensores de corriente de Eddy o de Foucault

Estos sensores funcionan bajo el principio de inducción electromagnética. Su estructura principal consta de una bobina conectada a un oscilador. Su funcionamiento se resume en los siguientes pasos (Fleming, 2013):

1. La bobina se alimenta con una corriente alterna, generando un campo magnético variable.
2. Cuando la bobina se acerca a un objeto metálico, el campo magnético induce corrientes parásitas circulares (o corrientes de Eddy) en el material, debido a la ley de Lenz.
3. Estas corrientes generan un campo magnético opuesto al de la bobina, lo que modifica su impedancia.

4. La variación de impedancia se detecta mediante circuitos electrónicos, como amplificadores operacionales, que convierten la señal en una salida medible.

En la Figura 2.7 se muestra una representación gráfica del funcionamiento de un sensor de corrientes de Eddy.

Aunque este sensor opera mediante un campo magnético, su principio de funcionamiento difiere del de un sensor de presencia inductivo. Mientras que el sensor de corrientes de Eddy mide variaciones en la impedancia provocadas por las corrientes inducidas en el material objetivo, el sensor inductivo basa su operación en la variación de la inductancia de la bobina causada por la presencia de materiales ferromagnéticos.

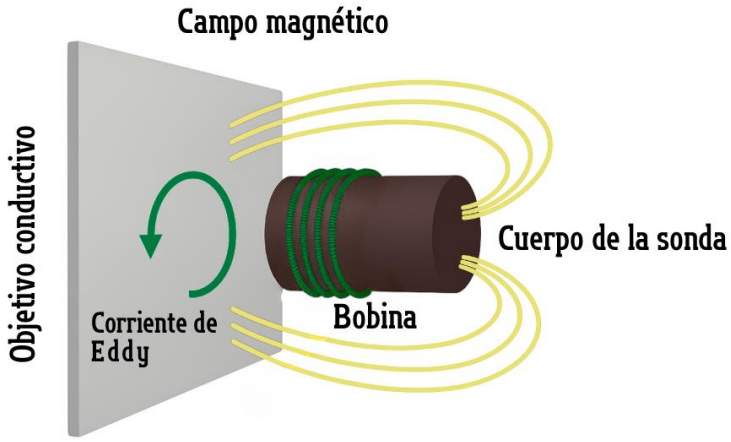


Figura 2.7. Principio de funcionamiento de un sensor de corrientes de Eddy. Cuanto más se acerque la bobina al objetivo, las corrientes inducidas generar un campo magnético que se opone al generado por la bobina y provoca que la resistencia efectiva de la bobina aumente.

2.5.2 Ópticos

Existen diversas técnicas ópticas para medir desplazamientos sin contacto, que varían en complejidad y precisión. Algunas son relativamente sencillas, como la medición de la luz reflejada en una superficie, mientras que otras emplean principios avanzados para alcanzar resoluciones extremadamente altas, como los interferómetros.

Además, existen otras técnicas que se basan en distintos efectos de la luz para la detección y medición de desplazamientos, entre las cuales destacan (Berkovic & Shafir, 2012):

- Detección por intensidad luminosa
- Triangulación láser
- Detección por tiempo de vuelo
- Sensado confocal
- Detección Doppler
- Diversas variantes de interferometría

Cada una de estas técnicas tiene ventajas y limitaciones, por lo que su elección depende de factores como la resolución requerida, el tipo de superficie del objeto a medir y las condiciones del entorno.

Entre ellas, la triangulación láser destaca en aplicaciones industriales por su capacidad para medir desplazamientos micrométricos, combinando alta precisión con robustez operativa. Esta técnica se basa en el principio geométrico de triangulación, donde un haz láser incide sobre la superficie objetivo y un sensor de posición detecta el punto reflejado. A partir de la variación angular del reflejo, se puede calcular con gran precisión el desplazamiento del objeto.

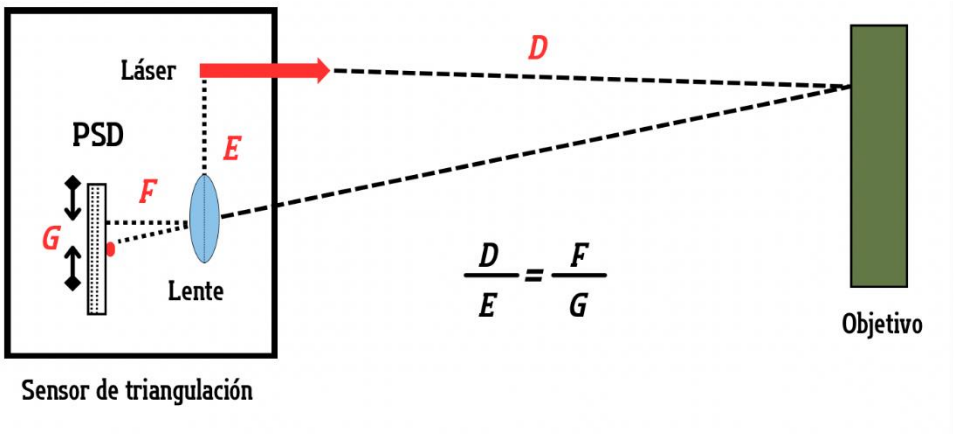


Figura 2.8. Esquema del principio de funcionamiento de un sensor óptico de desplazamiento utilizando la técnica de triangulación. Basada de (Berkovic & Shafir, 2012).

CAPÍTULO 3

Desarrollo teórico y experimental

En este capítulo, se presenta la metodología para llevar a cabo la caracterización del microposicionador, así como el diseño y la implementación del arreglo experimental para esta caracterización.

Posteriormente, se explica el funcionamiento de los elementos o dispositivos relevantes, que se utilizaron en el arreglo experimental, tales como el sensor de desplazamiento micrométrico y el arreglo de actuadores piezoeléctricos, entre otros.

3. DESARROLLO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL

3.1 Diseño de actuador piezoeléctrico

El actuador piezoeléctrico, de bajo costo, que se ha seleccionado para realizar la tarea de desplazar los elementos flexibles que conforman el microposicionador es conocido como piezo buzzer. Este dispositivo se utiliza principalmente como generador de sonido en alertas sonoras. Además de su principal aplicación, los piezo buzzer se utilizan en aplicaciones que requieren desplazamientos del orden de los micrómetros hasta los nanométricos, algunos ejemplos son: escáneres en las direcciones XYZ para microscopios de fuerza atómica (Wang et al., 2013), motores ultrasónicos (Guilleus et al., 2017), bombas para el control de microfluido en aplicaciones biomédicas (Kaçar et al., 2020), (Ma et al., 2015), (Shabanian et al., 2016), sistemas de generación de energía eléctrica por medio de energía mecánica (Y. H. Zhang & Lee, 2019), motor lineal para desplazar mecanismos flexibles (Lee, 2018), etc.

La estructura del piezo buzzer consiste en dos partes: un disco metálico de latón y un disco de material piezoeléctrico Titanato Zirconato de Plomo (PZT), cuyo diámetro es menor que el de latón; sobre el disco metálico está adherido el disco con material PZT y en ambos materiales se conecta una terminal para poder energizarlo. En cada disco, se conecta un terminal para alimentar el actuador, generalmente, el terminal negativo se conecta al disco de latón y el positivo al disco PZT, o inversamente, para producir una deformación inversa, elegimos el último. (Ver Figura 3.1). Debido a su estructura, los piezo buzzer, pueden llegar a generar un desplazamiento lineal que supera a algunos actuadores piezoeléctricos existentes en el mercado, sin embargo, la fuerza que generan es mucho menor que los actuadores comerciales, por lo tanto, su aplicación está limitada por dicha característica.

Las dimensiones y los parámetros principales de rendimiento de los buzzers utilizados para la implementación de las actuadores tipo stacks que generan el movimiento en los ejes X, Y y Z se muestran en la Tabla 3.1. Los buzzers utilizados

para el eje Z tienen un tamaño menor, debido a que en este eje se requiere un menor movimiento.

Tabla 3.1. Dimensiones y parámetros de desempeño de los buzzers individuales.

Buzzer (eje)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	Frecuencia de resonancia (kHz)	Impedancia de resonancia (Ω)	Capacitancia estática (nF)
X, Y	27	18.5	0.2	0.10	3.5	≤ 300	18
Z	18	14.5	0.2	0.10	N.A	N.A.	11

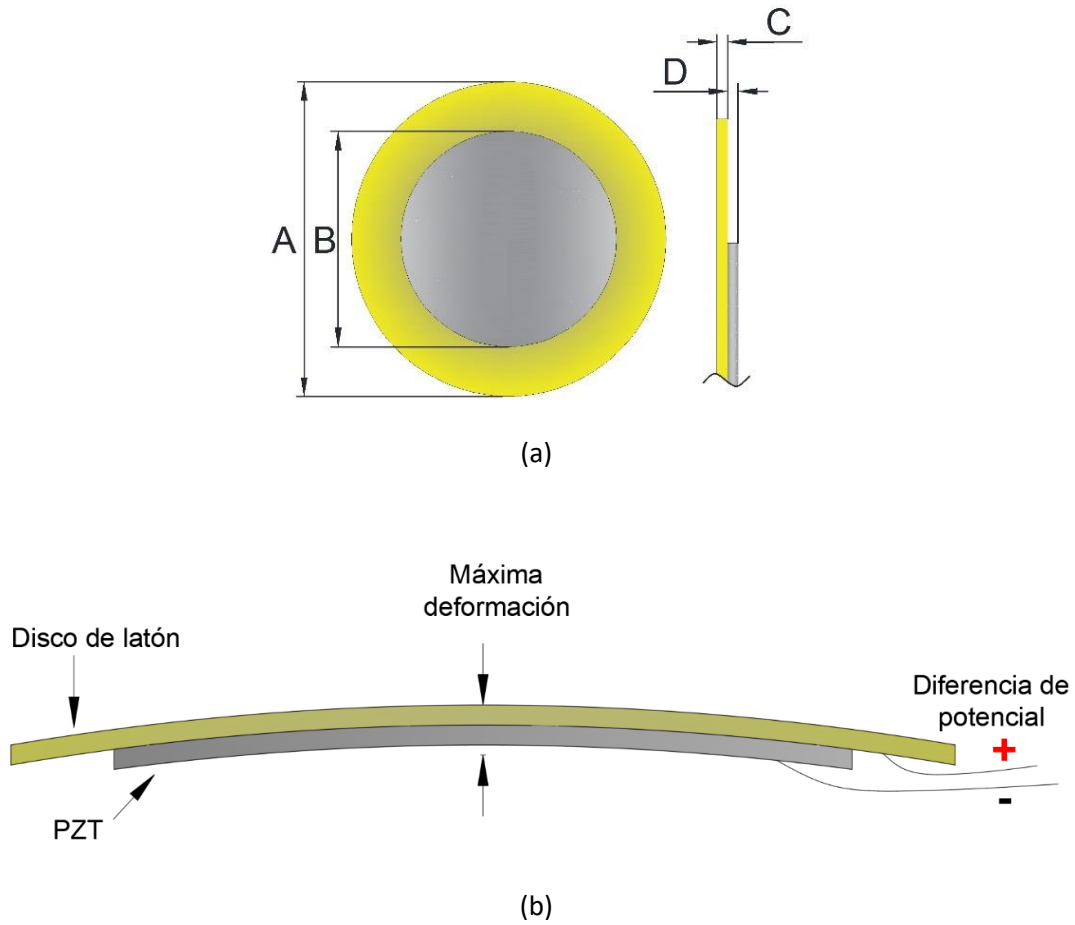
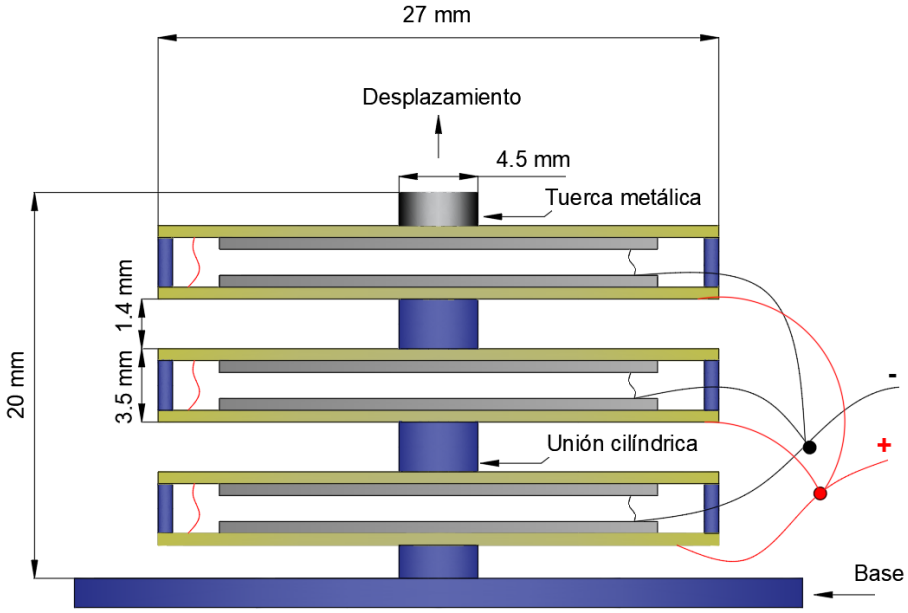


Figura 3.1. Buzzer piezoeléctrico: (a) Descripción de las dimensiones y b) Vista transversal.

Considerando la baja fuerza de cada zumbador piezoeléctrico y el gráfico de fuerza versus desplazamiento de los actuadores piezoeléctricos (Prasad et al., 2005),

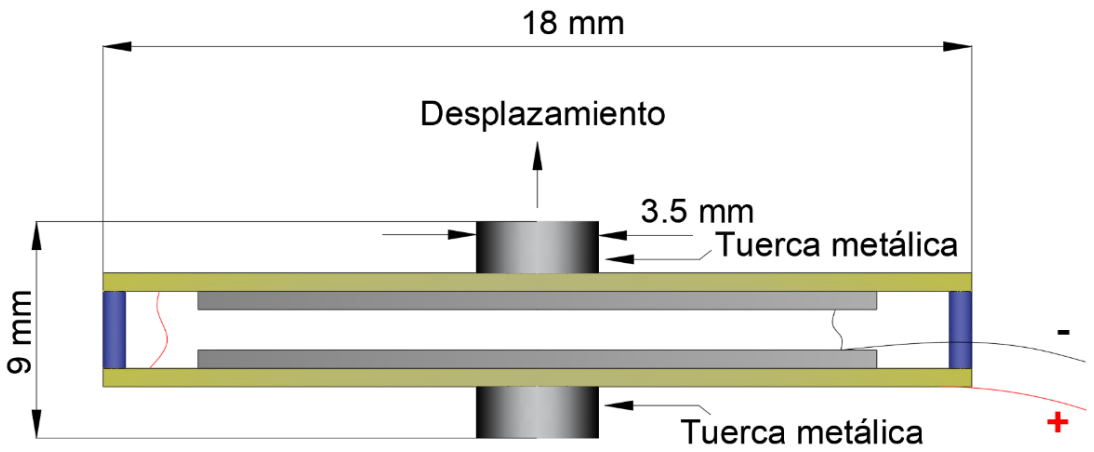
se diseñó un actuador piezoeléctrico tipo stack, con el fin de mejorar las características individuales, especialmente en el desplazamiento. El diseño consiste en una disposición paralela de seis zumbadores piezoeléctricos, ubicados dentro de una estructura de PLA, fabricados mediante el proceso de fabricación aditiva, Figura 3.2 (a). Para el caso del eje Z, una disposición de dos zumbadores piezoeléctricos fue suficiente, Figura 3.2 (b). El desplazamiento individual de buzzers utilizados en los ejes XYZ se muestra en la Figura 3.3.



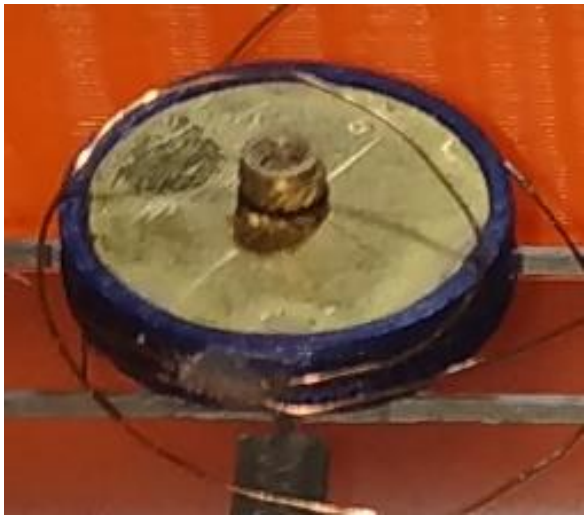
(a)



(b)

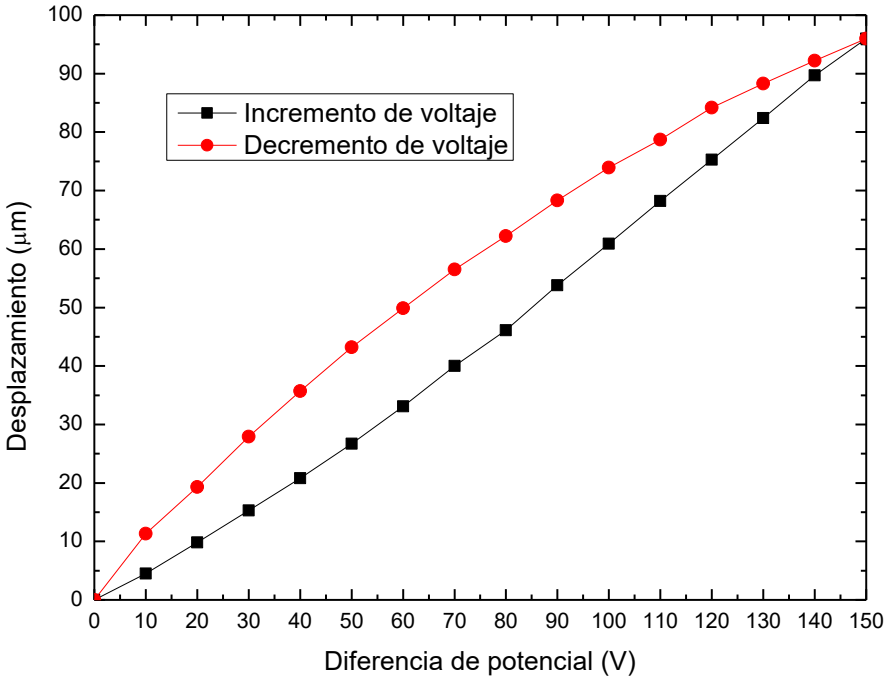


(c)

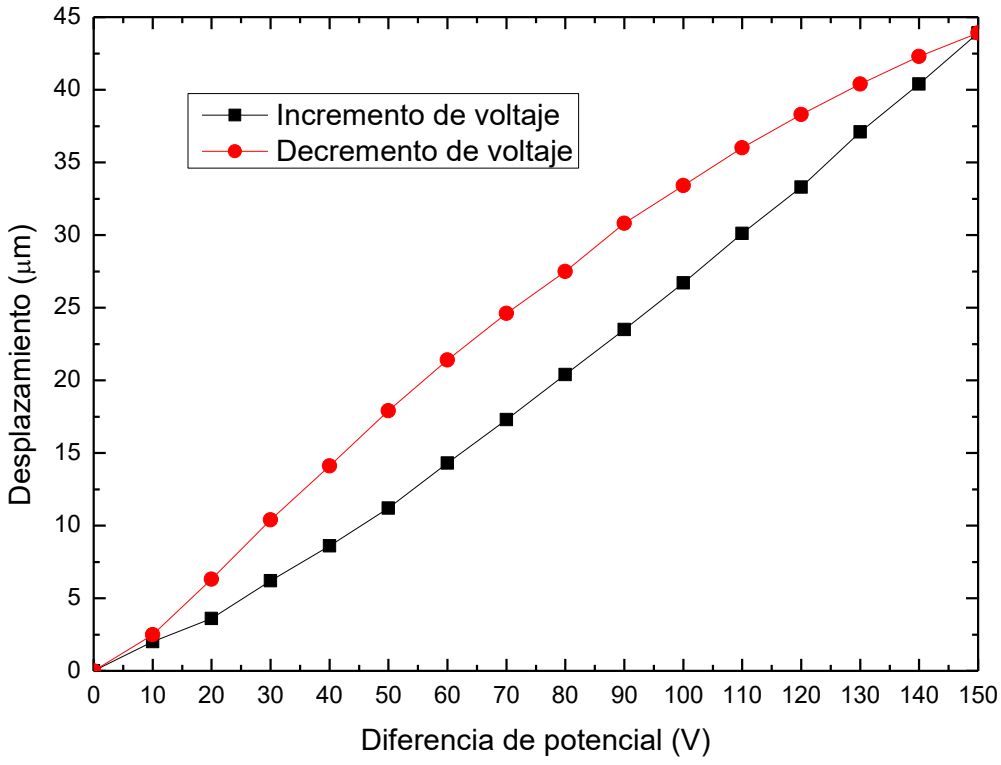


(d)

Figura 3.2. Actuador piezoeléctrico. (a) Diagrama esquemático del stack piezoeléctrico con seis zumbadores, para los ejes de desplazamiento X e Y. Vista transversal, y (b) su implementación usando una estructura hecha en PLA. (c) Diagrama esquemático del stack piezoeléctrico con dos buzzers, para el eje de desplazamiento Z, y (d) su implementación usando una estructura fabricada en PLA.



(a)



(b)

Figura 3.3. Deformación de los buzzers piezoeléctricos utilizados para (a) ejes X, Y y b) eje Z

Para la punta del actuador se seleccionó una tuerca metálica, cuya rosca sirve para sujetar el elemento a mover. Se buscó un diámetro pequeño de esta tuerca, el diámetro mínimo encontrado fue de 3 mm, para no afectar la deformación del actuador tipo stack.

La disposición experimental utilizada para determinar el desplazamiento de los tres actuadores piezoeléctricos correspondientes a los ejes X, Y y Z se muestra en la Figura 3.4; mientras que los resultados correspondientes al desplazamiento en cada eje se muestran en la Figura 3.5. Dichos datos fueron conseguidos por medio de un sensor óptico de desplazamiento, que fue desarrollado utilizando un lector de discos CD/DVD, conocido como Pick-up, la resolución que se obtuvo es de 100 nm. Los Pick-ups como sensores de desplazamiento son una buena opción para realizar mediciones precisas, como ha sido demostrado por (Hwu et al., 2008), (Li et al., 2012) y (Lee, 2015).

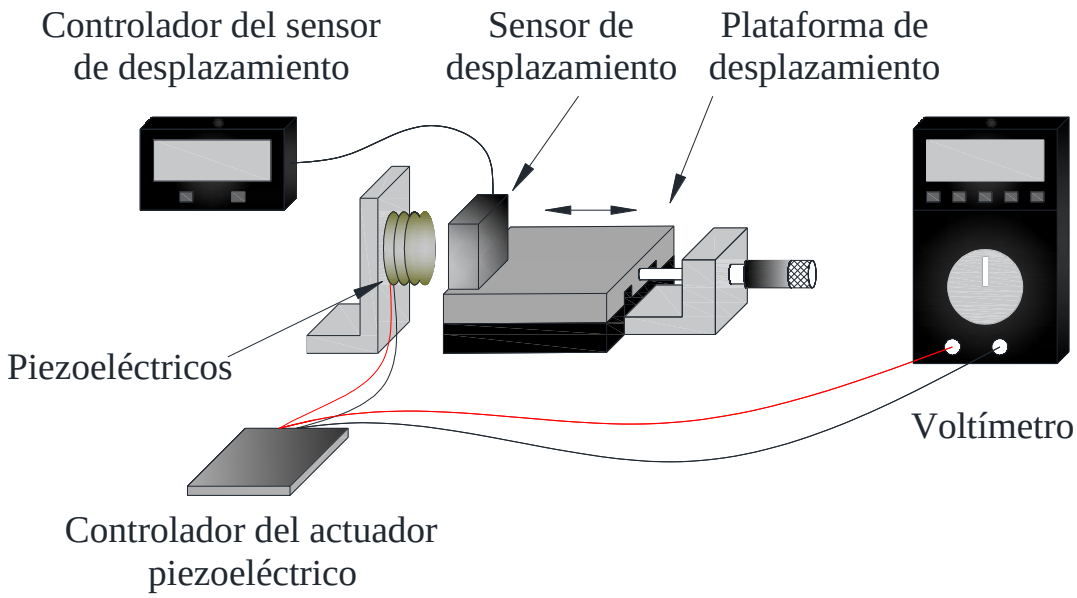
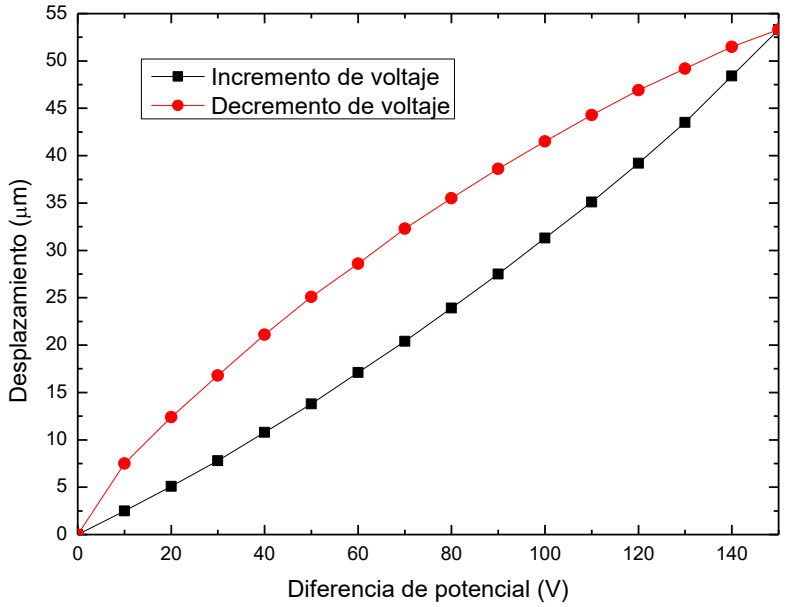
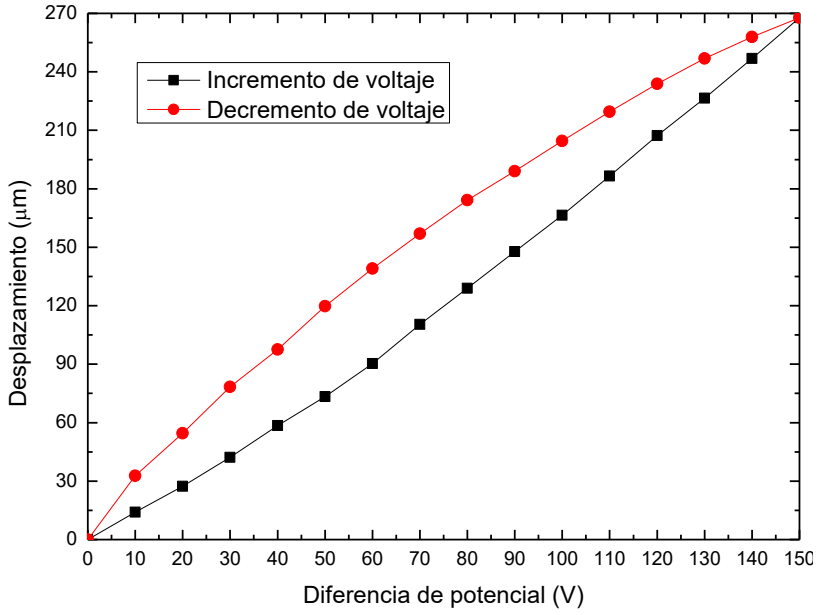


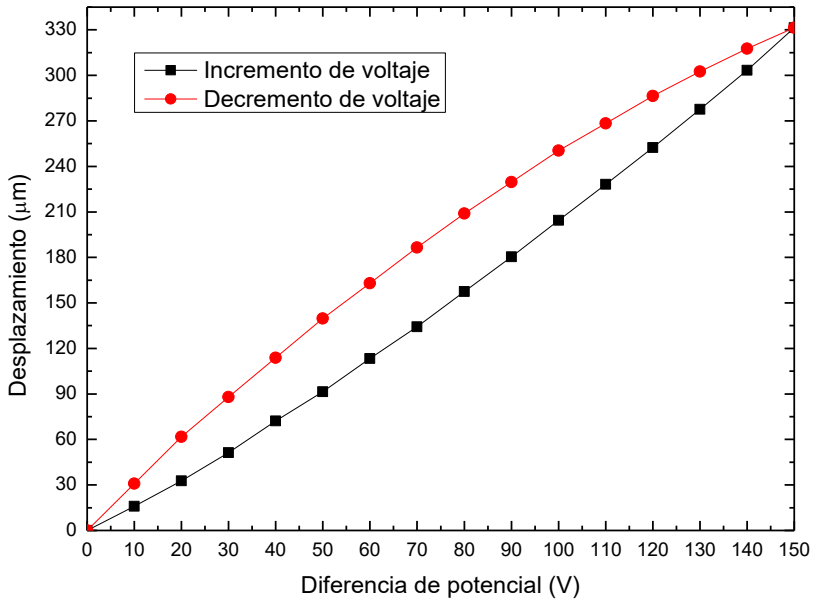
Figura 3.4. Configuración experimental para registrar el desplazamiento de los tres actuadores tipo stack para los ejes XYZ.


Incremento de voltaje
Decremento de voltaje
Desplazamiento (μm)
Diferencia de potencial (V)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
0
20
40
60
80
100
120
140

(a)


Incremento de voltaje
Decremento de voltaje
Desplazamiento (μm)
Diferencia de potencial (V)
0
30
60
90
120
150
180
210
240
270
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150

(b)



(c)

Figura 3.5. Grafica del desplazamiento de salida en función del voltaje aplicado para (a) Actuador piezoeléctrico tipo stack para el eje Z, (b) y (c) Actuador piezoeléctrico tipo stack para los ejes X e Y.

3.2 Diseño del microposicionador

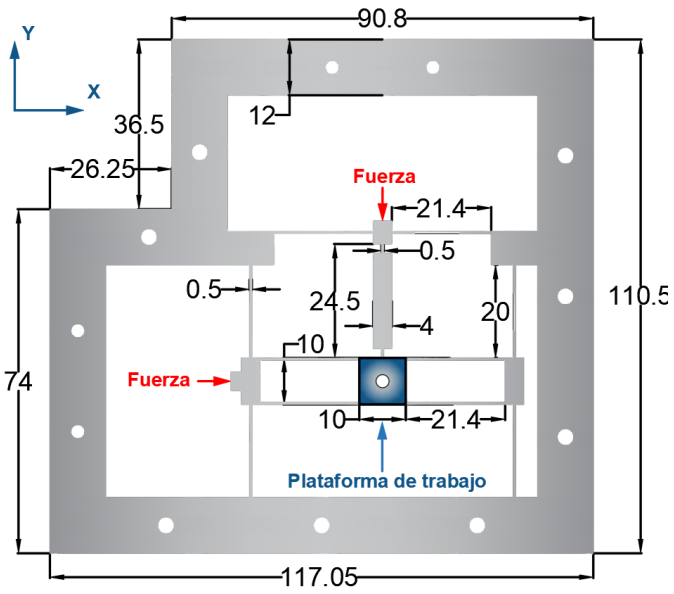
El procedimiento de diseño se basó en una metodología de mejora continua. Esta consistió en desarrollar un diseño inicial, simular su comportamiento en términos del desplazamiento de cada eje, y analizar la respuesta ante la aplicación de una fuerza de 0.1 N. Se estableció como criterio que ambos ejes debían presentar desplazamientos similares y que el esfuerzo en las vigas de guiado no superara el límite de resistencia del material, comenzando con ABS como material base. Si el diseño cumplía con estos requisitos, se procedía a una simulación más detallada y al análisis del modelo teórico correspondiente. En caso contrario, se realizaban ajustes en el diseño y se repetía el proceso hasta obtener una versión final que cumpliera las condiciones establecidas.

En el diseño final de la plataforma de trabajo, el movimiento en cada eje es generado por la fuerza de entrada producida por su respectivo actuador piezoeléctrico tipo stack. Este desplazamiento se transmite mediante mecanismos flexibles, los cuales fueron diseñados específicamente para garantizar una respuesta simétrica en los ejes X e Y. Es importante señalar que el método de activación del microposicionador se clasifica como de actuación directa, ya que la fuerza del actuador se transfiere directamente a la estructura sin la intervención de elementos intermedios de amplificación o transmisión (Li & Xu, 2011b).

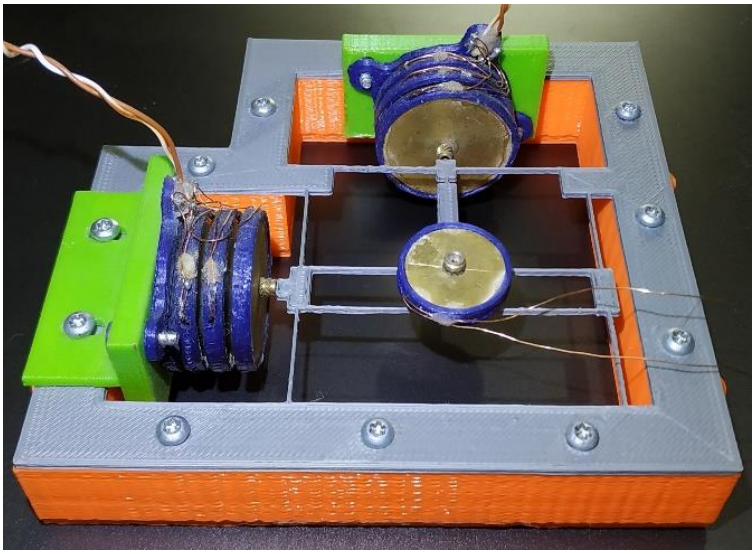
Dado que los elementos flexibles del microposicionador requieren una fuerza relativamente baja para su desplazamiento, y considerando el elevado desplazamiento proporcionado por el actuador piezoeléctrico tipo stack, no fue necesario incorporar mecanismos adicionales de amplificación del movimiento. Es importante destacar que el uso de mecanismos de amplificación generalmente implica una demanda adicional de fuerza para su funcionamiento, lo cual resulta contraproducente en este caso. Esto se debe a que los actuadores piezoeléctricos, si bien pueden generar desplazamientos considerables, ofrecen una fuerza limitada; en particular, la fuerza de bloqueo en los ejes X e Y es de aproximadamente 1.27 N. Por lo tanto, evitar mecanismos de amplificación permite aprovechar al máximo el desplazamiento generado por el actuador sin comprometer su eficiencia.

El diseño del microposicionador se muestra en la Figura 3.6, que se compone esencialmente de:

- Soporte para los actuadores piezoeléctricos.
- Una plataforma de trabajo (soporte móvil), donde se colocan las muestras.
- Un conjunto de elementos flexibles para el movimiento en el eje X.
- Un conjunto de elementos flexibles para el movimiento en el eje Y.
- El actuador piezoeléctrico del eje Z, está situado encima de la plataforma de trabajo (opcional de acuerdo con el proceso a realizar).



(a)



(b)

Figura 3.6. (a) Diagrama esquemático del posicionador biaxial, (b) su implementación en materiales usados en la manufactura aditiva.

Los orificios en el contorno de la plataforma tienen dos funciones:

(1) Sujetar la plataforma en una base de soporte y

(2) fijar la estructura de los actuadores piezoeléctricos tipo stack a la base soporte.

Este pequeño posicionador tiene una geometría simple y una respuesta simétrica razonable en los ejes X e Y, a pesar de las diferencias en las configuraciones en los ejes X e Y. Comúnmente se utiliza un mecanismo paralelo completamente simétrico. Una ventaja de nuestro arreglo es el menor tamaño del posicionador completo y un número reducido de elementos de flexibles. Este prototipo también se diferencia por el diseño de los actuadores piezoeléctricos y los materiales utilizados.

3.3 Modelo del microposicionador

La principal consideración del diseño fue proporcionar desplazamientos simétricos a la plataforma de trabajo, en los ejes X e Y. Para lograr esto, se utilizó una configuración diferente de mecanismos flexibles en cada eje. Este diseño central determina la forma del contorno externo, pero puede ser sustituido por cualquier otra forma geométrica, siguiendo los requerimientos del usuario.

En el microposicionador (Figura 3.6 a), todos los elementos suspendidos, así como los brazos y contornos, presentan un grosor uniforme de 0.5 mm. Para su fabricación, se emplearon tres materiales comúnmente utilizados en manufactura aditiva: PLA, ABS y PETG. Se evaluó el desempeño del microposicionador con cada uno de estos materiales, y finalmente se seleccionó el más adecuado en función de los resultados obtenidos.

La plataforma de trabajo, de forma cuadrada, fue seleccionada con el fin de favorecer la simetría en los movimientos a lo largo de los ejes. Se definió una dimensión de 1 cm^2, lo cual proporciona un área adecuada para manipular tanto muestras de tamaño micrométrico como milimétrico. Durante el diseño, se priorizó una respuesta simétrica en ambos ejes de apoyo de la plataforma, con el objetivo de asegurar un desplazamiento equilibrado y preciso.

Desplazamiento en el eje Y

El comportamiento del eje Y fue modelado a partir de un modelo equivalente simplificado de los mecanismos de guía (Figura 3.7a), basado en los trabajos de (Q. Zhang et al., 2020) y (Liu & Yan, 2017).

Para cada brazo (considerado como una viga simple) de área transversal w*t, donde w es la anchura y t, el espesor, se calcula el momento de inercia I_{b1} mediante la conocida relación (J. X. J. Zhang & Hoshino, 2019), (Kaajakari, 2009):

$$I_{b1} = \frac{wt^3}{12} \tag{3.1}$$

$$k_{b1} = \frac{12EI_{b1}}{L_{b1}^3} \tag{3.3}$$

La rigidez de una viga simple de longitud l_{b1} viene dada por:

donde L_{b1} es la longitud de la viga.

La rigidez equivalente de los 6 brazos de guía en paralelo con longitud L_{b1}, de la plataforma de trabajo que determina el desplazamiento en el eje Y (Figura 3.7a y b) se expresa como:

$$k_{eqY} = 6k_{b1} = \frac{72EI_{b1}}{L_{b1}^3} \tag{1.2}$$

El desplazamiento de la plataforma de trabajo en el eje Y se calcula a partir de la ley de Hooke, como (Q. Zhang et al., 2020), (Liu & Yan, 2017), (Kaajakari, 2009):

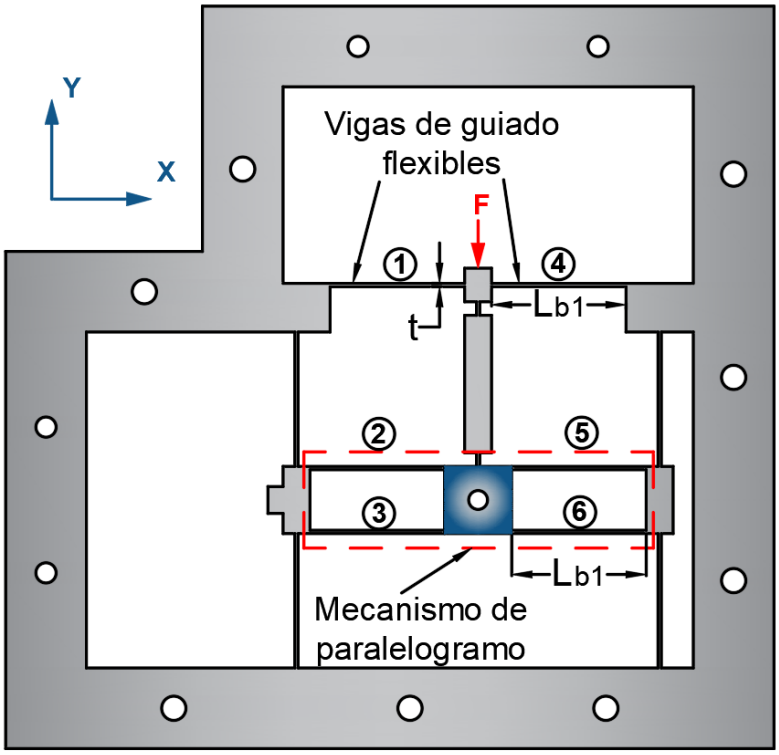
$$\delta_Y = \frac{F}{k_{eqY}} \tag{3.2}$$

Desplazamiento en el eje X

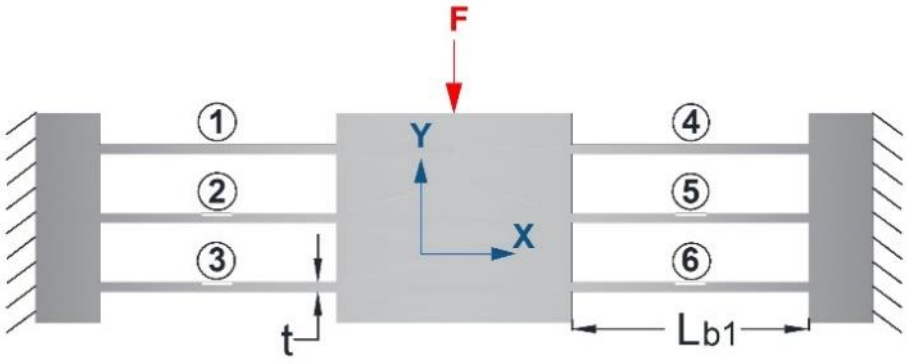
En este caso, se consideran cinco vigas guiadas (Figura 3.7c, d). La rigidez equivalente, en este caso, viene dada por:

$$k_{eqX} = 4k_{b2} + k_{b3} = \frac{48EI_{b2}}{L_{b2}^3} + \frac{12EI_{b3}}{L_{b3}^3} \quad (3.3)$$

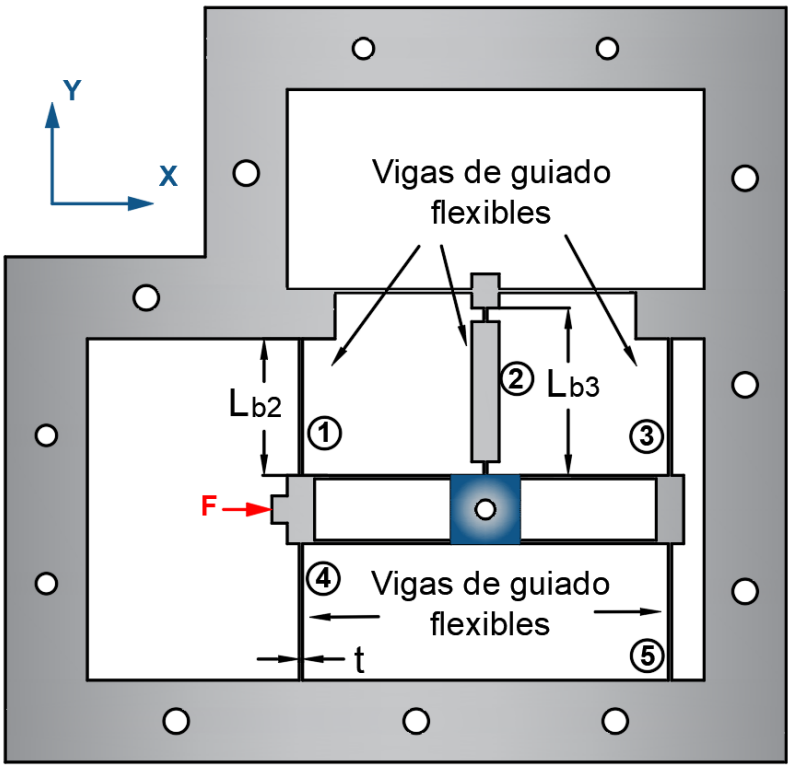
donde L_{b2} y L_{b3} son las correspondientes longitudes de las vigas.



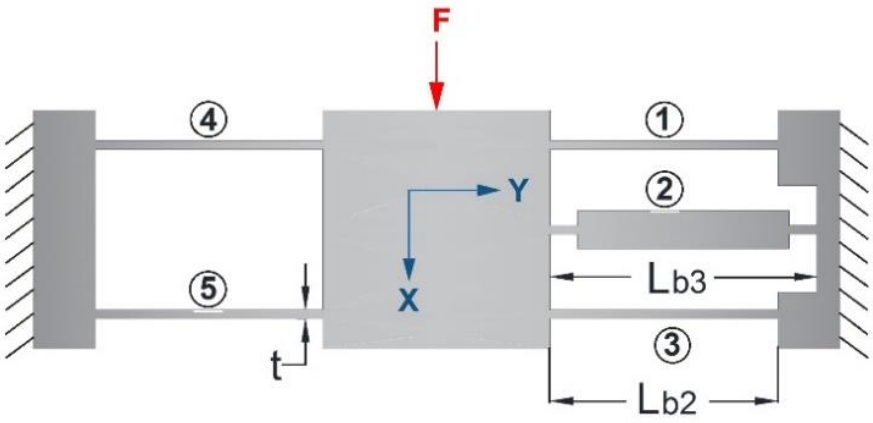
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.6. (a) Identificación de los elementos flexibles en el interior del posicionador y (b) diagrama equivalente para el eje Y. Elementos de identificación correspondientes a (c) el posicionador y (d) el diagrama equivalente para el eje X.

3.4 Simulación del microposicionador

El diseño del microposicionador fue simulado en ANSYS ™ para validar específicamente el desempeño de los mecanismos flexibles, que proporcionan el desplazamiento en los ejes X e Y, y también para optimizar las dimensiones de sus elementos flexibles, así como para conocer las frecuencias modales de la estructura (Kim et al., 2020). Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados se presentan en la Tabla 3.2, donde es importante mencionar que la investigación sobre la utilización del ABS para la fabricación es muy extensa y los valores mostrados fueron obtenidos experimentalmente en las respectivas referencias, mientras que en los casos de PETG y PLA, los valores fueron proporcionados de la hoja de datos del fabricante.

Tabla 3.2. Propiedades de materiales, (Tymrak et al., 2014), (Dhaliwal & Dundar, 2020), (Rybachuk et al., 2017), (Tarrazó-Serrano et al., 2018), (Grupo XDS, 2016),(RODRIGUEZ RAMIREZ et al., 2019).

Parámetros y unidades	ABS	PETG	PLA
Módulo de Young, (GPa)	1.807	2.15	3.5
Razón de Poisson	0.38	0.4	0.4
Esfuerzo, (MPa)	21	50	72
Esfuerzo último, (MPa)	22	60	26.4
Densidad, (kg/m3)	1050	1270	1250
Punto de fusión (°C)	225–245	135	145–177

3.4.1 Análisis estructural estático

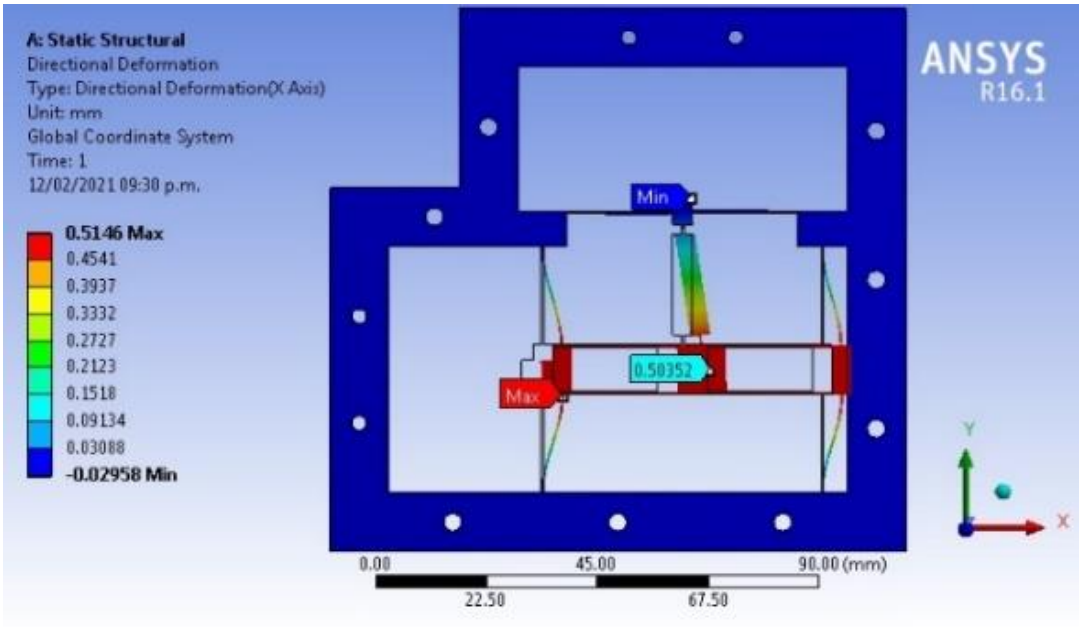
La metodología que se implementó para simular el diseño del microposicionador consistió en realizar un proceso de simulación en ANSYS, empleando los datos del ABS, debido a que posee un módulo de Young menor a los otros materiales considerados y por lo tanto una mayor flexibilidad de los mecanismos compatibles. Se buscó un comportamiento simétrico del diseño flexible en ambos ejes. Después de

obtener un diseño funcional, también se fabricó la estructura en PLA y PETG para comparar resultados.

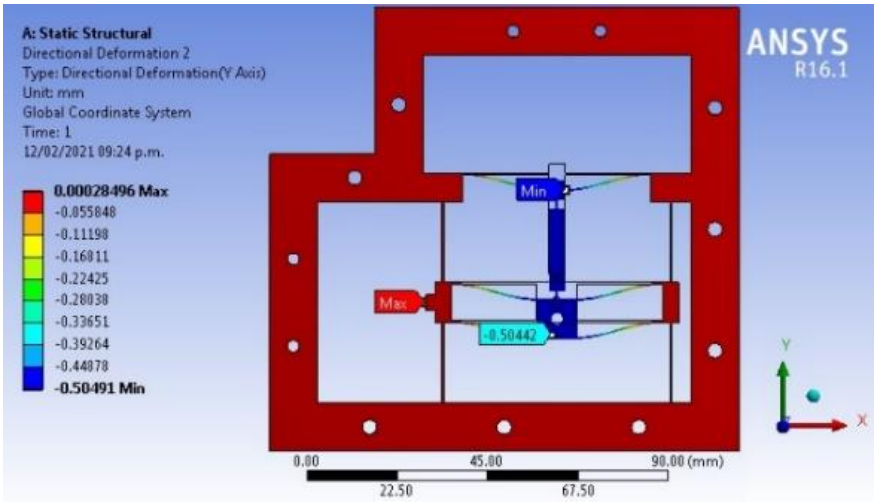
Durante la simulación con ABS se analizó el comportamiento y se identificaron elementos clave que se modificaron para mejorar el desempeño en términos de una mínima fuerza de entrada con un máximo desplazamiento en la salida. La distribución de esfuerzo de von Mises tiene valores más bajos que el límite elástico.

Para comprobar el comportamiento simétrico del microposicionador se realizaron dos procedimientos de medición en la simulación en ANSYS. En el primero, se realizaron dos simulaciones, utilizando fuerzas aplicadas separadas en cada eje. Bajo esta condición, el desplazamiento del eje perpendicular no interfiere con el eje bajo análisis. En la Figura 3.8 y en la Tabla 3.3 se dan los resultados obtenidos.

En el segundo procedimiento, ambas fuerzas de entrada se aplicaron simultáneamente, para este caso fue de interés observar el desplazamiento en ambos ejes para comprobar si se mantenía la simetría obtenida aplicando fuerzas separadas.



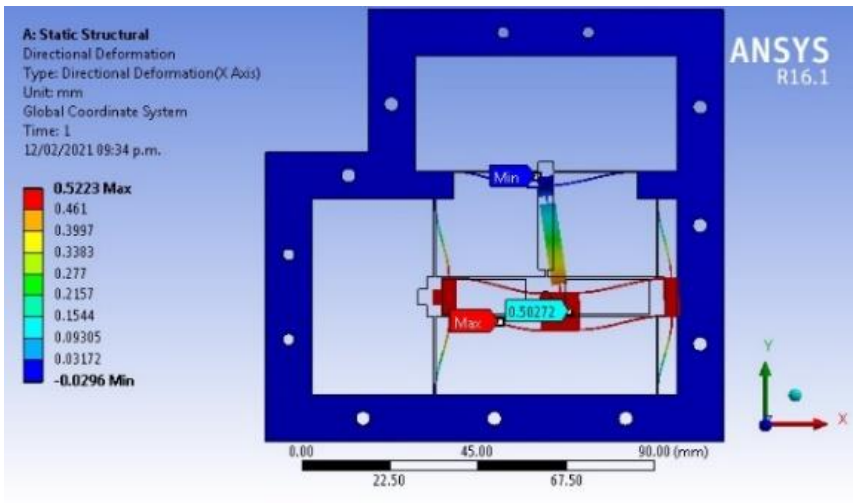
(a)



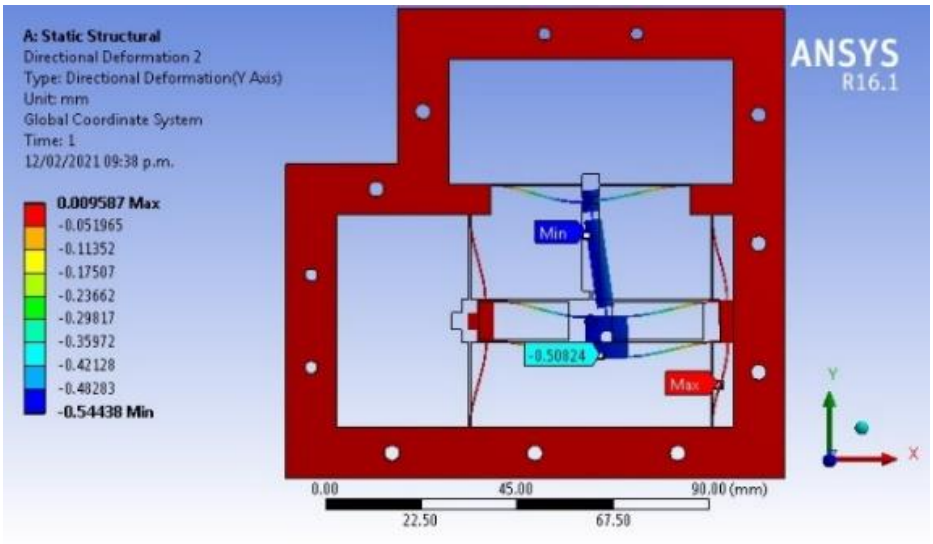
(b)

Figura 3.7. (a) eje-X, and (b) eje-Y desplazamientos obtenidos de la simulación en ANSYS. Los resultados fueron conseguidos aplicando la fuerza en el eje donde los desplazamientos fueros medidos.

En la Figura 3.9 se proporcionan los resultados de la deformación direccional en el eje X e Y. Mientras que, en a Figura 3.10 se muestra el esfuerzo equivalente máximo, generado al aplicar las fuerzas en los ejes X e Y simultáneamente. El valor máximo, 3.87 MPa, es muy bajo, en comparación con el valor del límite elástico correspondiente. El valor máximo de esfuerzo se obtuvo cuando ambas fuerzas se aplicaron simultáneamente.



(a)



(b)

Figura 3.8. a) eje-X (b) eje-Y desplazamiento obtenido aplicando la misma fuerza en ambos ejes al mismo tiempo.

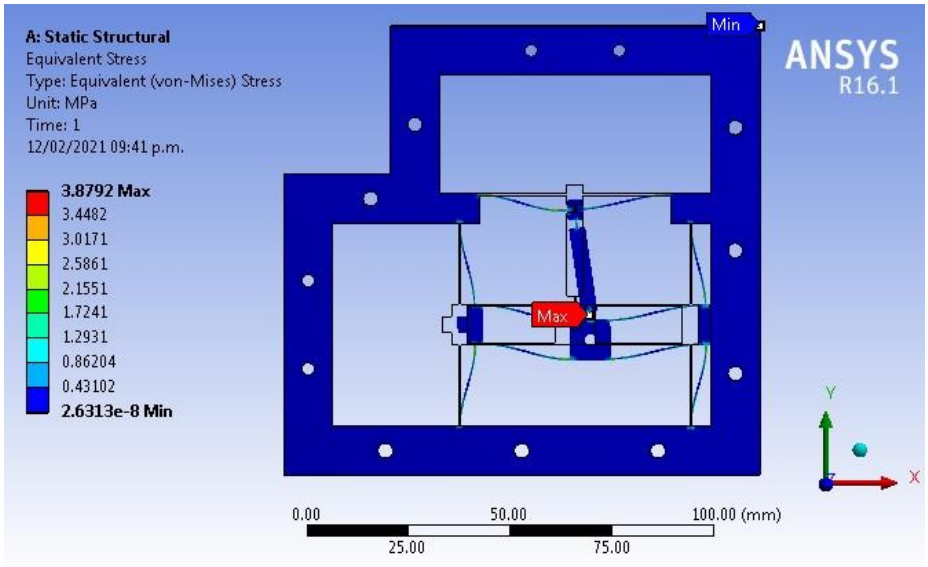


Figura 3.9. Máximo esfuerzo equivalente cuando la fuerza es aplicada en cada eje simultáneamente.

En la Tabla 3.3 también se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones del microposicionador implementado con ABS, PETG y PLA.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos cuando la fuerza es aplicada en el eje X, Y, así como fuerzas aplicadas simultáneamente en XY.

Fuerza		**ABS**			**PETG**			**PLA**		
X [N]	**Y [N]**	**Desp. X [µm]**	**Desp.Y [µm]**	**Esfuerzo equivalente máximo [MPa]**	**Desp.X [µm]**	**Desp.Y [µm]**	**Esfuerzo equivalente máximo [MPa]**	**Desp.X [µm]**	**Desp.Y [µm]**	**Esfuerzo equivalente máximo [MPa]**
0.1	**0**	503	-1.13	3.82	420	2.48	3.83	257	-1.1	3.83
0	**0.1**	-38.1x10-3	-504	2.77	-15.7x10<-3	-422	2.78	-16.1x10-3	-259	2.78
0.1	**0.1**	502	-508	3.87	420	-423	3.9	257	-260	3.9

Los datos presentados en la Tabla 3.3 indican que, para cada microposicionador fabricado con los tres materiales propuestos, se obtienen desplazamientos similares. Las diferencias en los valores absolutos de desplazamiento se encuentran en un rango de 1 a 2 µm cuando se aplican fuerzas iguales de manera independiente en cada eje. Al aplicar ambas fuerzas de forma simultánea, las diferencias aumentan ligeramente, situándose entre 2 y 6 µm. En general, se observa que el eje X ofrece una mayor resistencia a la deformación, lo cual se atribuye a su menor grado de simetría, lo que también se traduce en un comportamiento levemente asimétrico. No obstante, las variaciones registradas son mínimas, con un valor promedio del orden del 1.19%.

Para el material ABS, a partir de la ecuación (3.4) y considerando una fuerza aplicada de F= 0.1 N en los desplazamientos sobre los ejes X e Y, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 3.4. Se observa que el nivel de concordancia entre los valores teóricos y experimentales es alto, con una diferencia inferior al 5 %, lo que valida la precisión del modelo propuesto.

Tabla 3.4. Comparación de desplazamiento en los ejes X e Y para el ABS.

	Cálculo analítico	Simulación	Error, %
Desplazamiento en Y, [µm]	482	504	4.56
Desplazamiento en X, [µm]	519	503	3.18

3.4.2 Análisis modal

En caso de que la plataforma se utilice en procesos que involucren vibraciones o en los que se apliquen fuerzas a frecuencias relativamente altas, como ocurre en aplicaciones de mecanizado láser, es fundamental conocer la respuesta en frecuencia del microposicionador, con el fin de identificar las frecuencias que podrían limitar su funcionamiento. Por ello, en este apartado se analizan las formas modales correspondientes a los microposicionadores fabricados con los tres materiales propuestos.

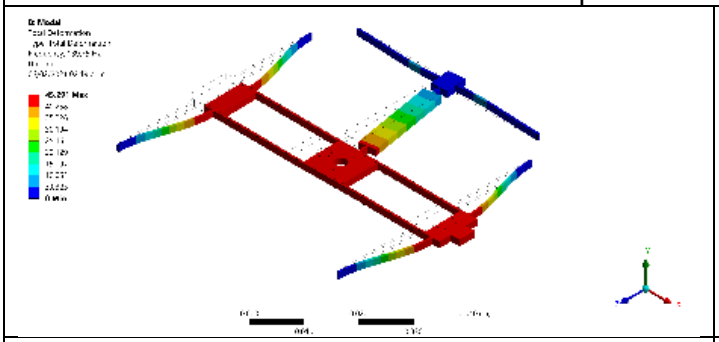
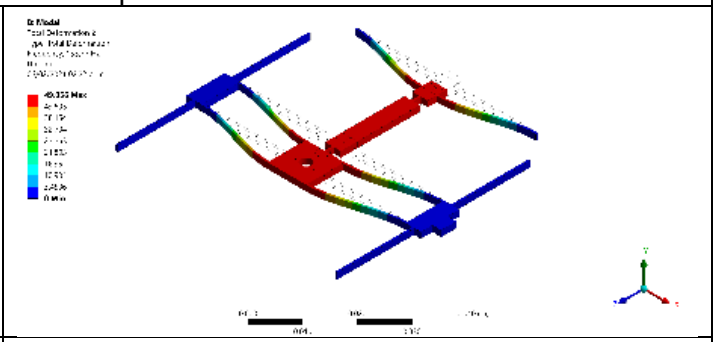
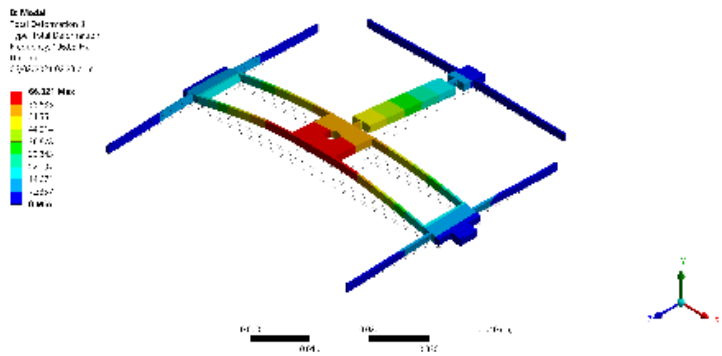
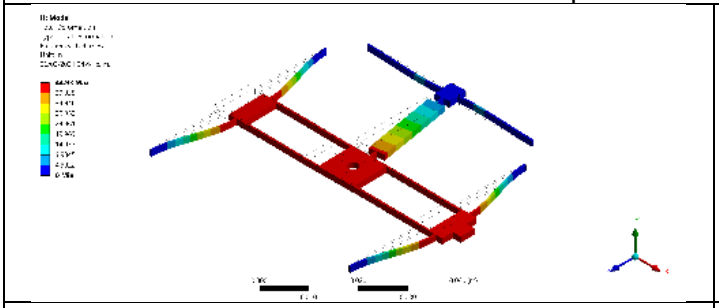
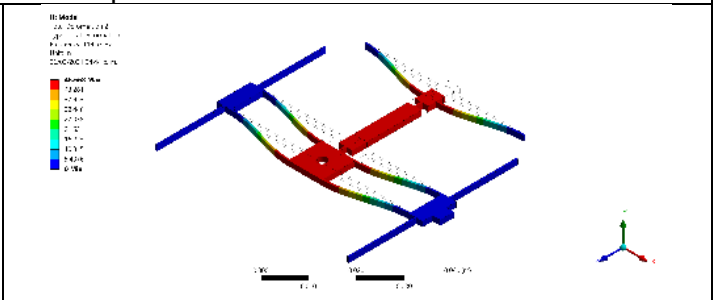
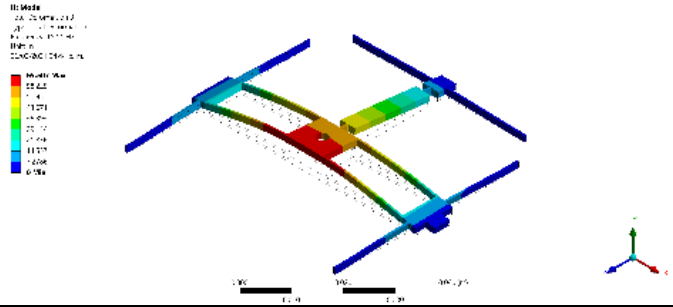
Es necesario tener el valor de la masa de la zona donde se realizará la prueba, en este caso corresponde a la plataforma de trabajo (0.20 g), más la masa del actuador piezoeléctrico del eje Z (2.03 g), sumado dichos elementos da como resultado una masa total de 2.23 g.

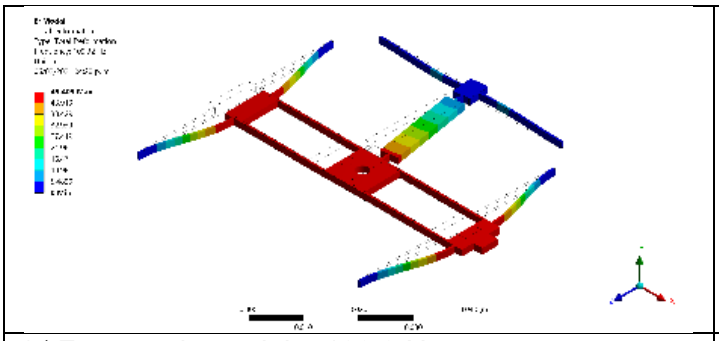
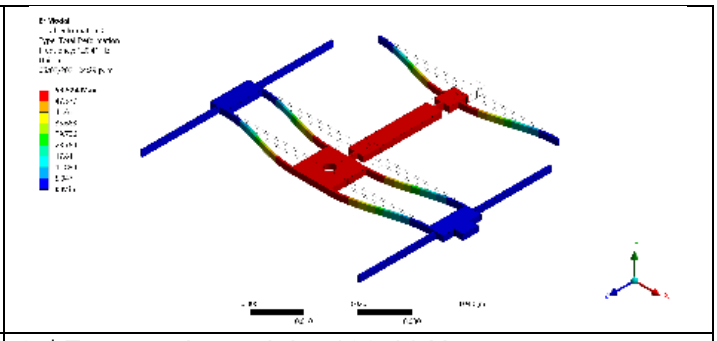
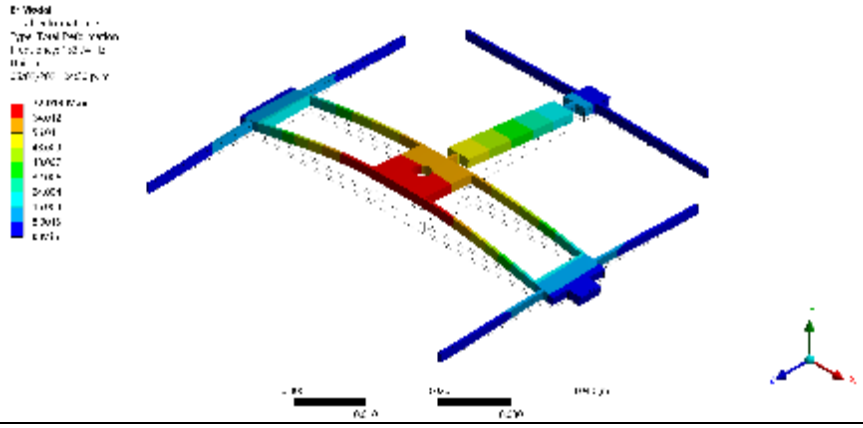
Las condiciones de frontera para la obtención de las formas modales son: los extremos fijos de las vigas y la consideración del dispositivo bajo análisis sin carga.

Para el microposicionador diseñado con PLA, de acuerdo con las tres primeras frecuencias modales, dadas en la Tabla 3.5, que también brindan los movimientos esperados en eje, se determina que la frecuencia de operación no debe llegar a 139.75 Hz. Para el caso de PETG, la frecuencia más baja corresponde a 108.63 Hz, y para ABS, a 109.3 Hz. Como se puede observar, el menor valor de frecuencia corresponde al PETG.

Con ABS también obtenemos los mayores desplazamientos (502 µm), de acuerdo con la Tabla 3.5, en un 95.3%, más que en el caso de PLA (257 µm). En frecuencia, la reducción de frecuencia corresponde al 21.7%.

Tabla 3.5. Primeras tres frecuencias modales para el microposicionador fabricado en PLA, PETG y ABS.

<table>
<tr><td colspan="2">Plataforma de microposicionamiento implementada con PLA.</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>1st Frecuencia modal = 139.75 Hz</td><td>2nd Frecuencia modal =153.77 Hz</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">3rd Frecuencia modal = 196.03 Hz</td></tr>
<tr><td colspan="2">Plataforma de microposicionamiento implementada con PETG</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>1st Frecuencia modal = 108.63 Hz</td><td>2nd Frecuencia modal = 119.57 Hz</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">3rd Frecuencia modal = 152.4 Hz</td></tr>
<tr><td colspan="2">Plataforma de microposicionamiento implementada con ABS.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>1st Frecuencia modal = 109.3 Hz</td><td>2nd Frecuencia modal = 120.41 Hz</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">3rd Frecuencia modal = 153.74 Hz</td></tr>
</table>

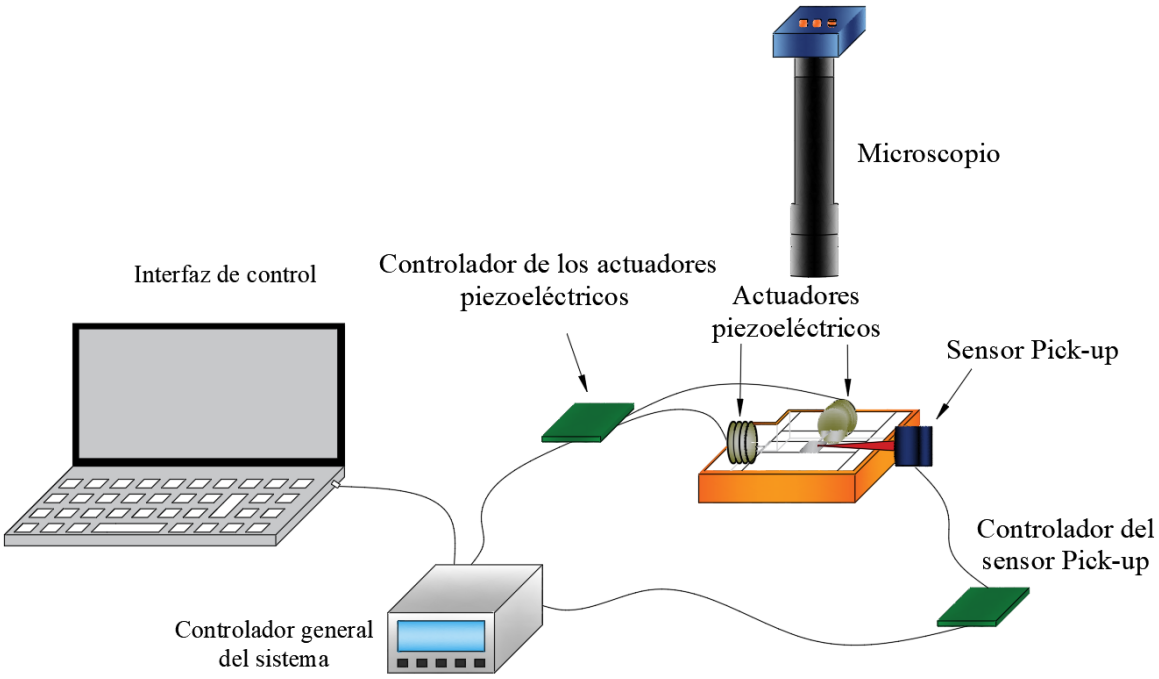
3.5 Desplazamiento en los ejes X e Y del microposicionador

Teniendo en cuenta la escasa fuerza que pueden suministrar los actuadores piezoeléctricos, se eligió un material flexible para conseguir una mínima pérdida de fuerza y, por tanto, un mayor desplazamiento de la plataforma de trabajo. Inicialmente, se consideró usar el material PLA, que se utiliza preferentemente para la fabricación aditiva, debido a sus características como la biodegradabilidad en condiciones ideales (Boonmee et al., 2016). Además, el proceso de impresión es más sencillo, y proporciona un importante ahorro energético en su producción, en comparación con otros materiales utilizados en la Manufactura Aditiva (AM) (Gonçalves de Moura et al., 2017).

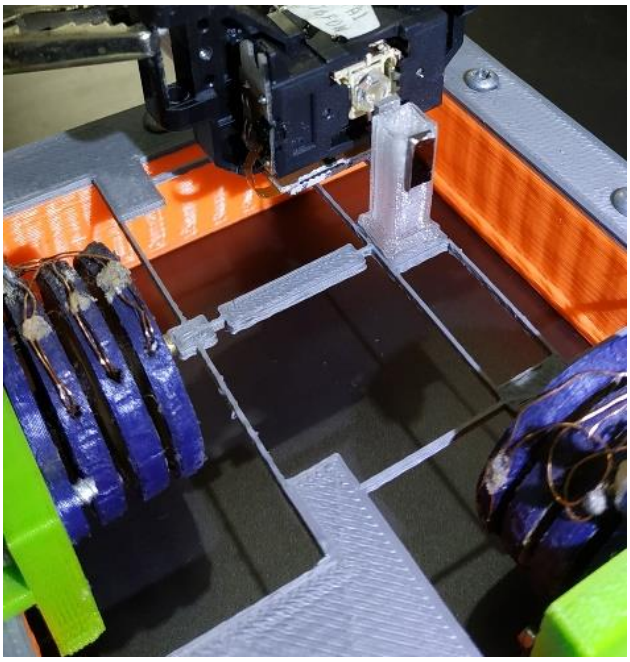
Sin embargo, al realizar pruebas con el microposicionador XY fabricado con PLA, se registró una pérdida moderada de desplazamiento en ambos ejes. Para conseguir

el máximo desplazamiento que alcanzan los actuadores, fue necesario cambiar el material de los elementos flexibles.

La configuración experimental diseñada para registrar el desplazamiento del microposicionador en los ejes X, Y y Z, utilizando diferentes materiales de prueba, se muestra en la Figura 3.11a. Con el fin de obtener resultados comparables, se empleó el actuador piezoeléctrico que proporciona el mayor desplazamiento para medir los desplazamientos en los ejes X e Y. Para el registro de estos desplazamientos, se utilizó un sensor óptico tipo Pick-up, complementado con un microscopio para la monitorización visual del movimiento. Debido a las limitaciones de espacio lateral en la plataforma de trabajo, que impiden colocar el sensor a una distancia operativa adecuada, se adaptó un bloque liviano de PLA sobre la plataforma, al cual se adhirió una pieza de material altamente reflectante en uno de sus lados, permitiendo así la recepción del rayo láser, como se ilustra en la Figura 3.11b.



(a)



(b)

Figura 3.11. Montaje experimental para obtener el desplazamiento de la plataforma de microdesplazamiento XY, (a) Diagrama esquemático. (b) Medición del desplazamiento por el sensor de pick-up.

La plataforma de microdesplazamiento, conformada por elementos flexibles, ha sido diseñada como un componente extraíble. Esta se fija al soporte, fabricado en PLA, mediante tornillos. Dado que dicho soporte no constituye un elemento crítico en el desempeño funcional del microposicionador, puede ser fabricado indistintamente con materiales poliméricos o metálicos, sin afectar significativamente el comportamiento del sistema.

Los actuadores piezoeléctricos, diseñados para generar movimiento en los ejes X o Y, se fijaron en las ubicaciones correspondientes sobre el contorno del microposicionador. Cada actuador fue alimentado de manera individual, aplicando un voltaje creciente desde 0 V hasta 150 V, en incrementos de 10 V. En cada incremento, se midió el desplazamiento de la plataforma de trabajo. Una vez alcanzado el voltaje máximo, se redujo progresivamente la diferencia de potencial en pasos de 10 V, registrando nuevamente el desplazamiento correspondiente en cada etapa. Este

procedimiento se aplicó de forma independiente a ambos ejes del microposicionador, con el objetivo de caracterizar su comportamiento bajo condiciones de carga controlada.

Para validar la elección del material estructural en la fabricación del microposicionador, se construyeron tres prototipos empleando ABS, PETG y PLA. A cada uno se le realizaron mediciones de desplazamiento en los ejes X e Y, cuyos resultados se presentan en la Figura 3.12. La comparación de los desplazamientos máximos obtenidos se resume en la Tabla 3.6.

De la Figura 3.12 y la Tabla 3.6, se observa que los tres prototipos mantienen movimientos simétricos en los ejes X e Y, ya que los valores de desplazamiento en ambos ejes son muy similares en todos los casos. Sin embargo, el nivel de simetría varía ligeramente entre materiales: el menor error se obtuvo con PETG (1.52 %), mientras que el mayor correspondió a PLA (4.92 %).

Si bien el ABS presentó el mayor desplazamiento, también mostró un mayor alejamiento respecto a la simetría (3.92 %). En cambio, el PETG alcanzó desplazamientos comparables a los del ABS, pero con un menor grado de asimetría, lo cual lo convierte en la opción más adecuada. Por esta razón, se seleccionó el PETG como material para la fabricación final de la plataforma de microdesplazamiento.

Tabla 3.6. Máximos desplazamientos logrados en la plataforma de trabajo realizada en diferentes materiales.

Material	Desplazamientos en el eje X, (µm)	Desplazamientos en el eje Y, (µm)	Error, %
ABS	318.5	331	3.92
PETG	322.4	327.3	1.52
PLA	292.7	307.1	4.92

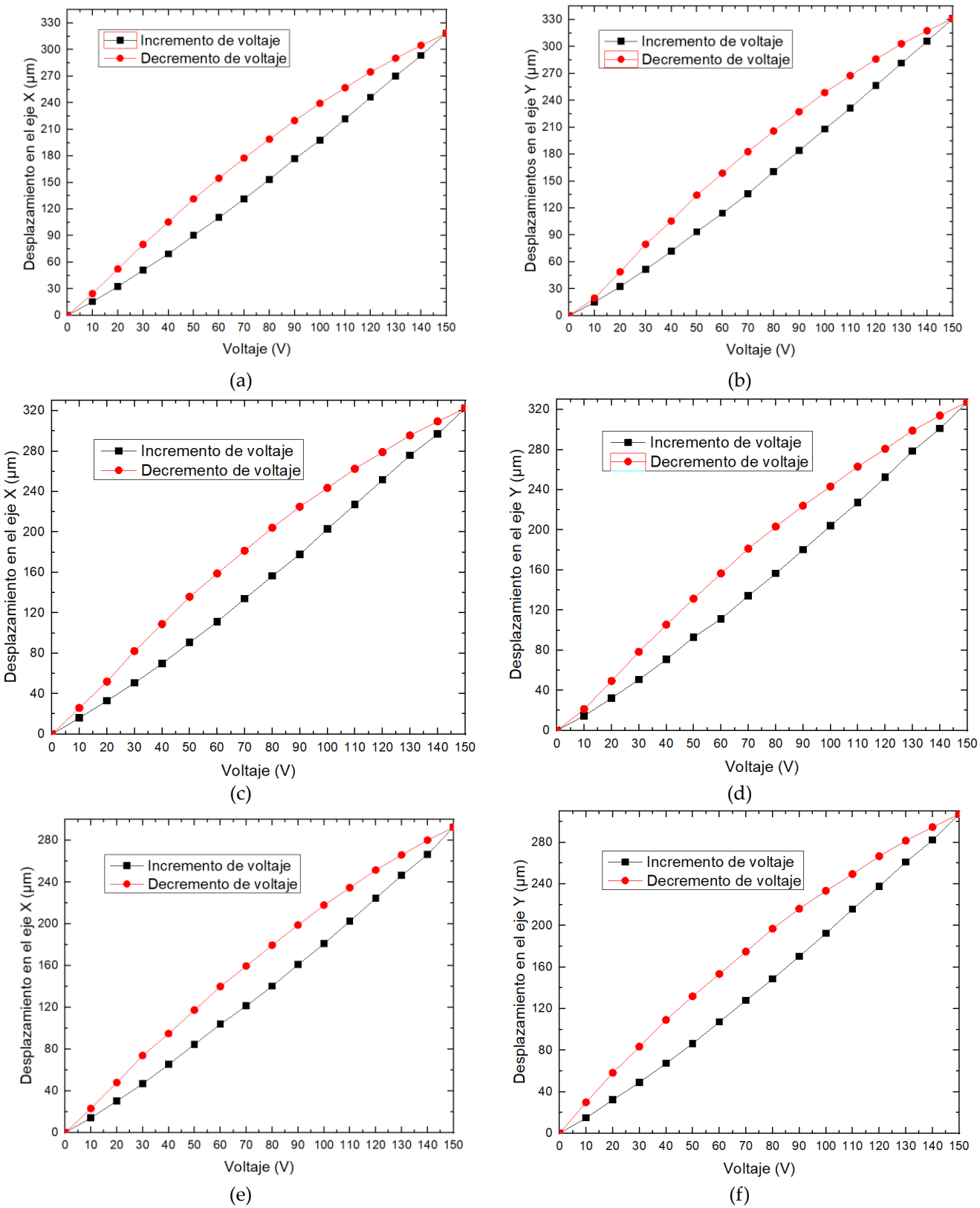


Figura 3.10. Desplazamiento de salida en los ejes X e Y, respectivamente, (a) y (b), para ABS. (c) y (d) para PETG. (e) y (f) para PLA.

3.6 Caracterización del sensor de microdesplazamiento inductivo

En la Figura 3.13 se muestran los sensores de microdesplazamiento utilizados en el sistema de control. Estos sensores operan basándose en el principio de las corrientes de Eddy, por lo que requieren un objetivo metálico para lograr una detección precisa.



Figura 3.11. Sensor inductivo modelo SMU 9200-15N-001 de la marca KAMAN.

Para evaluar su desempeño, los sensores fueron caracterizados mediante el arreglo experimental mostrado en la Figura 3.14, el cual permitió analizar su respuesta bajo condiciones reales de operación. Esta caracterización resulta fundamental para garantizar tanto la precisión como la estabilidad del sensor dentro del sistema de control.

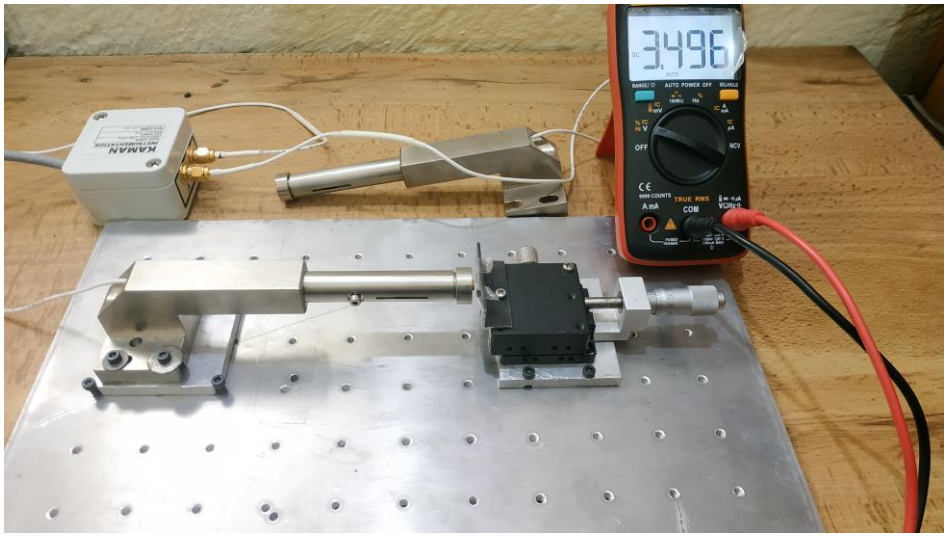


Figura 3.124. Montaje experimental para caracterizar los sensores inductivos.

Las gráficas obtenidas durante las pruebas de acercamiento de un objetivo se presentan en la Figura 3.15. La resolución teórica del sistema, basada en el uso de un convertidor analógico-digital (ADC) modelo ADS1115 de 16 bits, se muestra en la Figura 3.16. En esta figura se observa que puede alcanzarse una resolución teórica en el rango de 20 nm a 40 nm, dentro del intervalo de lectura aproximado entre 500 y 1050.

Con base en los datos experimentales obtenidos, se realizó una linealización de la respuesta del sensor, utilizando un ajuste por curva polinómica de cuarto orden, el cual se presenta en la Figura 3.17. Finalmente, en la Figura 3.18 se muestra un ejemplo de implementación del modelo polinómico en el microcontrolador dsPIC33EP256MU806, como parte del sistema de adquisición y control.

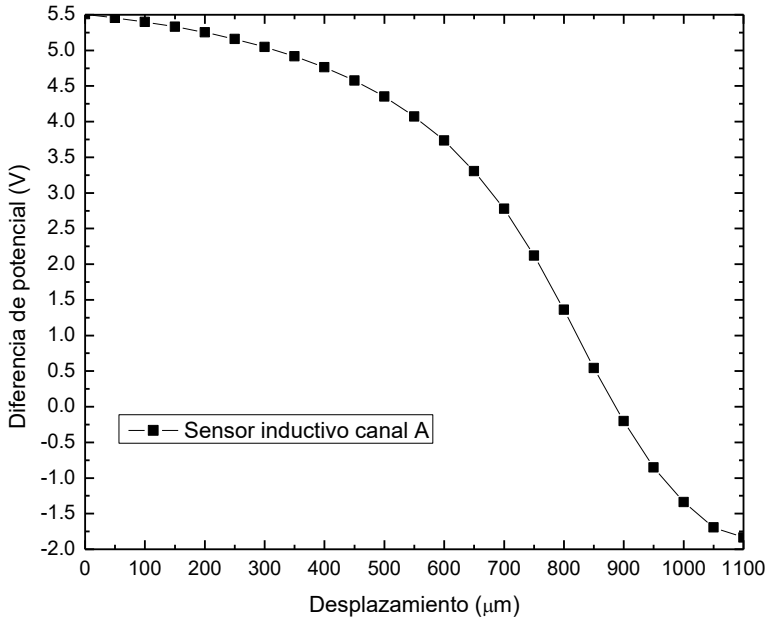


Figura 3.13. Comportamiento de la tensión de salida del sensor en la presencia de un objeto de aluminio que se aproxima con incrementos de 50 µm.

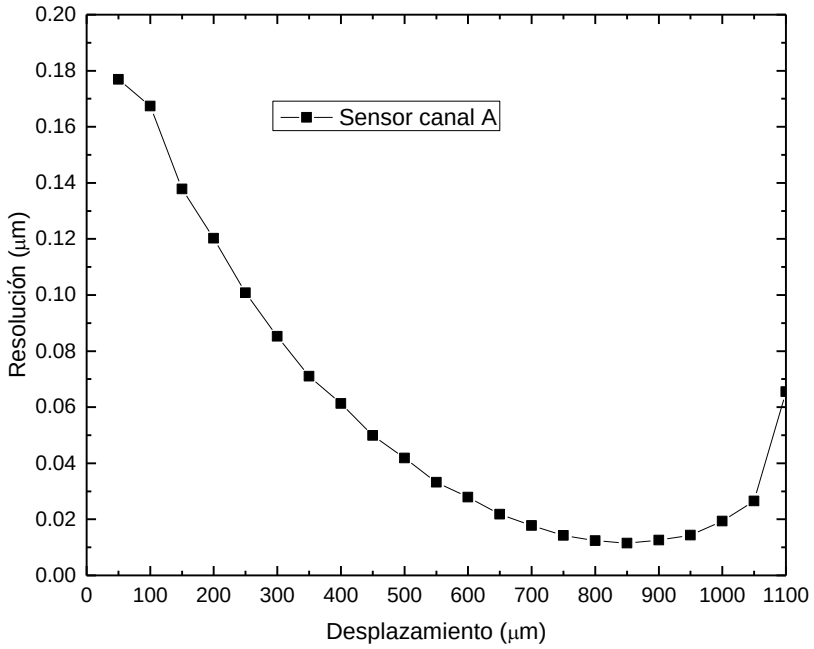
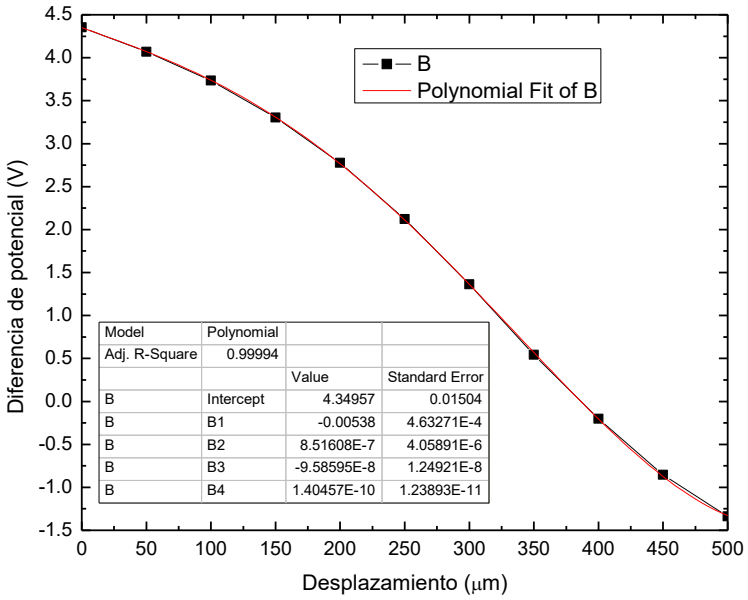


Figura 3.14. Resolución teórica que puede ser obtenida empleando un conversor analógico/digital ADS1115 (16 bits) con una configuración de rango de +/- 6.144V (1 bit = 0.1875mV.



Model	Polynomial		
Adj. R-Square	0.99994		
		Value	Standard Error
B	Intercept	4.34957	0.01504
B	B1	-0.00538	4.63271E-4
B	B2	8.51608E-7	4.05891E-6
B	B3	-9.58595E-8	1.24921E-8
B	B4	1.40457E-10	1.23893E-11

Figura 3.17. Linealización por medio de un ajuste de curva polinómica de cuarto orden.

```
 B4=valor_adc1*0.0001875;
 C4=valor_adc2*0.0001875;
 printf("V1=%1.3f V2=%1.3f",B4,C4);

if (valor_adc1<21333 && valor_adc1> -5333 ){ //canal A
     //B4=valor_adc1*0.0001875;
    despl_A=384.90575+(B4*-70.70662)+(B4*B4*8.63984)+(B4*B4*B4*-1.834)+(B4*B4*B4*B4*-0.2459);
    CHARLCD1_PutChar('\n' );
    printf("A=%3.2f",despl_A);
}
else {
    CHARLCD1_PutChar('\n' );
    printf("A=N.A");
}
if (valor_adc2<21333 && valor_adc2> -10666 ){ //canal B
    //C4=valor_adc2*0.0001875;
    despl_B=411.78667+(C4*-55.49116)+(C4*C4*2.64297)+(C4*C4*C4*-0.93473)+(C4*C4*C4*C4*-0.33621);
     printf(" B=%3.2f",despl_B);
}
else{
    printf(" B=N.A");//UART
}
DELAY_milliseconds(350);



} // fin while anidado
```

Figura 3.183.15. Implementación de la función de cuarto orden en el código del microcontrolador dsPIC33EP256MU806.

En cuanto a la instalación de estos sensores, se diseñó una nueva base, considerando que la ubicación óptima es debajo de la plataforma de microdesplazamiento. Los sensores se fijaron firmemente a una placa de aluminio, lo que evita desajustes provocados por movimientos y contribuye a la estabilidad del conjunto. Además, la placa de aluminio puede ayudar a minimizar las vibraciones externas, especialmente si se incorpora un elemento blando en su parte inferior. La Figura 3.19 ilustra la instalación implementada.

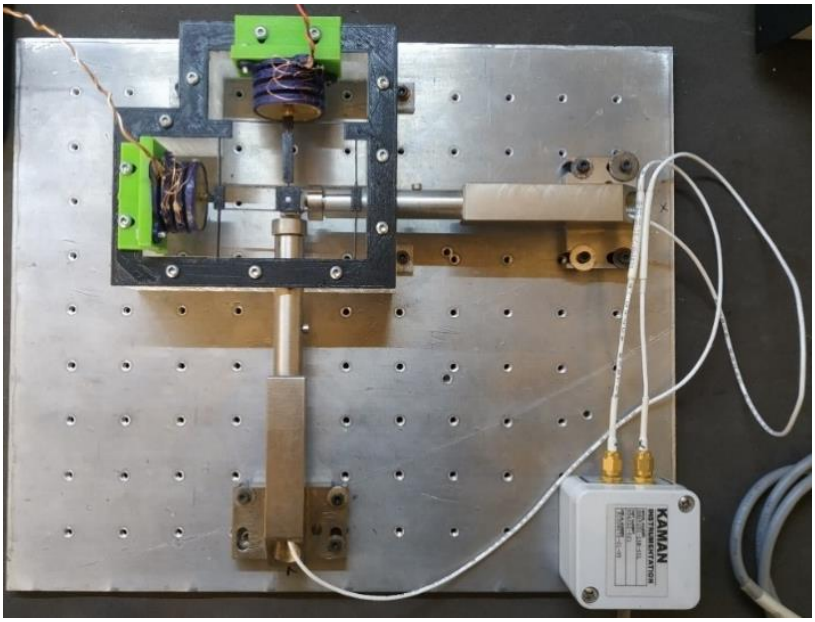


Figura 3.19. Incorporación de los sensores de desplazamiento en una base de aluminio sólida.

3.7 Prueba de funcionamiento de los sensores en una segunda versión de los actuadores piezoeléctricos

Para evaluar el funcionamiento de los sensores en el sistema, se realizó una prueba utilizando un nuevo diseño de actuador piezoeléctrico tipo stack. Este actuador está compuesto por seis buzzers de 35 mm de diámetro, a diferencia de los 27 mm empleados en la versión anterior. Se empleó una fuente de voltaje ajustable en el rango de 0 V a 150 V, incrementando la tensión en pasos de 10 V.

El experimento se desarrolló sobre una plataforma de microdesplazamiento, en la que el actuador fue instalado horizontalmente frente al sensor inductivo para situarlo en el rango de mayor resolución. La Figura 3.20 muestra los principales elementos utilizados en esta configuración experimental:

1. Plataforma de microdesplazamiento.
2. Sensor inductivo.
3. Conjunto piezoeléctrico.
4. Pieza reflectiva de aluminio.
5. Módulo de control del sensor.
6. Controlador del actuador piezoeléctrico.

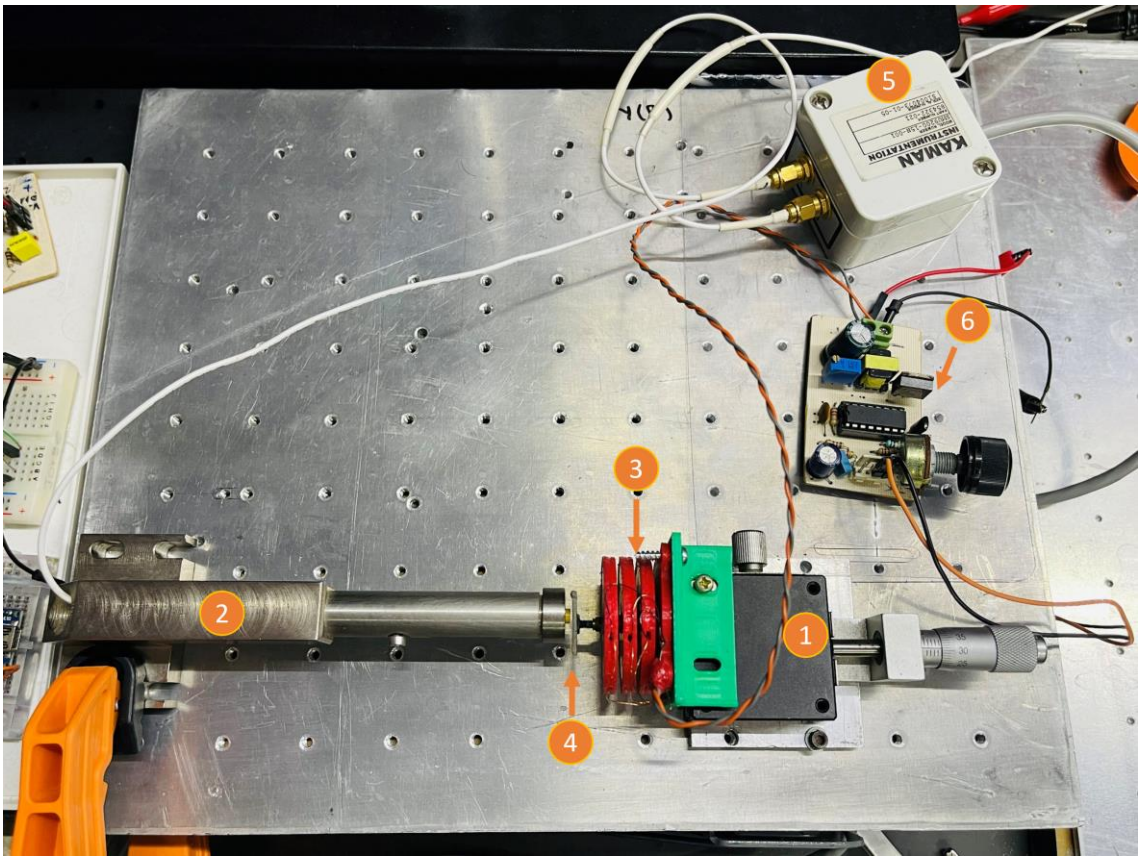


Figura 3.20. Configuración experimental para la medición del desplazamiento actuador piezoeléctrico.

Los resultados se presentan en la Figura 3.21, estos mostraron que el desplazamiento máximo alcanzó los 473 µm a 150 V y se evidenció, además, el fenómeno de histéresis antes observado.

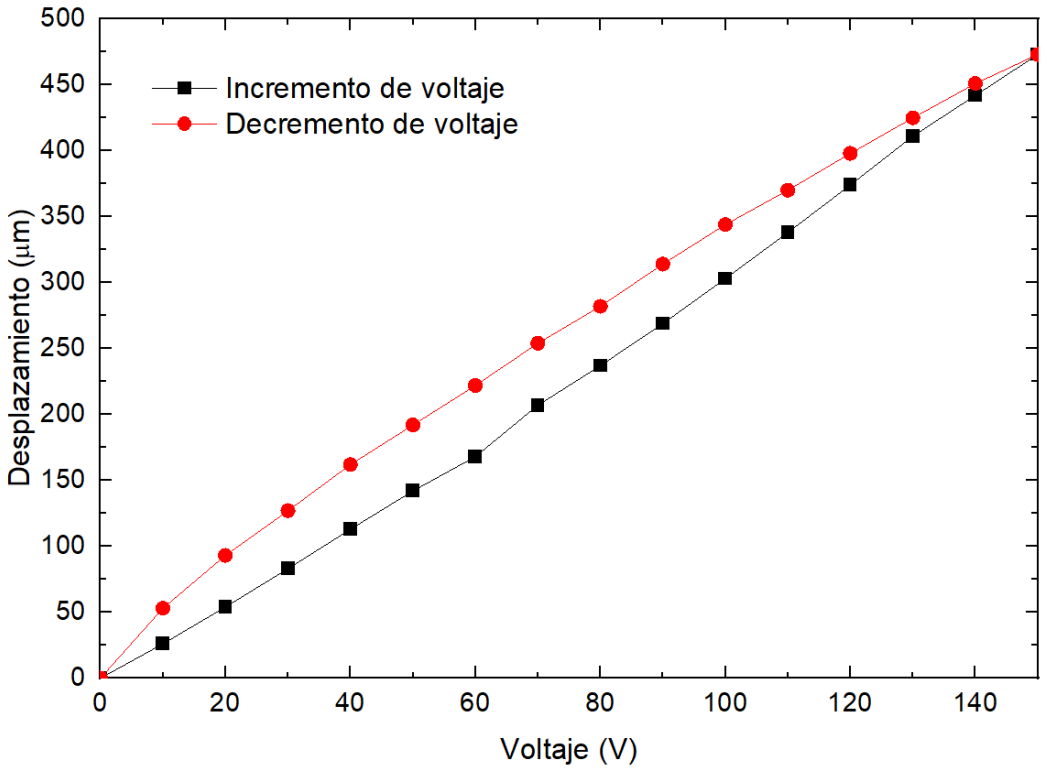


Figura 3.21. Desplazamiento del actuador piezoeléctrico con buzzers de 35 mm de diámetro

Se llevó a cabo una prueba complementaria con el objetivo de determinar la frecuencia de resonancia del actuador piezoeléctrico, ya que esta medición no pudo realizarse previamente utilizando el sensor óptico. Para este fin, se conectó un osciloscopio a la salida del sensor inductivo y se reemplazó la fuente de alimentación por un generador de funciones, manteniendo sin cambios la configuración mecánica previamente establecida. La disposición experimental utilizada se presenta en la Figura 3.22, donde se identifican los siguientes elementos principales:

1. Montaje experimental.
2. Osciloscopio Tektronix TDS 784D.

3. Fuente de alimentación.
4. Generador de funciones.
5. Módulo de control del sensor.

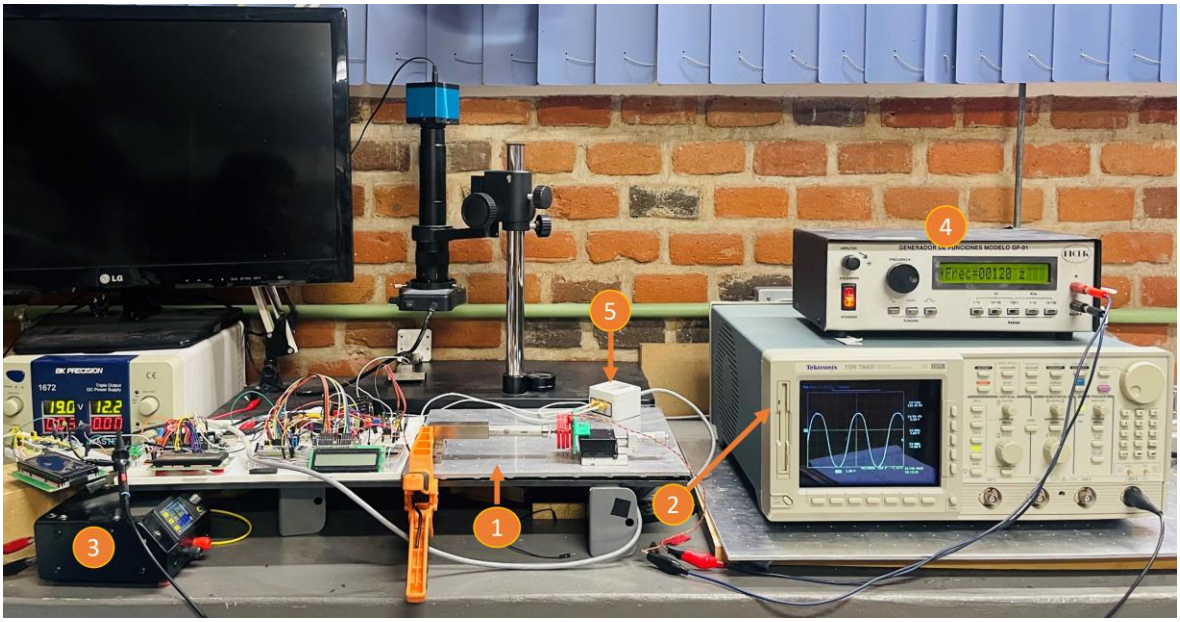


Figura 3.22. Configuración experimental para la determinación de la frecuencia de resonancia del actuador piezoeléctrico:

En el procedimiento, se aplicó una señal sinusoidal de 20 V pico a pico al actuador, variando la frecuencia desde 10 Hz hasta 240 Hz en incrementos de 10 Hz. En cada punto de frecuencia se registró la amplitud del desplazamiento utilizando el osciloscopio. Los datos obtenidos (Figura 3.23) revelaron que el mayor desplazamiento se alcanzó a 120 Hz, a pesar del bajo voltaje empleado. Este comportamiento con corriente alterna es especialmente relevante, ya que permite lograr desplazamientos más amplios que aquellos obtenidos mediante voltaje de corriente continua.

Posteriormente, se analizó la viabilidad de emplear esta configuración de buzzers en la plataforma de microdesplazamiento, debido a que permiten alcanzar un mayor desplazamiento sin requerir modificaciones en las dimensiones del sistema. Esta ventaja resulta especialmente relevante para mantener la compacidad del diseño y facilitar su integración en aplicaciones donde el espacio es limitado.

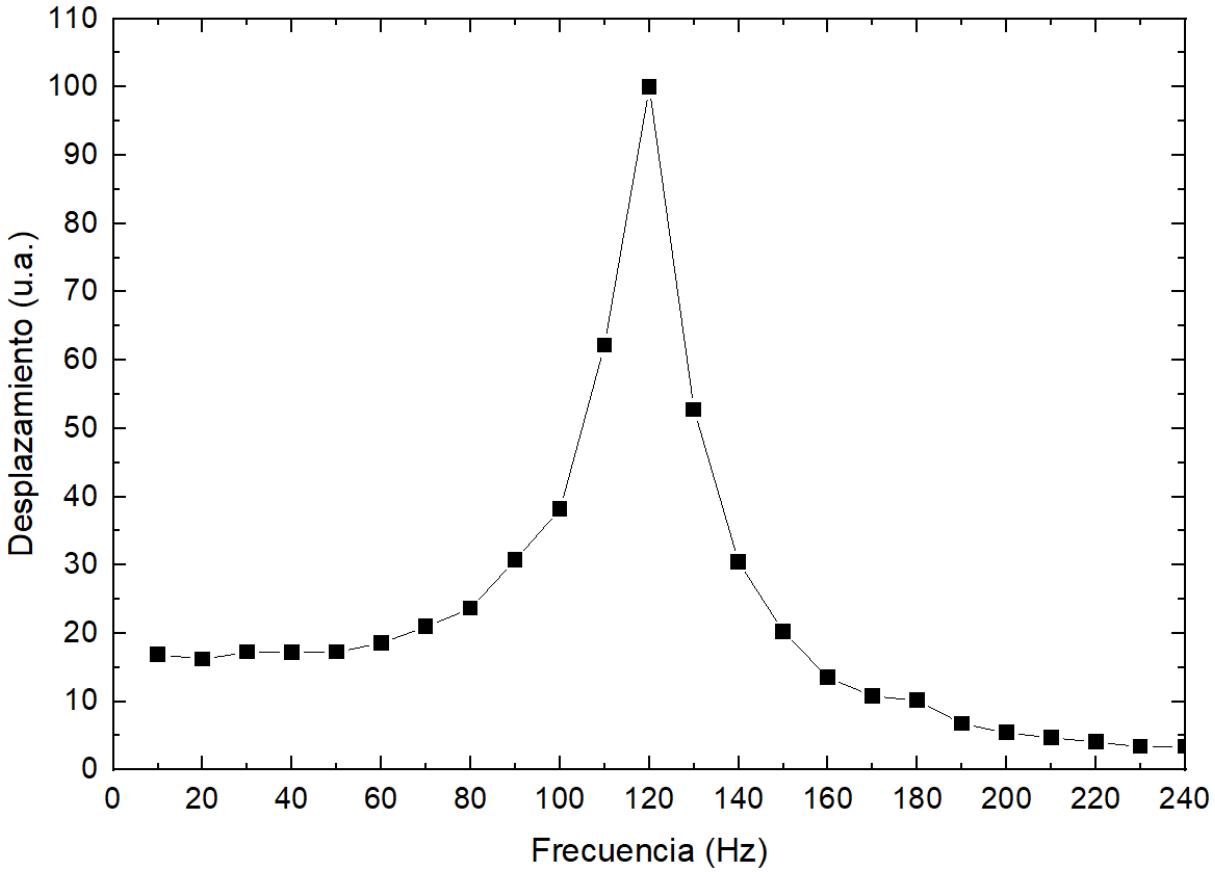


Figura 3.23. Desplazamiento del actuador piezoeléctrico al aplicar una señal sinusoidal de 20 Vpp con frecuencia variable.

CAPÍTULO 4

Resultados de las pruebas con el primer diseño de control de lazo cerrado

En este capítulo se describe el arreglo experimental empleado para implementar un sistema de control de lazo cerrado para grabado micrométrico.

Se presentan los resultados de las pruebas de grabado realizadas con el láser pick-up de una unidad de DVD. Para estos ensayos, se implementó un sistema de control en lazo cerrado básico, dado que el objetivo principal era evaluar la capacidad de grabado del láser. Se realizaron pruebas de grabado de líneas rectas y de un cuadrado con dimensiones aproximadas de 100 × 100 µm.

Asimismo, se presentan mediciones de las dimensiones de los grabados, realizadas con un microscopio de alta resolución a las trayectorias de los grabados realizados.

4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL PRIMER DISEÑO DE CONTROL DE LAZO CERRADO

Una vez mostrado el comportamiento de los actuadores piezoeléctricos, la plataforma de elementos flexibles y los sensores de microdesplazamiento, información presentada en el capítulo 3, se diseñó un sistema de control digital de lazo cerrado básico.

Se considera un sistema básico porque, aunque se incorporan sensores de microdesplazamiento para la retroalimentación y la determinación de la posición de la zona de trabajo en las direcciones X e Y, el algoritmo se desarrolló de tal forma que el microcontrolador sólo permite ejecutar instrucciones elementales, como el movimiento de un eje a la vez, sin contemplar la interacción simultánea de ambos ejes. Esta configuración simplificada se adoptó debido a las limitaciones de desempeño identificadas en los resultados experimentales que se presentan a continuación.

4.1. Sistema de control de lazo cerrado básico

Para la implementación del sistema de control de lazo cerrado, fue necesario acondicionar la señal proveniente de los sensores de microdesplazamiento mediante un convertidor ADC ADS1115, ya que estos sensores entregan una salida de voltaje en un rango de -2.0 V a 5.5 V, el cual no es compatible con las entradas analógicas del microcontrolador dsPIC33EP256MU806 utilizado.

En la Figura 4, se muestra un diagrama de bloques que representa el sistema de control de lazo cerrado empleado durante las pruebas de grabado. La descripción general del funcionamiento del sistema se resume en los siguientes elementos:

1. Entrada: Se reciben dos señales. La primera consiste en una serie de pulsos que determinan la cantidad de pasos a ejecutar, mientras que la segunda señal define la dirección del movimiento. Un estado alto indica

desplazamiento en dirección positiva y un estado bajo indica desplazamiento en dirección negativa.

2. Elemento de control: El componente principal es el microcontrolador dsPIC33EP256MU806, encargado de leer y procesar las magnitudes proporcionadas por los sensores, linealizarlas y generar la señal correspondiente para el controlador del actuador piezoeléctrico.
3. Planta o proceso: Corresponde a la plataforma de trabajo donde se realizan los desplazamientos controlados. Para las pruebas, se estableció un paso mínimo de 0.1 µm por instrucción.
4. Elemento de medición: Consiste en sensores de microdesplazamiento basados en el principio de corrientes de Eddy. Para garantizar una medición adecuada, se colocaron pequeñas piezas de aluminio en la parte inferior de la plataforma de trabajo, asegurando así una correcta detección del desplazamiento.

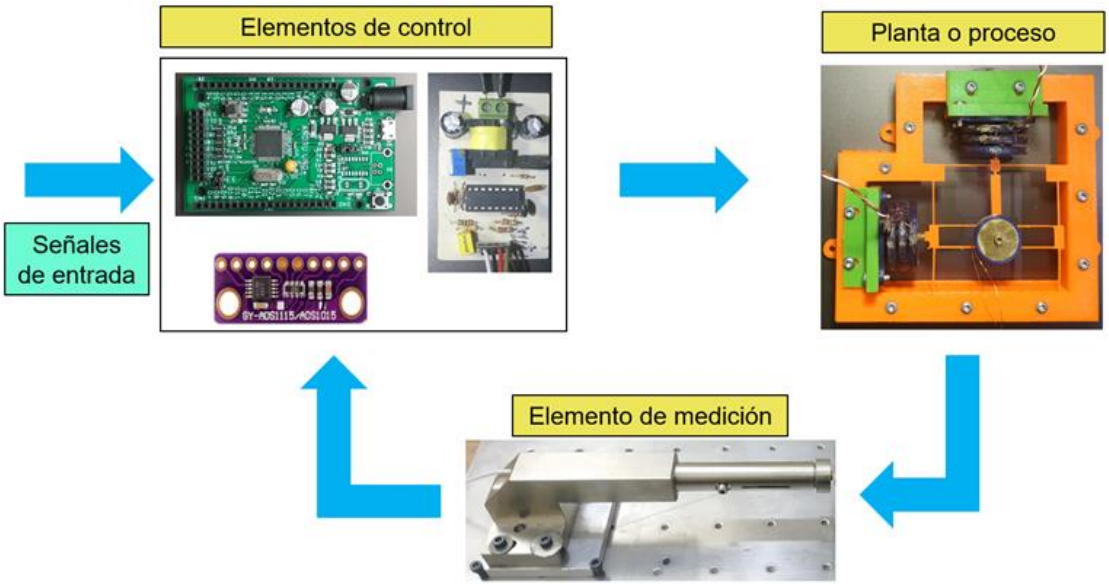


Figura 4.1. Representación del sistema de control de lazo cerrado empleado para realizar las primearas pruebas de grabado.

4.2. Pruebas del circuito de control de los actuadores piezoeléctricos

Un elemento crítico para el correcto funcionamiento del sistema es el circuito encargado de generar el voltaje de alimentación de los actuadores piezoeléctricos, el cual debe cumplir con las siguientes características:

- Linealidad: El circuito debe generar un voltaje de salida proporcional al voltaje de entrada, con un rango de 0 a 150 V, a partir de una señal de 0 a 3.3 V, lo que implica un factor de amplificación de aproximadamente 45.
- Estabilidad: La salida de voltaje debe permanecer estable una vez alcanzado el valor deseado, evitando oscilaciones o variaciones indeseadas.
- Respuesta rápida: El circuito debe reaccionar con la menor latencia posible ante cambios en la señal de entrada, garantizando un ajuste rápido del voltaje de salida.
- Capacidad de corriente adecuada: Debe ser capaz de suministrar una corriente de aproximadamente 100 mA, asegurando que el actuador piezoeléctrico responda con rapidez. Esto se debe a que los actuadores se comportan como una carga capacitiva, con un valor aproximado de 35 nF.
- Alimentación eficiente: Se requiere que el circuito opere con una fuente de 12 V, facilitando su integración y disponibilidad comercial.

El primer diseño del circuito para el control de los actuadores piezoeléctricos se clasificó como un regulador conmutado, el cual emplea un pequeño transformador recuperado de un cargador de celular para elevar el voltaje hasta los valores requeridos. Para lograrlo, se utilizó el circuito integrado TL494CN, el cual es un

controlador de modulación por ancho de pulso (PWM) de frecuencia fija, que incorpora los bloques esenciales para el control de fuentes de alimentación conmutadas.

En la Figura 4.2, se muestra el diagrama del circuito diseñado. En el conector X_1, se realiza la alimentación y el control del circuito con la siguiente distribución de pines:

- Pin 1: Entrada de voltaje negativo.
- Pin 2: Alimentación de 12 V.
- Pin 3: Entrada de voltaje de control.
- Pin 4: Salida de voltaje proporcional a la señal de salida, utilizada para su monitoreo.
-

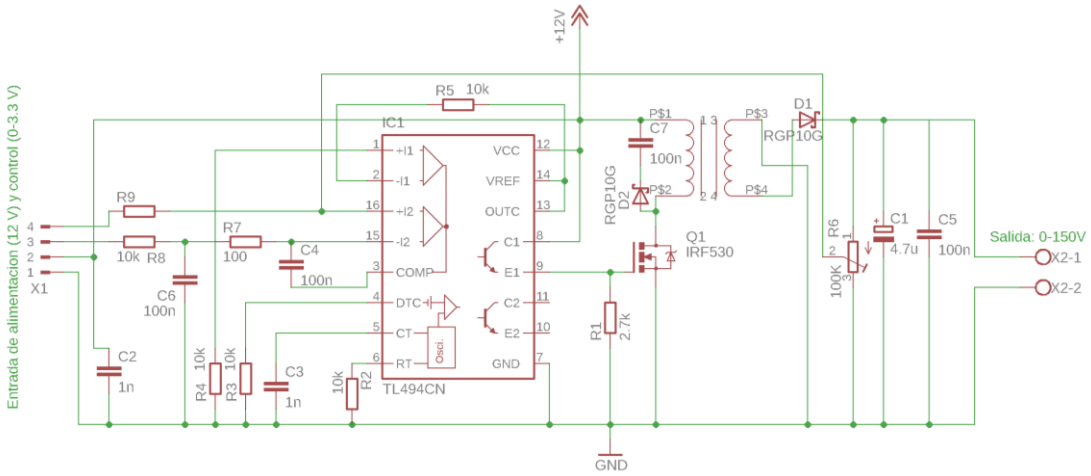


Figura 4.2. Diagrama electrónico para alimentar al actuador piezoeléctrico, clasificado como regulador conmutado.

La Figura 4.3 muestra la implementación en una placa de circuito impreso (PCB) del sistema presentado en la Figura 4.2. Las dimensiones de la placa son de 80 mm de largo × 43 mm de ancho, lo que resulta adecuado para su instalación en espacios reducidos. Además, al operar con corrientes bajas, no se requiere ventilación forzada.

Para analizar la respuesta del circuito, se diseñó una metodología experimental con los siguientes pasos:

1. Conexión de los equipos: Se conecta un generador de señales a la entrada del circuito y un osciloscopio para monitorear simultáneamente las señales de entrada y salida.
2. Selección de la señal de prueba: Se configura el generador de funciones para emitir una señal cuadrada con un voltaje pico a pico de 3.3 V.
3. Barrido de frecuencia: Se inicia la prueba con la frecuencia mínima que el equipo puede entregar y se incrementa progresivamente en pasos no mayores a 1 Hz.
4. Comparación de señales: En cada incremento de frecuencia, se analiza la correspondencia entre la señal de entrada y la señal de salida, observando posibles distorsiones, retardos o atenuaciones.
5. Criterio de finalización: La prueba se detiene cuando la señal de salida comienza a desviarse significativamente de la forma de onda de la señal de entrada, indicando una posible limitación en la respuesta del circuito.

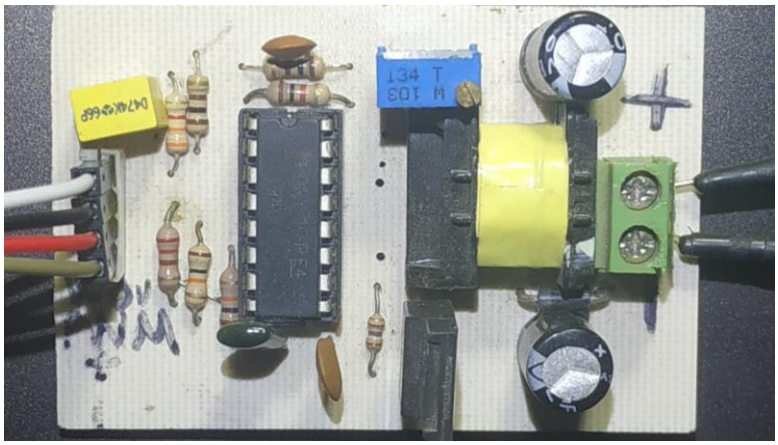


Figura 4.3. Implementación del diagrama en una placa circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés).

Siguiendo la metodología mencionada se conectaron los siguientes equipos, como se aprecia en la Figura 4.4:

1. Osciloscopio Tektronix TDS 784D.
2. Fuente de voltaje genérica.

3. Generador de funciones Modelo GF-01.
4. Circuito electrónico de control para un actuador piezoeléctrico.

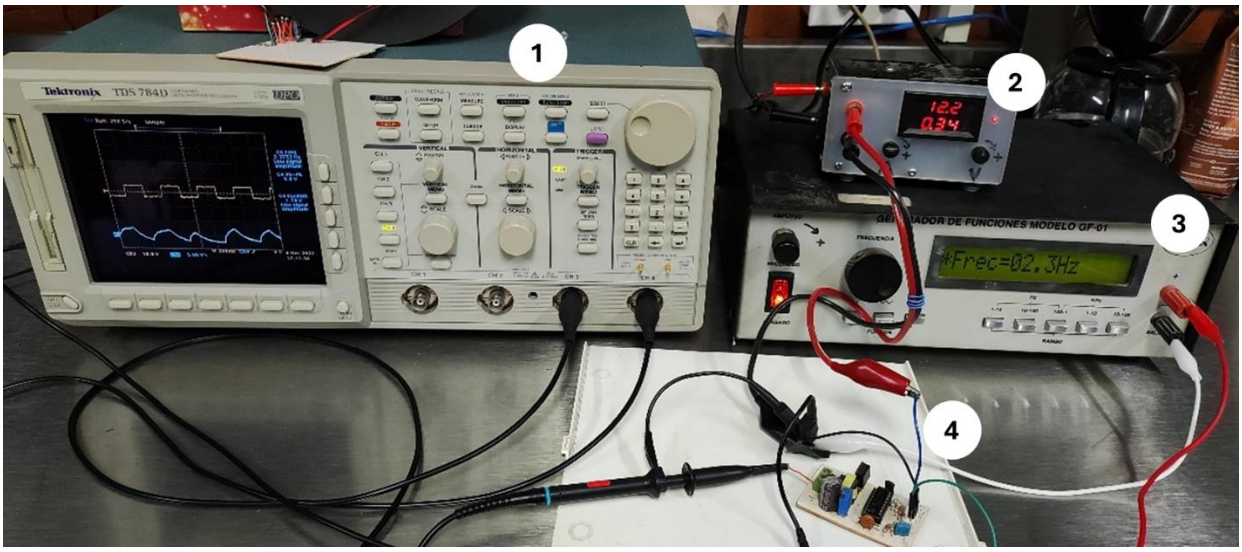


Figura 4.4. Esquema experimental para las pruebas de velocidad de respuesta del controlador para el actuador piezoeléctrico (diseño preliminar).

Los resultados obtenidos al aplicar una señal cuadrada al circuito de control del piezoeléctrico se muestran en las Figuras 4.5 a 4.7, en las que se observa claramente la relación entre la señal de entrada (ubicada en la parte superior) y la señal de salida (ubicada en la parte inferior). Con base en los resultados mostrados, se puede concluir que el circuito de control para los actuadores piezoeléctricos presenta una alta latencia, lo que provoca una distorsión notable en la señal de salida incluso a frecuencias bajas (menores a 1 Hz). Además, a una frecuencia de 16.95 Hz, la forma de la señal de salida se vuelve completamente diferente a la señal de entrada cuadrada aplicada, lo que indica una respuesta inadecuada del sistema en ese rango de operación.

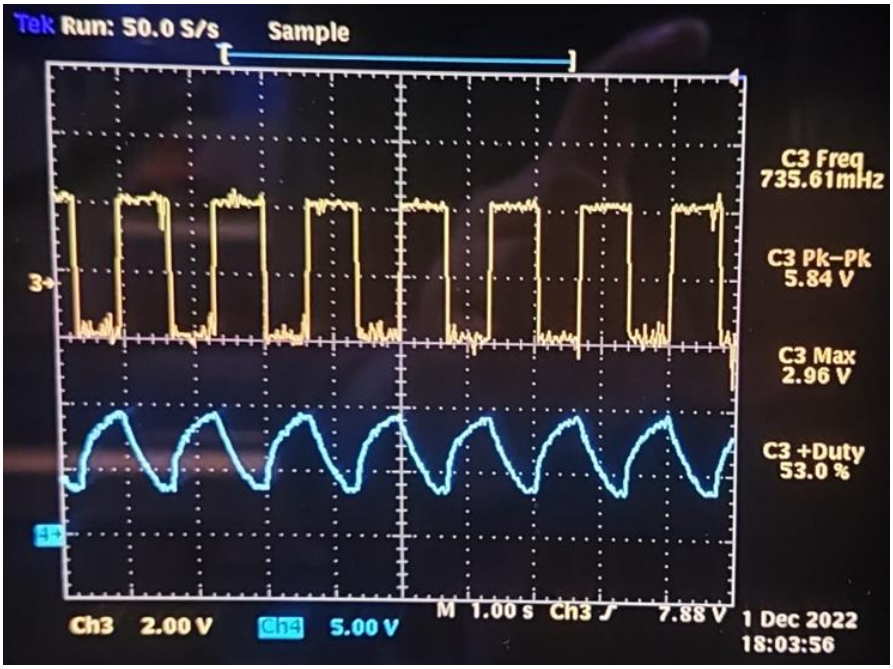


Figura 4.5. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de entrada de 0.735 Hz.

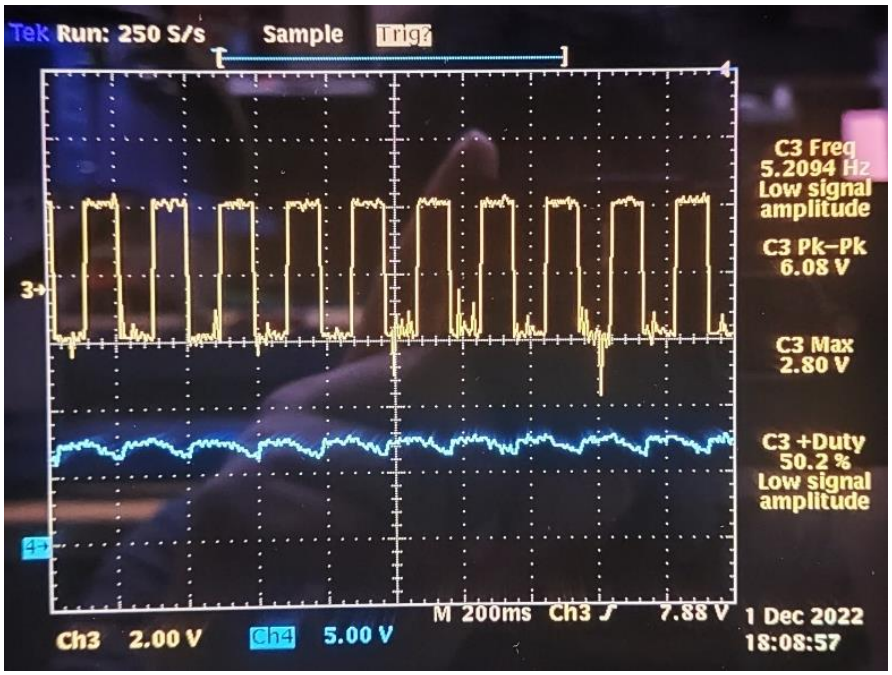


Figura 4.6. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de entrada de 5.2 Hz.

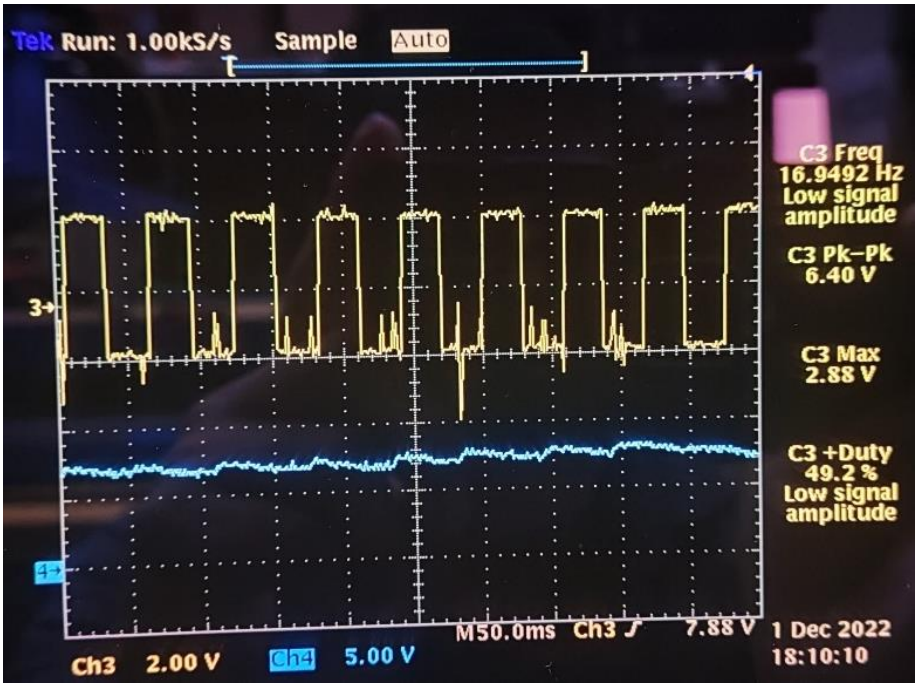


Figura 4.7. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de entrada de 16.9 Hz.

El desempeño limitado del circuito de control, en cuanto a velocidad de respuesta, no cumple con los criterios necesarios para un sistema de lazo cerrado en una máquina CNC. Esta latencia y distorsión podrían generar errores en el posicionamiento y la precisión, afectando la calidad del mecanizado.

A pesar de las distorsiones mostradas, se procedió a implementar un algoritmo de control básico, con el objetivo de evaluar su comportamiento en condiciones reales de operación. Una vez completada esta fase de pruebas, se realizó un rediseño del circuito para optimizar su respuesta dinámica y mejorar el rendimiento del sistema.

4.3. Resultados de las pruebas del sistema de control de lazo cerrado básico

Debido a las limitaciones del circuito de control para los actuadores piezoeléctricos, se implementó un algoritmo básico que ejecuta movimientos secuenciales alternados entre los ejes X e Y. El código fue diseñado para generar una trayectoria cuadrada de 100 µm por lado, mediante una secuencia de posiciones

predefinidas. En la Figura 4.8 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado en el microcontrolador dsPIC33EP256MU806.

Esta aproximación secuencial, donde cada eje se mueve individualmente, resultó necesaria debido a las restricciones de latencia del circuito y a la incapacidad del sistema para procesar movimientos simultáneos en ambos ejes. Aunque limitada, esta implementación permitió observar el nivel de precisión del posicionamiento durante las primeras pruebas.

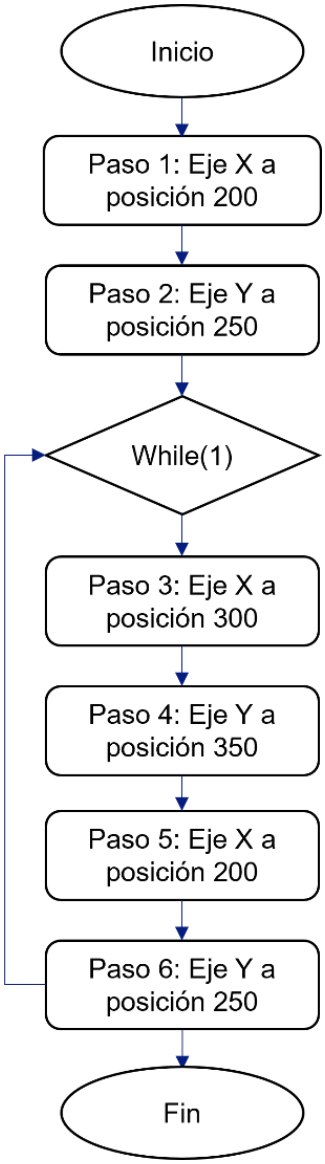


Figura 4.8. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en un microcontrolador para formar una trayectoria cuadrada.

La implementación exitosa de este algoritmo básico hizo posible el posicionamiento inicial del sistema láser sobre el material de trabajo, permitiendo realizar las primeras pruebas de grabado con trayectorias elementales.

En la Figura 4.9, se muestra el montaje del prototipo de la máquina utilizado para las pruebas de grabado láser, mientras que en la Figura 4.10 se presentan en detalle las partes más relevantes del sistema, incluyendo la plataforma de microdesplazamiento con actuadores piezoeléctricos, los sensores de microdesplazamiento y un láser de DVD montado en una plataforma de desplazamiento manual para el ajuste preciso del spot del láser. En la Figura 4.11, se muestra una vista ampliada del láser encendido.

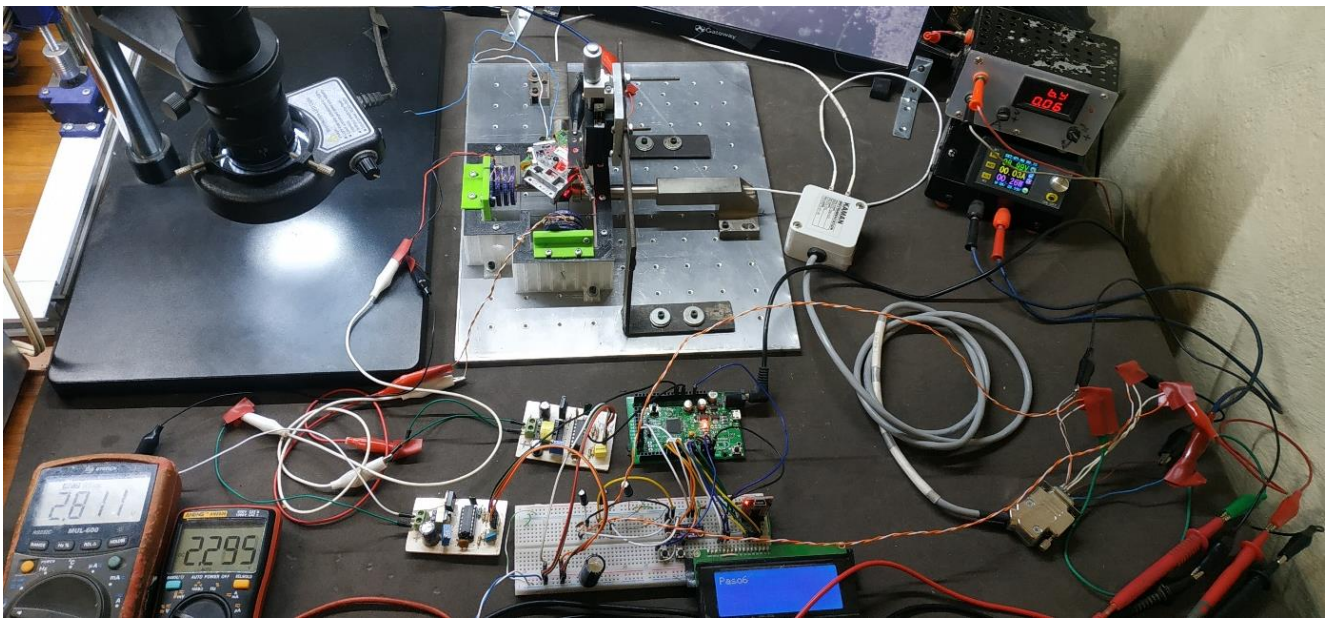


Figura 4.9. Montaje experimental del primer prototipo de la máquina para corte y grabado por láser, implementando el algoritmo de control de lazo cerrado básico.

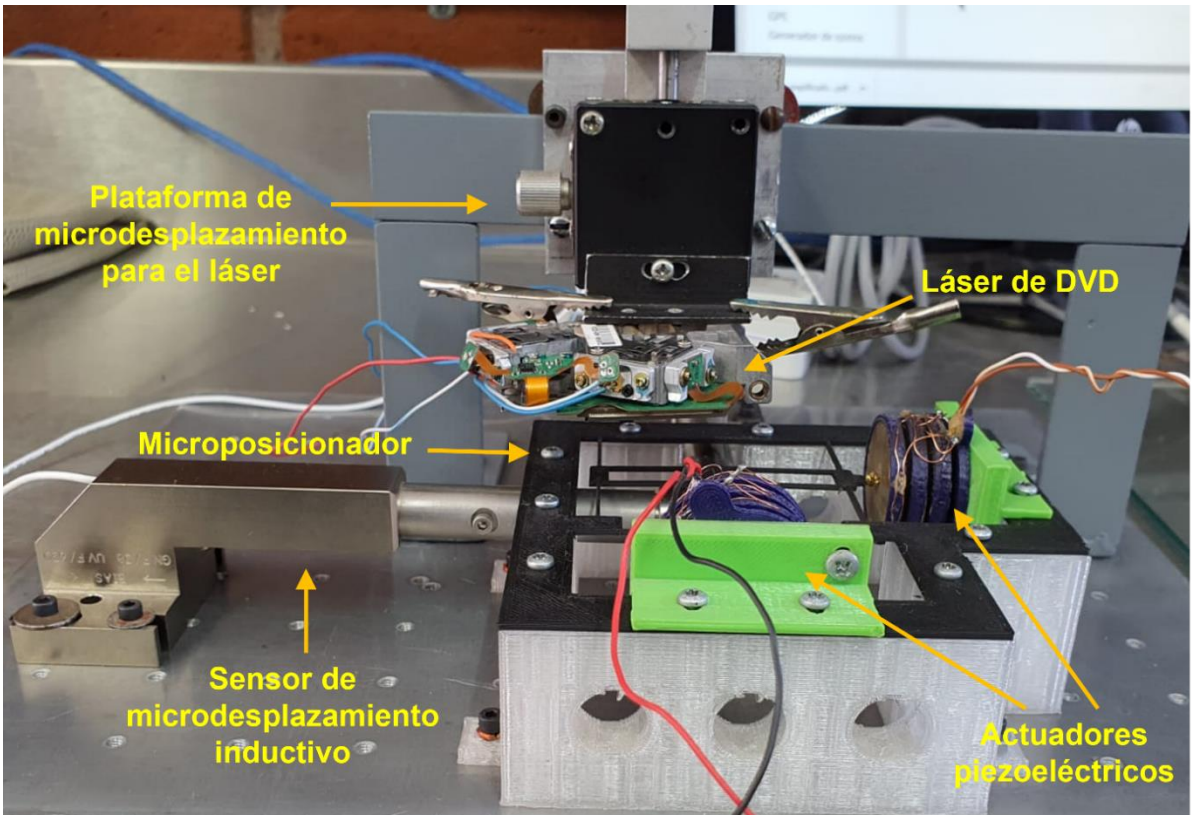


Figura 4.10. Montaje experimental del primer prototipo de la máquina para corte y grabado por láser implementando el algoritmo de control de lazo cerrado básico.

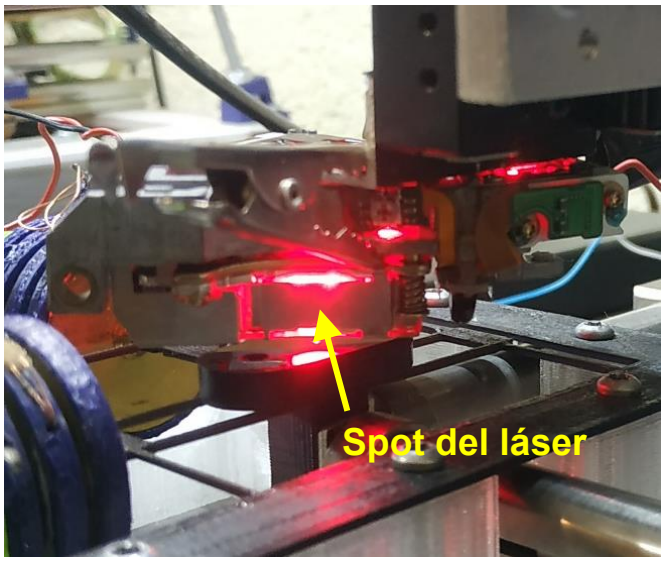


Figura 4.11. Montaje del láser de DVD posicionado sobre la zona de trabajo, operando a una potencia de aproximadamente 400 mW (2.85 V y 140 mA).

Metodología

La metodología seguida para realizar las pruebas de grabado láser fue la siguiente:

1. Preparación de la muestra: Se empleó un fragmento de una placa de Flame Retardant 4 (FR-4) con un grosor de 1.6 mm y cubierta con tinta negra de un bolígrafo de tinta permanente.
2. Colocación de la muestra: La muestra se posicionó sobre la zona de trabajo. Dado que los movimientos son micrométricos y de baja velocidad, no fue necesario fijarla con ningún método adicional.
3. Enfoque del láser: Se energizó al láser con una potencia de alimentación aproximada de 400 mW y se enfocó utilizando la plataforma de desplazamiento manual hasta observar la emisión de humo desde la superficie de la muestra. Este ajuste se realizó utilizando lentes de protección para garantizar la seguridad del operador.
4. Ejecución del proceso: Se ejecutó el algoritmo implementado hasta que la pantalla indicó la finalización del Paso 6.

La elección de la tinta negra como recubrimiento para la placa de FR-4 se basa en las propiedades ópticas específicas del láser de DVD utilizado en este sistema. Este láser opera a una longitud de onda de 650 nm (espectro visible rojo) y con una potencia de 400 mW, interactúa de manera óptima con superficies oscuras, ya que estas absorben la mayor parte de la energía emitida. En contraste, las superficies de colores claros reflejan gran parte de la radiación láser, lo que reduce significativamente su capacidad de absorción y, por lo tanto, la eficiencia del grabado.

El proceso experimental incluyó un total de cinco pruebas de grabado realizadas, de éstas, tres pruebas alcanzaron resultados satisfactorios, mientras que dos presentaron fallos, debido principalmente a un enfoque deficiente del láser, lo que resultó en la ausencia completa de grabado sobre el material. Esta inconsistencia en los resultados permite apreciar la importancia de diseñar un procedimiento de enfoque preciso.

Primera prueba exitosa

Los resultados obtenidos al aplicar la emisión láser sobre la muestra de FR-4 recubierta con tinta negra se muestran en la Figura 4.12. Se observa una línea inicial que comienza en la parte superior y se extiende hasta la zona donde inicia el proceso de grabado del área del cuadro. Este grabado indeseado se debe a que, al retirar la muestra, el láser no fue desactivado de manera adecuada. Además, se aprecia una distorsión en la geometría de la forma cuadrada esperada, que puede atribuirse a las limitaciones del sistema de control de lazo cerrado básico implementado para la operación de la plataforma XY.

Para realizar estas observaciones, se utilizó el microscopio Keyence, que tiene entre sus funciones:

- Perfilómetro
- Medición de longitudes
- Medición de valles
- Mapa de calor para picos y valles
- Observación en ángulo
- Varias configuraciones de la iluminación de la muestra observada.

La Figura 4.13 muestra los resultados obtenidos mediante el perfilómetro del microscopio Keyence donde se aprecia con detalle la topografía del grabado láser. La escala de colores empleada en la imagen muestra una degradación donde los tonos cálidos (7.63 µm) indican crestas y los fríos (0 µm) valles.

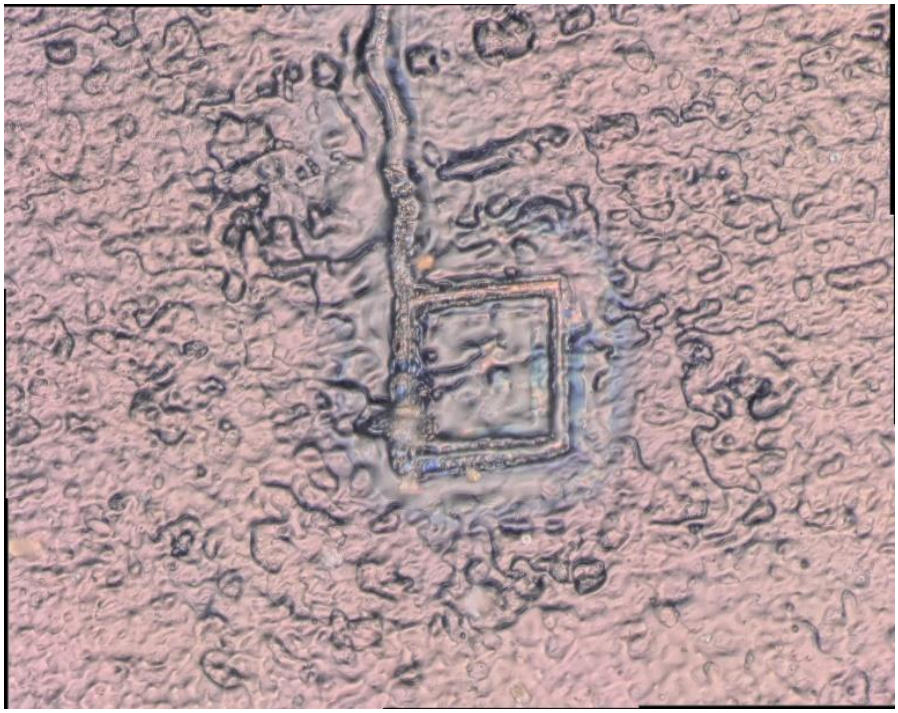


Figura 4.12. Resultado de la prueba de grabado sobre un trozo de placa de FR-4 cubierta de tinta negra.

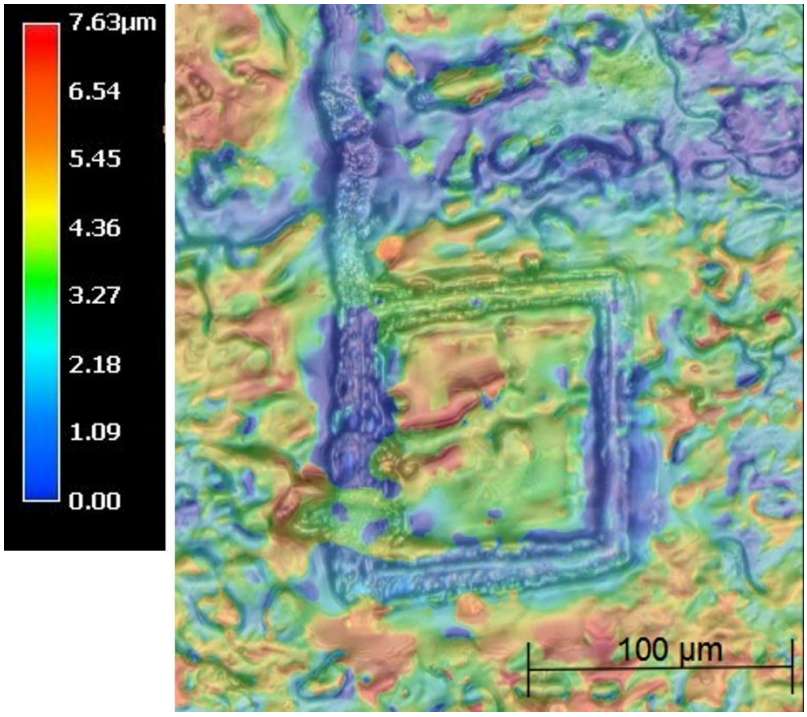


Figura 4.13. Muestra de la placa FR-4 obtenida con en el microscopio Keyence.

Para obtener un análisis más completo, se utilizaron las herramientas de medición del microscopio Keyence, como se muestra en la Figura 4.14. Las mediciones indican que la profundidad máxima de penetración del grabado es de 6.82 µm, mientras que el ancho del surco en las secciones medidas son de aproximadamente 20 µm y 30 µm.

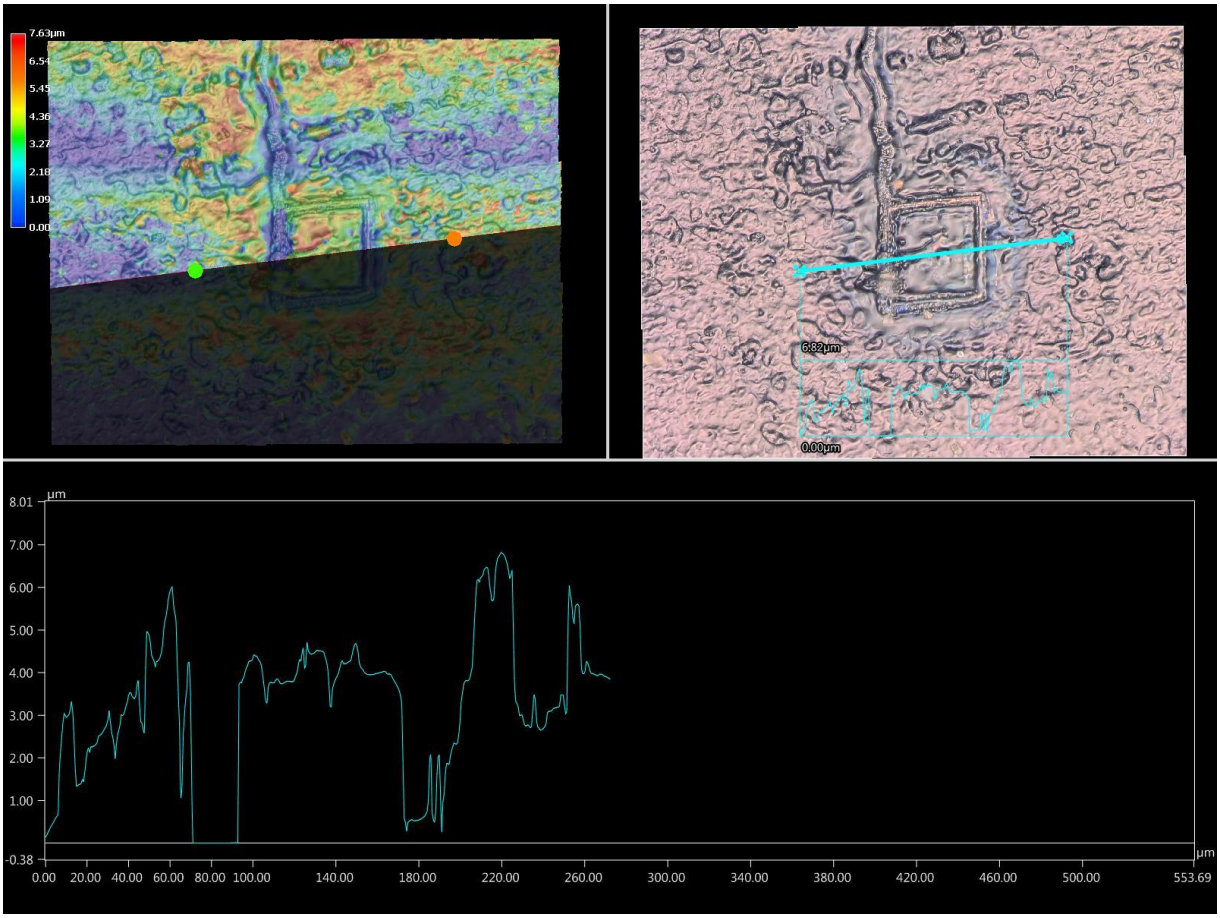


Figura 4.14. Medición de profundidad de valles grabados con el láser de DVD. Figura superior izquierda, fotografía en relieve. Superior derecha, acercamiento a la zona deseada. Inferior, gráfica del perfil de profundidad, indicando una profundidad mayor a 6.82 µm.

El microscopio Keyence también cuenta con una herramienta de medición de ángulos, como se ejemplifica en la Figura 4.15. En esta imagen, el valor observado para la zona analizada es de 130.26°, el cual está directamente relacionado con el perfil angular del spot láser utilizado en el proceso. Este valor angular específico permite analizar y determinar diversas características ópticas del láser, tales como su divergencia y la distribución de intensidad de su haz.

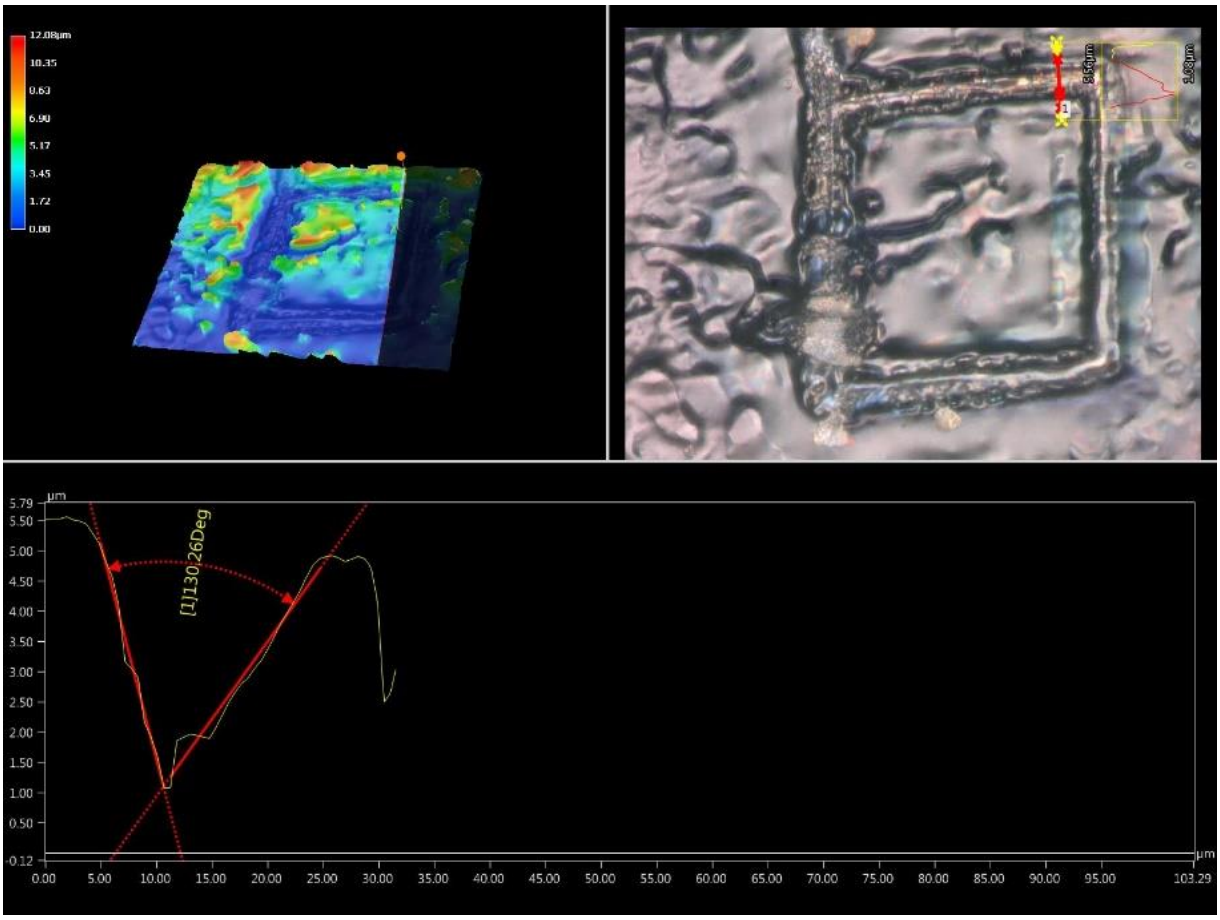


Figura 4.15. Medición para obtener ángulos en cavidades. Figura superior izquierda, fotografía en relieve. Superior derecha, acercamiento a la zona deseada. Inferior, gráfica del ángulo formado en la cavidad, el cual es de 130.26°, con una cresta de 5.56 µm y un valle en 1.08 µm.

Otra función de este equipo es el cálculo tanto del área, como del volumen. Esta herramienta puede ser muy útil ya que, a partir de este volumen y conociendo el material, puede calcularse la masa, utilizando la relación:

$$m = \rho V \tag{4.1}$$

donde ρ es la densidad del material, (g/cm3).

La Figura 4.16 muestra los resultados obtenidos al utilizar la función de perfilómetro sobre una línea de grabado realizada en el mismo material (FR-4 con recubrimiento de tinta negra). El patrón observado presenta dos regiones características: primero, un hueco circular correspondiente a la etapa inicial de

enfoque del láser, seguido por una línea recta que marca el inicio de la ejecución del algoritmo de grabado antes mencionado.

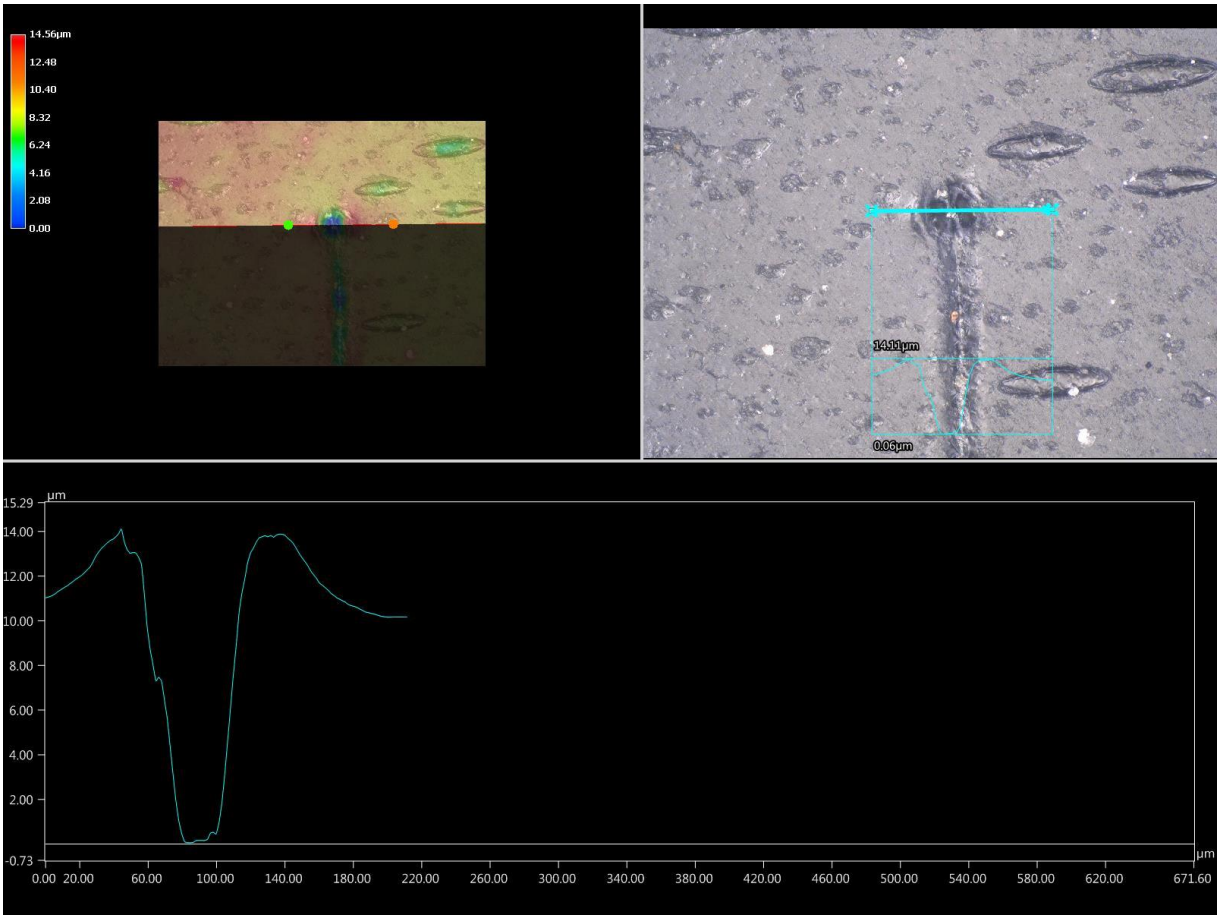


Figura 4.16. Medición de profundidad de valles grabados con el láser de DVD. Figura superior izquierda, fotografía en relieve. Superior derecha, acercamiento a la zona deseada. Inferior, gráfica del perfil de profundidad, indicando una profundidad mayor a 14.11 µm.

El análisis con la herramienta de medición del microscopio revela una profundidad máxima de grabado de 14.11 µm, valor registrado en la zona de mayor interacción del láser. Esta medición es particularmente relevante ya que establece un parámetro de referencia para la penetración máxima alcanzable cuando el láser actúa de forma prolongada sobre el material. La profundidad promedio a lo largo de la línea de grabado fue de 8.32 µm.

Segunda prueba exitosa

Los resultados de otra de las pruebas exitosas se muestran en la Figura 4.17. Las mediciones externas presentaron un largo de 105.24 µm y un ancho de 106.68 µm, con una variación relativa de sólo 2.52%. En las dimensiones internas, se registraron 82.80 µm de largo y 84.99 µm de ancho, con una diferencia de 2.49%. La anchura promedio del grabado fue de 11.62 µm, valor que corresponde al diámetro del spot láser logrado con la calibración.

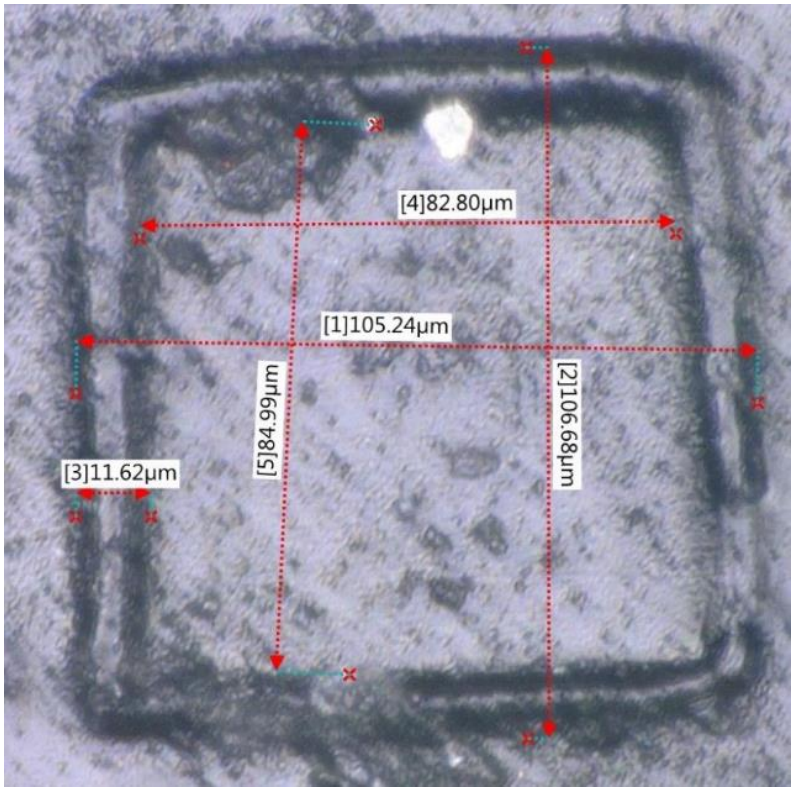


Figura 4.17. Dimensiones de un cuadrado grabado por láser. El microscopio incorpora diferentes herramientas para poder acotar las muestras observadas.

En la Figura 4.18 se muestra el análisis del grabado, mostrado en la Figura 4.17, utilizando la función de medición del perfilómetro del microscopio. A través de este análisis, se revela una singularidad en el proceso: *en lugar de formarse un surco como se esperaba, ocurrió el efecto contrario*. El material aparentemente fundido emergió a la superficie, creando una capa a lo largo de toda la trayectoria de la emisión láser, con una altura máxima de 5.2 µm.

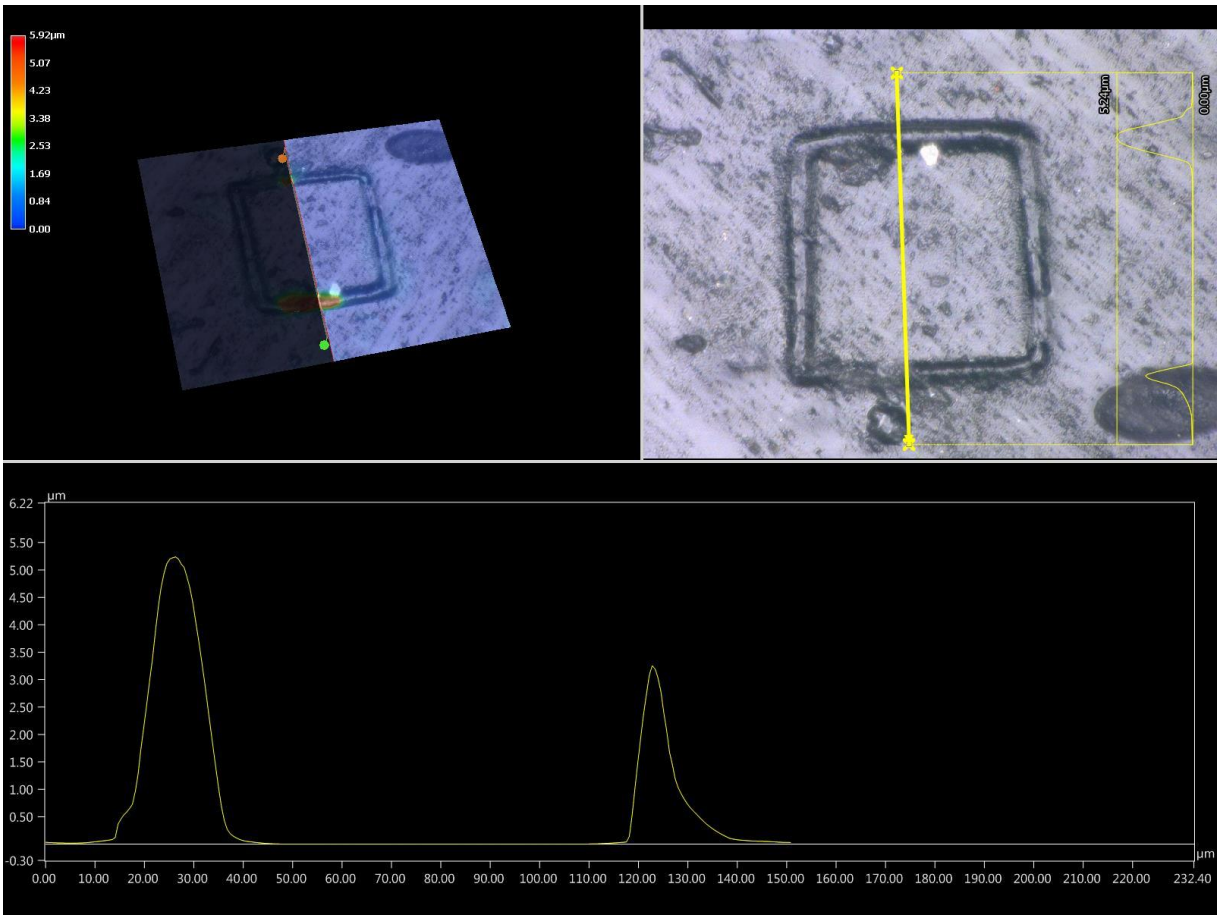


Figura 4.18. Medición de los picos formados por el grabado con el láser de DVD. La imagen superior izquierda muestra una fotografía en relieve, mientras que la imagen superior derecha presenta un acercamiento a la zona de interés. En la parte inferior, se observa la gráfica del perfil del grabado, donde se identifican dos picos principales: el de la izquierda, con una altura de 5.2 µm, y el de la derecha, con una altura de 3.4 µm.

Las posibles causas de este fenómeno pueden atribuirse a varios factores. En primer lugar, el enfoque del láser generó un spot más estrecho (11.62 µm), lo que resultó en una mayor concentración de energía sobre el material. Cuando el material alcanzó su punto de fusión, en lugar de vaporizarse completamente como ocurre en la ablación tradicional, permaneció parcialmente fundido debido al corto tiempo de interacción provocado por la velocidad de desplazamiento seleccionada, favoreciendo la formación de una estructura en forma de domo en lugar de un canal grabado.

Además, el uso de un sustrato de cobre pudo haber influido significativamente en este comportamiento. Debido a su alta conductividad térmica, el cobre disipó rápidamente el calor, provocando un enfriamiento acelerado de la película de tinta

sobre la superficie. Esta rápida solidificación pudo haber contribuido a la acumulación del material fundido en lugar de su eliminación.

Tercera prueba exitosa

Con este microscopio pueden utilizarse configuraciones con diferentes intensidades de iluminación, como la mostrada en la Figura 4.19, donde se muestra un cuadro en el que se logró una mayor simetría de grabado. Las dimensiones externas corresponden a 103.8 μm y se tiene una anchura de la línea de grabado de 13.7μm.

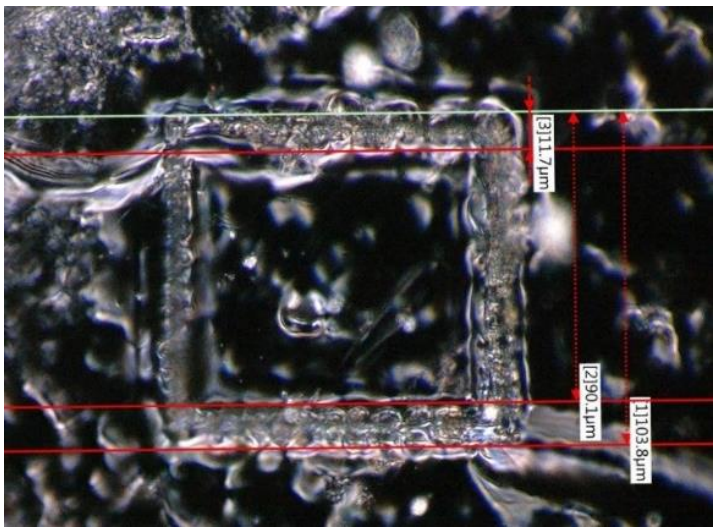


Figura 4.19. Visualización de la muestra con una configuración de luz diferente a los casos anteriores.

Comparación de resultados

Tabla 4.1. Comparación de parámetros de las tres pruebas realizadas.

Parámetro	Número de prueba		
	Primera	Segunda	Tercera
Dimensión externa del largo de cuadro (μm)	109.7	105.24	111.3

Dimensión externa del ancho de cuadro (µm)	111.6	106.68	103.8
Variación relativa, %	1.7	1.34	6.73
Dimensión interna del largo de cuadro (µm)	82.7	82.80	87
Dimensión interna del ancho de cuadro (µm)	88.3	84.99	78.4
Variación relativa, %	6.3	2.57	9.88
Diámetro promedio del spot láser (µm)	11.53	11.62	11.7

Los resultados obtenidos en las tres pruebas de grabado láser presentados en la Tabla 4.1 demostraron un desempeño consistente del sistema de control de lazo cerrado básico implementado. Las dimensiones externas presentaron una variación relativa promedio del 3.26% (rango: 1.34% a 6.73%), destacando especialmente la segunda prueba que mostró solo un 1.34% de variación.

La resolución de los movimientos de la máquina es de 1 µm, con un error mínimo de 0.85%, con el uso del sistema de control digital, que corresponde a los grabados del cuadrado de 100 x 100 µm. Este error fue obtenido de la siguiente forma:

$$Ancho\ de\ la\ línea\ de\ grabado\ o\ diámetro\ de\ spot\ = \frac{Longitud\ externa - longitud\ interna}{2} \quad (4.1))$$

Para conocer la resolución del movimiento:

$$Resolución\ de\ movimiento = (Longitud\ interna + Diámetro\ del\ spot) - Longitud\ de\ diseño \quad (4.2)$$

Una vez determinado el diámetro experimental del spot, para obtener el grabado con las longitudes de diseño, debe sumarse a las dimensiones de diseño.

En cuanto a las dimensiones internas, se observó una mayor dispersión en los resultados, con un promedio del 6.25% de variación relativa. Particularmente, la tercera prueba mostró una desviación del 9.88%, lo que sugiere posibles fluctuaciones en los movimientos de los ejes del microposicionador.

Un aspecto destacable fue la consistencia del diámetro del spot láser, que se mantuvo en 11.62 ± 0.09 μm a lo largo de las tres pruebas. Esta estabilidad confirma el correcto funcionamiento del sistema óptico.

Sobre la profundidad de grabado en las muestras realizadas de forma cuadrada se observó una variación de 6.82 μm hasta 4.78 μm, esto es, con una variación de hasta un 35.17 %.

Los resultados obtenidos confirman que el sistema actual es capaz de producir grabados con precisión micrométrica. Para lograr esto, fue necesario optimizar ciertos parámetros, como el algoritmo de control de lazo cerrado, el controlador del actuador piezoeléctrico y la calibración de los sensores de microdesplazamiento.

CAPÍTULO 5

Implementación de mejoras al sistema de control de lazo cerrado

En este capítulo se describen las optimizaciones implementadas en el sistema de control en lazo cerrado.

Primero, se presentan los resultados de las pruebas realizadas al nuevo diseño del circuito de control de los actuadores.

A continuación, se detallan las mejoras efectuadas en el sistema de control, destacando los ajustes que permitieron un desempeño más preciso y estable.

Finalmente, se expone el rediseño completo del sistema de control en lazo cerrado, junto con la configuración experimental utilizada para su validación.

Al final del capítulo, se incluye un diagrama de bloques que representa la conexión final de la máquina prototipo.

5. IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS AL SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO

Considerando los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se llevaron a cabo las mejoras necesarias para optimizar el funcionamiento del prototipo de máquina multifuncional y lograr las funciones de micrograbado, escaneo y perfilometría. Las mejoras implementadas fueron las siguientes:

- **Rediseño de la placa de control** de los actuadores piezoeléctricos para mejorar su rendimiento y estabilidad.
- **Sustitución del control digital de lazo cerrado por un sistema de control de lazo cerrado analógico**, permitiendo una respuesta más rápida y precisa.
- **Adaptación de la interfaz del firmware GRBL**, utilizado en el control de CNC, para convertir señales de pulso en señales analógicas, facilitando su integración con la etapa de comparación del sistema de control de lazo cerrado.
- **Modificación de los sensores de microdesplazamiento** para que entreguen únicamente una tensión positiva, eliminando la necesidad del circuito ADS1115 y agilizando la conversión de voltajes.
- **Sustitución de los actuadores piezoeléctricos** por modelos de mayor tamaño, permitiendo un desplazamiento más amplio y preciso.

Gracias a estas mejoras, se lograron resultados superiores a los presentados en el capítulo 4. A continuación, se detallan los avances obtenidos.

5.1. Pruebas del circuito de control rediseñado de los actuadores piezoeléctricos

Para incrementar la velocidad de respuesta del circuito controlador de actuadores piezoeléctricos y reducir la distorsión entre la señal de entrada y la salida, se implementó un rediseño completo del circuito indicado en la Figura 4.2, sustituyendo

la fuente de alimentación conmutada por una fuente lineal. El diseño original funciona como una fuente conmutada basada en modulación por ancho de pulso (PWM), donde una señal cuadrada de aproximadamente 40 kHz activaba un transistor de potencia conectado a un transformador elevador, alimentado por 12 V. Aunque este sistema permitía alcanzar el voltaje requerido, introducía una latencia significativa debido a la necesidad de modular continuamente el ciclo de trabajo del PWM para ajustar el voltaje requerido.

El nuevo diseño, basado en una fuente lineal, elimina la dependencia de la modulación PWM y optimiza la velocidad de respuesta mediante un sistema de control de lazo cerrado con realimentación analógica. Su operación se fundamenta en un amplificador operacional (op-amp) que compara en tiempo real el voltaje de referencia con el voltaje de salida. Cuando se detecta una diferencia, el op-amp ajusta continuamente la conducción de dos transistores de potencia, actuando como un divisor de voltaje variable. Este enfoque permite minimizar el error entre la referencia y la salida, manteniendo una diferencia cercana a cero sin las demoras asociadas a la conmutación digital. Al operar exclusivamente en dominio analógico, el circuito logra una respuesta mejor al circuito de tipo conmutación y reduce drásticamente la distorsión de la señal.

No obstante, la fuente lineal presenta un desafío crítico: requiere un voltaje de alimentación superior al máximo de operación. Para resolver esto, se integró la primera versión del circuito controlador de los actuadores, configurado como fuente fija de 150 V. Esta solución híbrida combina la eficiencia de las fuentes conmutadas para la elevación de voltaje inicial con la precisión de las fuentes lineales en la regulación final. Así, la etapa lineal utiliza los 150 V como entrada para garantizar el rango operativo necesario, mientras que la alimentación primaria del sistema se mantiene en 12 V, preservando la compatibilidad con los equipos existentes.

La implementación final del circuito se muestra en la Figura 5.1, donde se pueden distinguir dos partes fundamentales. La primera es el optoacoplador (OK1A), un componente clave que garantiza el aislamiento galvánico entre la etapa de alta tensión (150 V) y los circuitos de baja tensión (12 V). La segunda es el sistema de realimentación, que se basa en un divisor de tensión conformado por las resistencias

R2 y R3. Este divisor reduce el voltaje de salida a un nivel adecuado para la entrada del amplificador operacional.

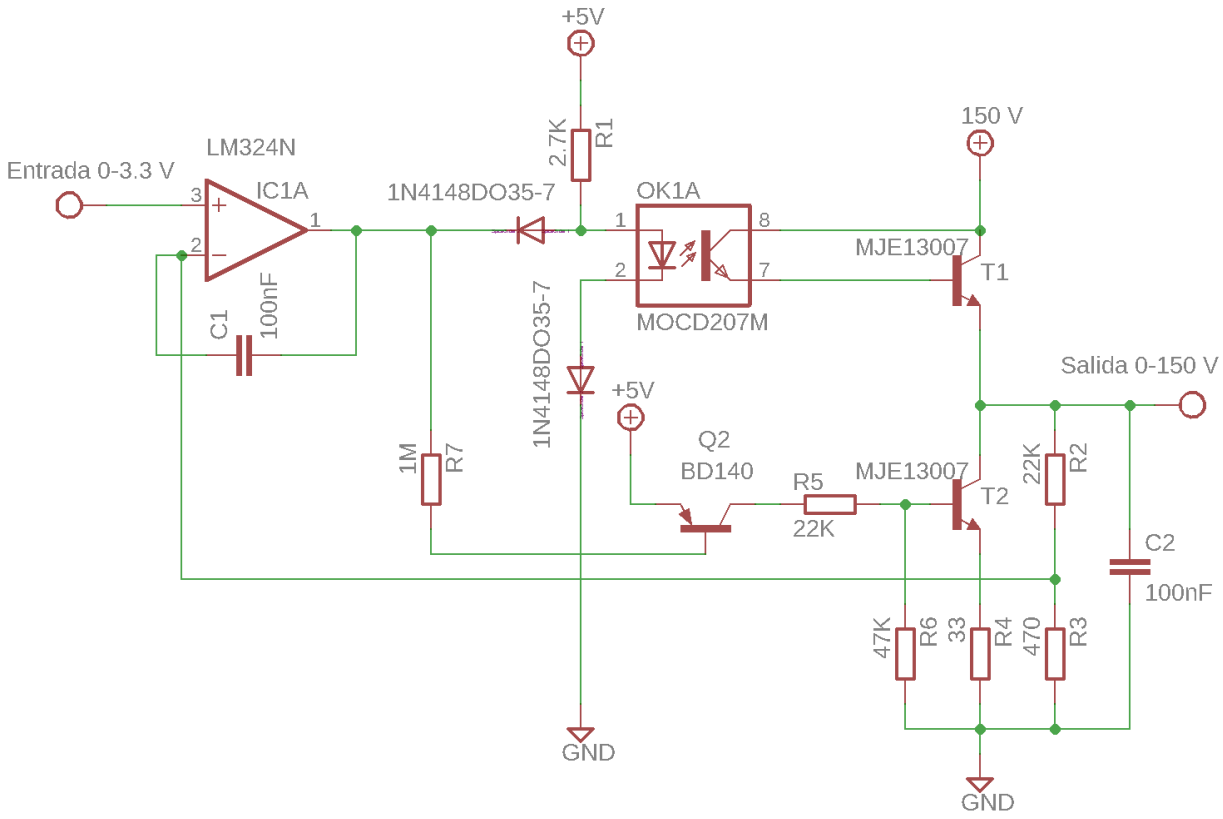


Figura 5.1. Diagrama electrónico del controlador, clasificado como regulador lineal.

En la Figura 5.2 se muestra la implementación del diagrama electrónico presentado en la Figura 5.1, montado sobre un protoboard. Se puede observar claramente el primer circuito controlador de actuadores, ahora operando como una fuente de 150 V. Las pruebas fueron realizadas con el circuito en el protoboard, lo que permitió realizar ajustes rápidos en función de los resultados observados, optimizando así su rendimiento antes de una implementación definitiva en una PCB.

Para evaluar el desempeño dinámico del nuevo circuito controlador, se implementó el montaje experimental mostrado en la Figura 5.3, utilizando el siguiente conjunto de equipos electrónicos e instrumentos de medición:

1. Osciloscopio.
2. Fuente de poder.
3. Generador de funciones.
4. Controlador para actuador piezoeléctrico

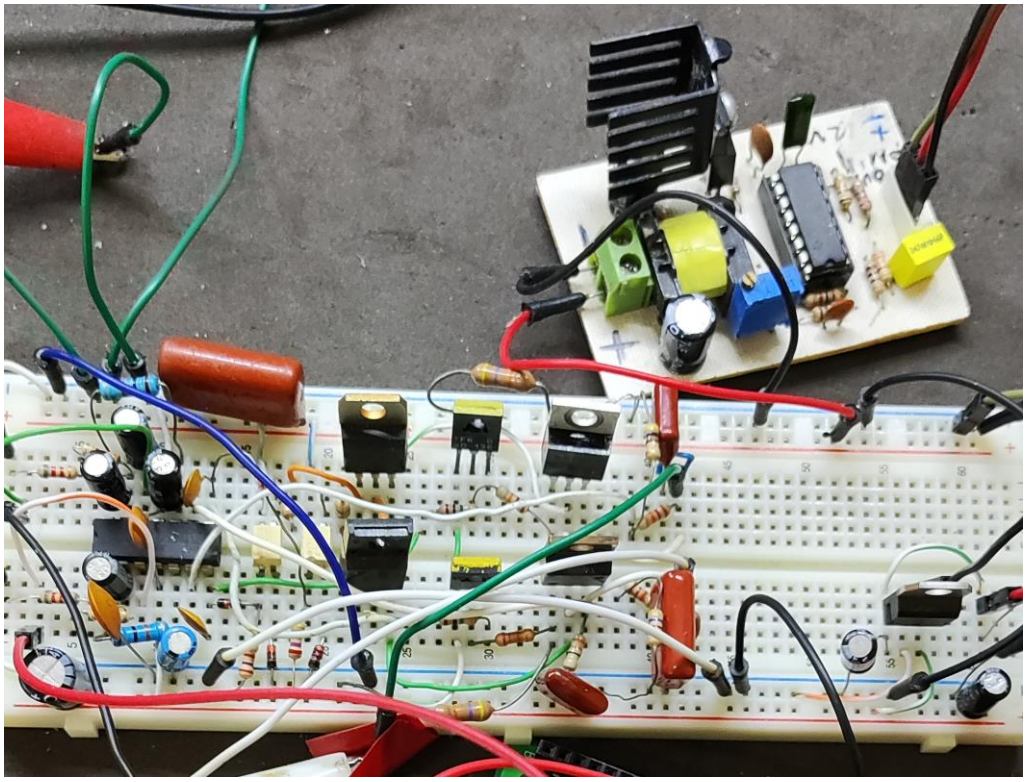


Figura 5.2. Implementación del diagrama controlador para los actuadores piezoeléctricos (diseño actual) en Protoboard.

Al aplicar la metodología experimental descrita anteriormente, se obtuvieron los resultados mostrados en las Figuras 5.4 a 5.6, los cuales revelan el comportamiento dinámico del sistema controlador. En estas gráficas se aprecia claramente la relación entre la señal de entrada (parte superior) y la señal de salida (parte inferior), mostrando una notable mejora respecto al diseño anterior.

- Baja frecuencia (0.56 Hz): Se observa una correspondencia casi perfecta entre las formas de onda de entrada y salida, lo que indica que el sistema mantiene una excelente fidelidad de señal en este rango de frecuencias.
- Frecuencia media (15.14 Hz): Se empieza a notar una ligera distorsión en la señal de salida, caracterizada por un pequeño retraso de fase y un ensanchamiento en la parte baja de la señal. Esto sugiere el inicio de las limitaciones del ancho de banda del circuito.
- Alta frecuencia (101.06 Hz): La señal de salida experimenta cambios notables en fase y forma de onda, pasando de una señal cuadrada a una forma triangular. A pesar de esta transformación, la señal se mantiene periódica y reconocible, lo que indica que el sistema sigue siendo funcional incluso por encima de su frecuencia de corte teórica.

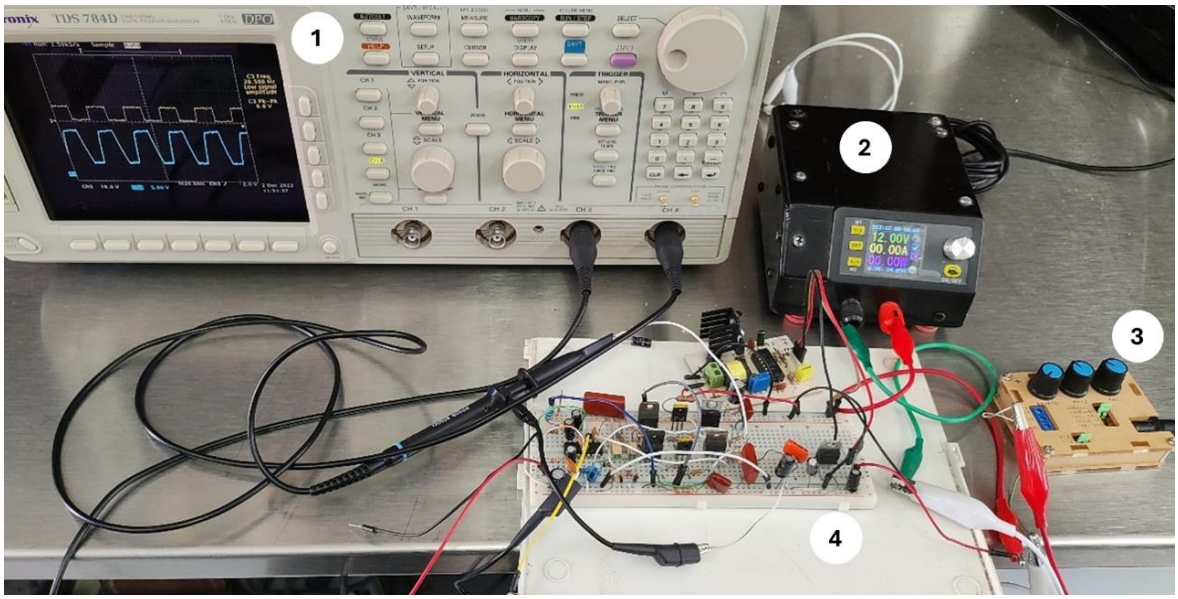


Figura 5.3. Pruebas de velocidad de respuesta del controlador para actuador piezoeléctrico (diseño nuevo).

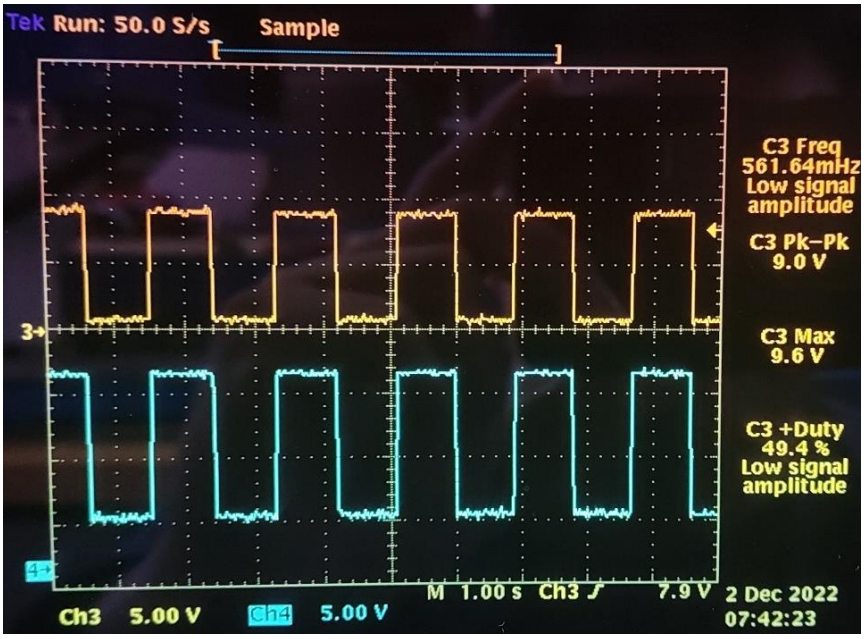


Figura 5.4. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de 0.561 Hz.

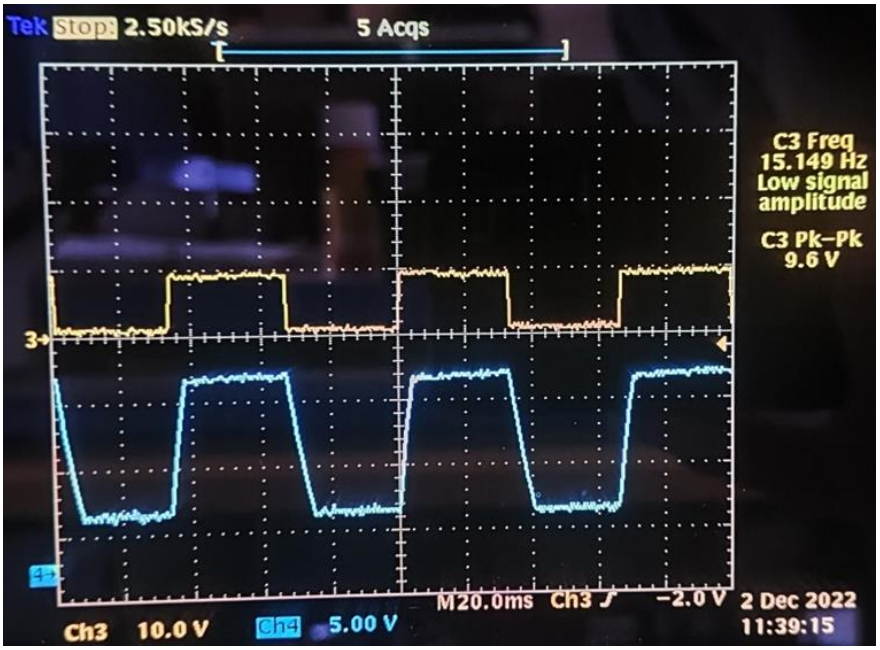


Figura 5.5. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de 15.149 Hz.

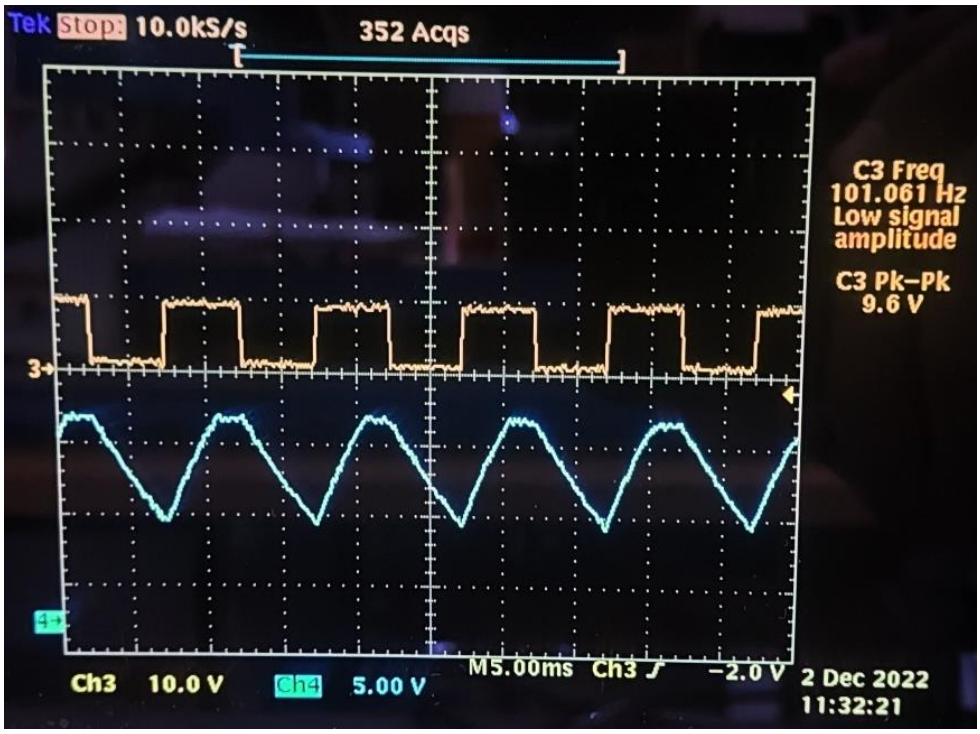


Figura 5.6. Resultado de la prueba con una señal cuadrada de 101.061 Hz.

Los resultados experimentales demuestran que el ancho de banda útil del circuito mejorado alcanza aproximadamente 100 Hz, lo que representa una mejora de 20 veces en comparación con el diseño original, que solo lograba 5 Hz.

Además de evaluar la velocidad de respuesta del circuito, que consideramos el parámetro más crítico para el sistema de control en lazo cerrado, se llevaron a cabo pruebas adicionales para verificar el cumplimiento de los requisitos operacionales previamente establecidos para el correcto control de los actuadores piezoeléctricos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Linealidad y Rango de Operación: El circuito proporciona una conversión lineal de 0 a 150 V a partir de una señal de entrada de 0 a 3.3 V, lo que indica un factor de amplificación de aproximadamente 45.
- Estabilidad de Voltaje: Presenta un rizado de aproximadamente 20 mVpp, asegurando una salida estable.
- Velocidad de Respuesta: Ancho de banda de aproximadamente 100 Hz, lo que permite una rápida adaptación a cambios en la señal de entrada.

- Corriente de Salida: Capaz de suministrar hasta 150 mA sin sobrecalentarse.
- Alimentación: Opera con una fuente de 12 V, asegurando compatibilidad con sistemas electrónicos estándar.

Estos resultados confirman que el circuito cumple con los requisitos necesarios para un control preciso de los actuadores piezoeléctricos.

Como siguiente paso, se procedió a la implementación de un nuevo sistema de control en lazo cerrado para la máquina prototipo.

5.2. Mejoras implementadas del sistema de control de lazo cerrado

Con la optimización del circuito generador de voltaje para actuadores piezoeléctricos, también se mejoró el sistema de control de lazo cerrado de la máquina CNC presentado anteriormente. Los resultados obtenidos en el capítulo anterior evidenciaron la necesidad de migrar de un sistema de control discreto a una arquitectura analógica con preprocesamiento digital, con el fin de mejorar la precisión y la estabilidad del sistema.

La Figura 5.7 muestra el diagrama de bloques completo del sistema implementado, donde se aprecia el flujo de señales desde la interfaz de control de la computadora (Laser GRBL) hasta los actuadores (presentes en la planta), pasando por las etapas de conversión y acondicionamiento. Esta solución híbrida combina lo mejor de ambos enfoques: la precisión del control analógico con la flexibilidad del procesamiento digital, logrando un sistema de control de lazo cerrado que es capaz de realiza movimiento en pasos de 0.1 µm

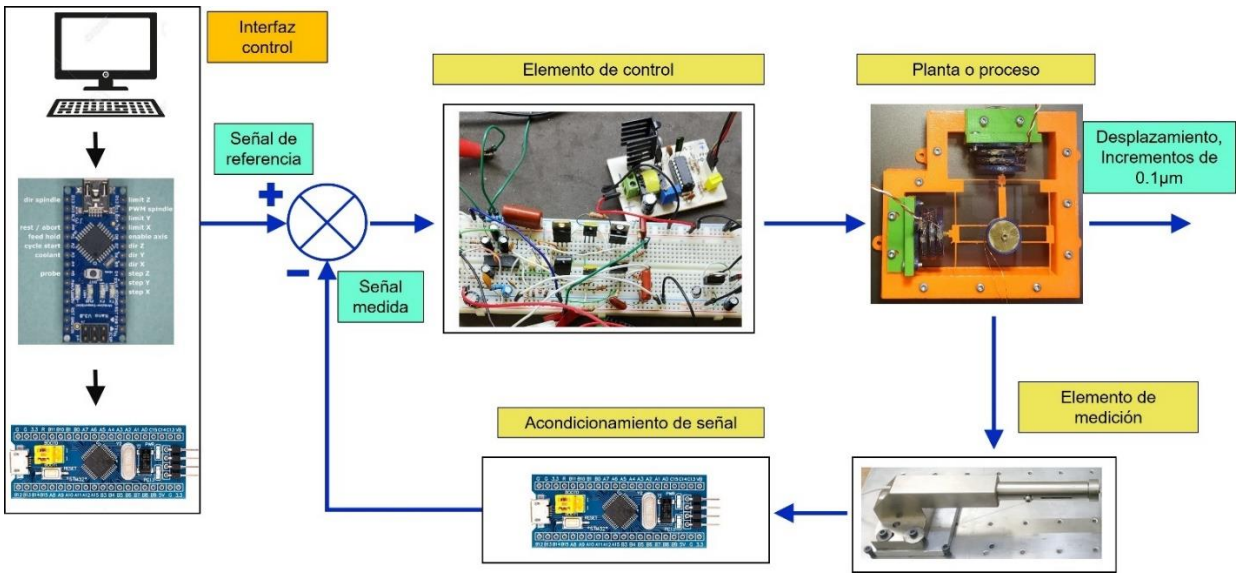


Figura 5.7. Diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado final.

A continuación, se describen detalladamente las partes principales que integran el sistema de control de lazo cerrado mostrado en la Figura 5.7.

Hardware de la interfaz de control

Las unidades de control convencionales para máquinas CNC están diseñadas generalmente para el manejo de motores paso a paso mediante señales digitales de pulsos. Esta arquitectura, ampliamente estandarizada en la industria, presentó un reto técnico significativo en el presente desarrollo, dado que los actuadores piezoeléctricos empleados requieren señales analógicas de alta precisión para su operación óptima. Pese a esta incompatibilidad inicial, se decidió mantener el uso de un software comercial de control CNC debido a las múltiples ventajas que ofrece, entre las que destacan: su amplia aceptación en el sector industrial, interfaces de usuario altamente optimizadas, integración nativa con sistemas CAD/CAM, y la disponibilidad de soporte técnico especializado.

Para resolver esta problemática, se implementó una etapa de conversión digital-analógica que transforma las señales de pulsos del controlador CNC en señales

analógicas precisas en el rango de 0 a 3.3V. Esta señal convertida cumple una función fundamental como referencia de posición en el sistema de control de lazo cerrado diseñado específicamente para los actuadores piezoeléctricos. La selección del microcontrolador STM32F103C8T6 como núcleo de este proceso de conversión se basó principalmente en su relación costo-rendimiento en el mercado actual.

Algunas características relevantes del microcontrolador STM32F103C8T6 son:

- Arquitectura ARM Cortex-M3 a 72 MHz
- Módulo ADC de 12 bits con tasa de muestreo de 1 MHz
- Salidas PWM de 16 bits de resolución
- 64KB de memoria Flash y 20KB de SRAM
- Interfaces de comunicación incluidos USART, SPI e I2C
- Bajo consumo energético (<36mA en operación máxima)
- Amplio rango de voltaje de operación (2.0V a 3.6V)
- 37 pines de E/S de propósito general
- Costo competitivo en el mercado de microcontroladores

El sistema desarrollado para la conversión de señales digitales a señales analógicas de precisión integra dos microcontroladores:

- Un microcontrolador Arduino Nano, que forma parte del hardware GRBL estándar y se encarga de generar las señales originales para el control de los ejes. Este componente mantiene la compatibilidad con los sistemas comerciales existentes.
- Un microcontroladore STM32F103C8T6, encargado de la conversión digital-analógica. Las dos señales analógicas se generan por medio de dos módulos PWM de 16 bits de resolución.

También, se incorporó una pantalla LCD 20x4 que permite visualizar en tiempo real los valores de desplazamiento micrométrico en ambos ejes, con una resolución de visualización de 0.1 µm.

El microcontrolador STM32F103C8T6, además de gestionar la visualización en la pantalla LCD, cumple la función de controlar el funcionamiento general de la máquina, coordinando tanto la adquisición de datos como la ejecución de los algoritmos de control e intercambiando modos de funcionamiento de la máquina.

Etapa de acondicionamiento de la señal del sensor

El sistema inicial implementaba el conversor analógico-digital ADS1115 para el acondicionamiento de señales provenientes de los sensores de microdesplazamiento. Sin embargo, durante las pruebas de validación se identificó que este componente presentaba limitaciones significativas en cuanto a velocidad de muestreo, alcanzando únicamente 860 muestras por segundo (SPS). Esta restricción generaba una latencia de aproximadamente 1.16 ms en la etapa de acondicionamiento, lo que afectaba considerablemente el desempeño del sistema de control en lazo cerrado.

Con el objetivo de optimizar el sistema, se modificó la etapa de amplificación del circuito original del sensor de microdesplazamiento, la cual está basada en amplificadores operacionales. Esta modificación consistió en excluir los valores negativos y ajustar el rango de salida al intervalo de 0 a 3.3 V, haciéndolo directamente compatible con las entradas analógicas del microcontrolador STM32F103C8T6.

Adicionalmente, se eliminó el convertidor analógico-digital ADS1115, conectando directamente la señal acondicionada a los puertos ADC del microcontrolador principal. Esta modificación permitió incrementar significativamente la velocidad de muestreo, reduciendo la latencia del sistema a menos de 50 microsegundos.

La implementación final permite al microcontrolador STM32F103C8T6 procesar directamente las señales provenientes del sensor, aplicando en tiempo real el algoritmo de compensación de no linealidades, desarrollados a partir del proceso de caracterización descrito en el Capítulo 3. Es importante destacar que, a pesar de las modificaciones realizadas en el circuito de acondicionamiento del sensor, la forma de la curva de no linealidad se mantuvo prácticamente inalterada, por lo que no fue necesario realizar ajustes significativos al algoritmo de control.

Elemento de control

Esta etapa se encarga de realizar una comparación continua entre la señal de referencia, generada por el firmware GRBL, y la señal de retroalimentación proveniente del sensor de microdesplazamiento. La comparación se lleva a cabo mediante un circuito basado en el amplificador operacional LM324, el cual integra cuatro amplificadores operacionales en un solo encapsulado. En la Figura 5.8 se ilustran los amplificadores operacionales configurados como comparadores, identificados como IC1D e IC1A.

La etapa de comparación genera una señal de error analógica que es proporcional a la diferencia entre la referencia y la medición real. Esta señal se acopla directamente al controlador del actuador piezoeléctrico, que reacciona para minimizar el error de posición. El sistema completo fue integrado en una sola placa PCB (Figura 5.9) que alberga tanto los circuitos de comparación como los controladores de potencia para ambos ejes (X e Y). Esta integración permite reducir las impedancias de las pistas, minimizar interferencias y mejorar la sincronización entre las diferentes etapas del sistema de control.

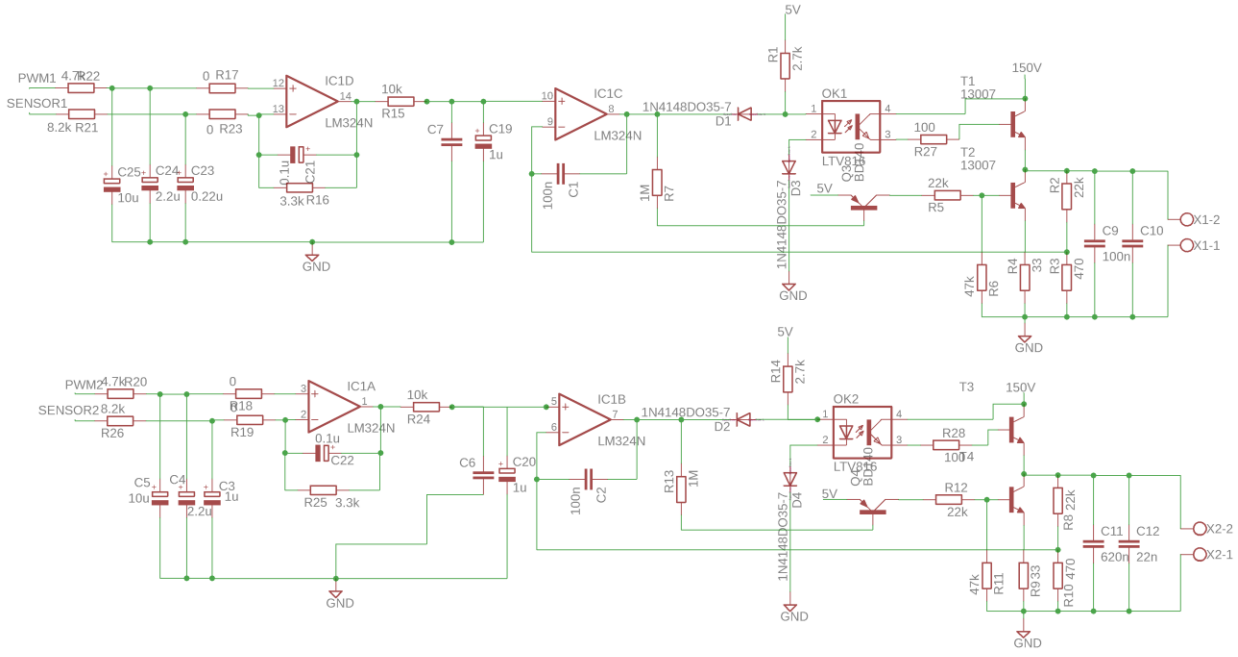


Figura 5.8. Sistema de control basado en amplificadores operacionales

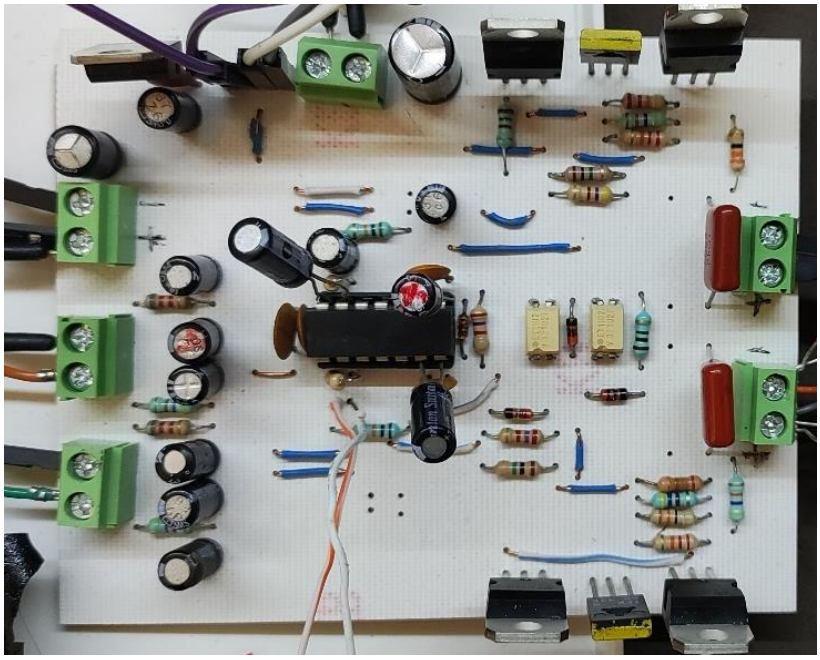


Figura 5.9. Módulo de control de lazo cerrado. Circuito electrónico del módulo de control de lazo cerrado.

5.3. Implementación física del sistema de control de lazo cerrado mejorado

Una vez implementadas las mejoras mencionadas, se procedió a la conexión provisional de todos los componentes del prototipo de la máquina, utilizando protoboards. Esta configuración permitió facilitar el montaje y realizar ajustes durante el proceso de integración del sistema.

En la Figura 5.10 se presenta una vista general del sistema en su forma física, donde se pueden identificar los siguientes elementos, enumerados en la imagen:

1. Sensor de microdesplazamiento
2. Arduino Nano para la interfaz de comunicación.
3. Módulo de control y conversor de pulsos a voltaje (STM32F103C8T6).
4. Módulo de acondicionamiento de señal del sensor.
5. Módulo de control de lazo cerrado.
6. Actuadores piezoeléctricos.
7. Sensor de microdesplazamiento óptico para escaneo.
8. Fuente de alimentación.
9. Módulo de control de los sensores de microdesplazamiento.

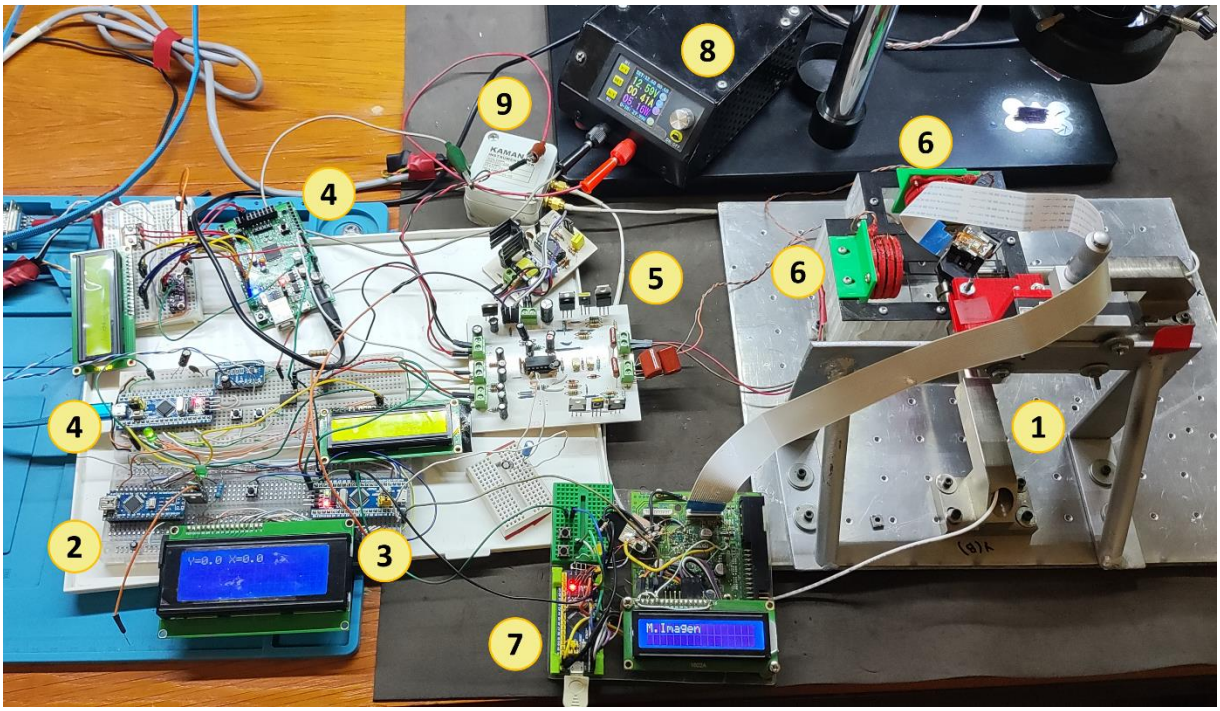


Figura 5.10. Implementación del Sistema.

El diagrama de bloques presentado en la Figura 5.11 muestra la arquitectura completa del sistema, detallando el flujo de señales desde los sensores hasta los actuadores. Asimismo, se indican los diferentes requerimientos de alimentación: 5 V para la lógica digital, 12 V y 9 V para los circuitos analógicos y sensores, y 150 V para la alimentación de los actuadores piezoeléctricos (generado a partir de una fuente de 12 V mediante un convertidor de alto voltaje).

La estrategia de alimentación implementada se basa en el uso de fuentes independientes para cada subsistema, lo cual ofreció importantes ventajas durante la fase experimental. Esta configuración modular permitió minimizar interferencias entre los distintos circuitos, facilitó el diagnóstico de fallas y posibilitó la medición individual del consumo energético de cada módulo. En particular, se logró evitar el acoplamiento de ruido en las señales analógicas sensibles provenientes de los sensores de desplazamiento.

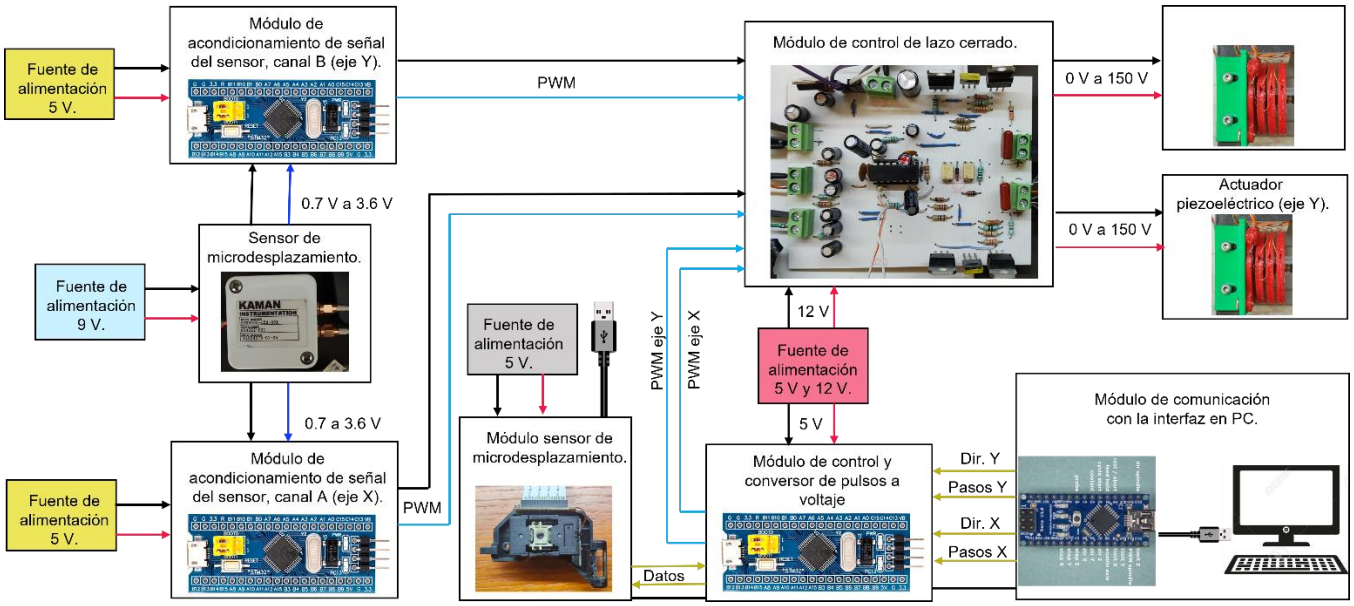


Figura 5.11. Diagrama de bloques de la conexión general del sistema.

Si bien la configuración actual con múltiples fuentes resultó adecuada para la etapa de prototipado, el diseño contempla, en etapas posteriores, la integración de una única unidad de potencia que centralice la distribución de energía de manera más eficiente.

CAPÍTULO 6

Resultados con el sistema de control de lazo cerrado mejorado

En este capítulo se describen las distintas funciones implementadas en la máquina prototipo, así como los resultados obtenidos.

Se inicia con la presentación de los resultados de la función de grabado, utilizando un láser de DVD modelo KWS-200A, con una longitud de onda de 650 nm y una potencia eléctrica de 399 mW.

A continuación, se exponen los resultados de la función de perfilometría superficial, empleando un láser de CD modelo SF-P151, con una longitud de onda de 780 nm y una potencia óptica de 5 mW.

Finalmente, se presentan los resultados correspondientes a la función de microscopía digital, utilizando el mismo láser empleado en la función de perfilometría.

6. RESULTADOS CON EL SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO MEJORADO

Durante la fase de desarrollo del prototipo, se identificó la posibilidad de expandir las capacidades del sistema más allá de las funciones iniciales de grabado y corte láser. Esta adición de funciones surgió como consecuencia del control micrométrico implementado en los ejes de posicionamiento, permitiendo adaptar el sistema para funciones de microscopía digital y perfilometría superficial sin requerir modificaciones estructurales significativas, demostrando la versatilidad del diseño original. Las funciones implementadas son:

- **Grabado de superficies:** Se empleó un cabezal óptico proveniente de una unidad de DVD (Pick-up) con longitud de onda de 650 nm y una potencia óptica de hasta 100 mW, suficiente para inducir ablación en ciertos materiales oscuros. Entre los materiales probados con éxito se encuentran PVC, polietileno, tintas negras y filamentos para impresión 3D.
- **Microscopía digital:** Esta función se implementó utilizando el cabezal óptico de CD modelo SF-P151. Este láser se caracteriza por operar a una baja potencia óptica (hasta 5 mW) y una longitud de onda de 780 nm, lo que permite obtener imágenes básicas de la superficie de las muestras.
- **Perfilometría óptica:** Derivado del sistema de microscopía, se desarrolló un sistema de escaneo automatizado que permite reconstruir la topografía superficial de las muestras. Esto se logra mediante la medición precisa de la distancia entre el cabezal láser y la superficie de la muestra. Para esta función también se utilizó un cabezal óptico de CD.

Aunque los cabezales ópticos de unidades Blu-ray, con una longitud de onda de 405 nm, podrían teóricamente ofrecer una mayor resolución, en la práctica no se observarían mejoras significativas. Esto se debe a las limitaciones mecánicas del

sistema de posicionamiento, que impiden aprovechar el potencial de resolución que ofrece esta tecnología.

En la Figura 6.1 se muestra el prototipo final junto con los modelos de Pick-up utilizados para realizar diversas pruebas de funcionamiento. Cabe destacar que, las unidades Pick-up están conectadas a una unidad de control independiente, la cual mantiene una comunicación básica con el prototipo CNC. Esta unidad de control fue desarrollada previamente como parte de una tesis de maestría, cuya información detallada puede consultarse en (Ferrara Bello & Tecpoyotl Torres, 2019).

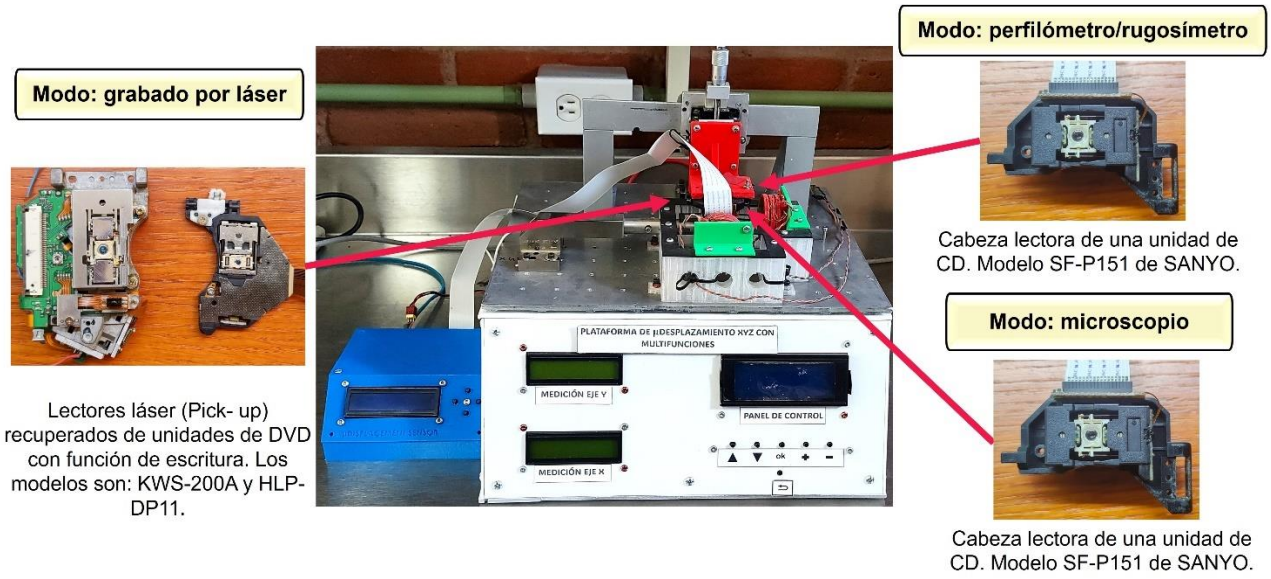


Figura 6.1 Prototipo con múltiples funciones.

El prototipo desarrollado incorpora un sistema de visualización compuesto por tres pantallas LCD, diseñado para proporcionar información detallada durante las fases de configuración, calibración y operación del equipo.

El sistema utiliza dos pantallas LCD de 16x2 caracteres, dedicadas exclusivamente al monitoreo de los ejes X e Y. Estas pantallas muestran en tiempo real la posición absoluta de cada eje, con una resolución de 0.1 µm. Durante las pruebas experimentales se observó que su funcionamiento continuo a lo largo de los procesos de fabricación generaba una latencia en el sistema de control, lo que comprometía la precisión del prototipo. Para mitigar este efecto, se implementó un

esquema de activación condicional: las pantallas permanecen activas únicamente durante las fases de calibración y diagnóstico, desactivándose automáticamente una vez iniciado el proceso de fabricación.

La tercera pantalla es un LCD de 20x4 caracteres, que funciona como la interfaz principal de operación. Este display muestra información general del sistema, incluyendo la función seleccionada, la configuración de los incrementos de paso, y las coordenadas de posición según los comandos recibidos a través de la interfaz LaserGRBL. La interacción con el usuario se realiza mediante seis botones ubicados debajo de la pantalla, los cuales permiten la selección de funciones y la configuración de parámetros de forma intuitiva.

A continuación, se presentan los resultados finales de las pruebas realizadas para cada una de las funciones implementadas.

6.1. Resultados de las pruebas de grabado

Para evaluar la capacidad de la máquina de grabado, se seleccionó una geometría compleja con el objetivo de poner a prueba su precisión y resolución en la ejecución de patrones detallados. La elección de una figura compleja permite inferir que, si la máquina puede reproducir dicha geometría con éxito, será capaz de realizar sin inconvenientes figuras de menor complejidad. En este caso, se optó por la figura simbólica del Yin-Yang, la cual presenta curvas suaves y detalles diferenciados, ideales para esta evaluación.

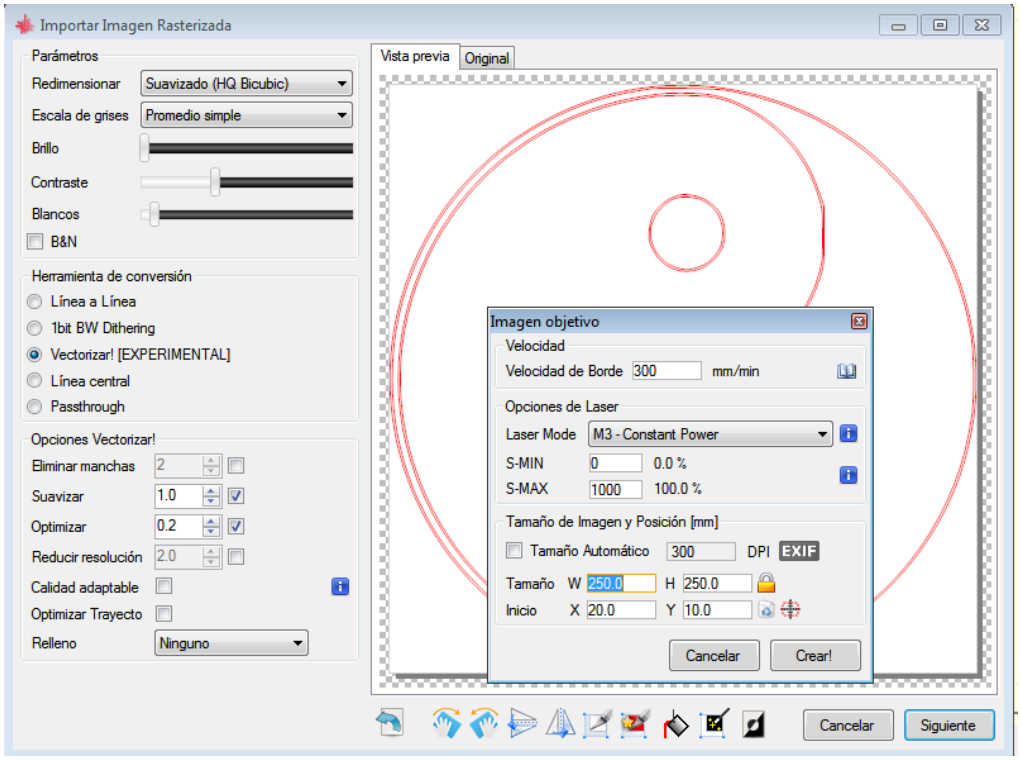
Los pasos seguidos para realizar el grabado fueron los siguientes:

- **Preparación de las muestras:** Se prepararon fragmentos de FR-4 y aluminio, ambos recubiertos con una capa de tinta negra de marcador permanente. Este recubrimiento mejora la absorción de la radiación láser, facilitando el grabado.
- **Colocación de la muestra**: La muestra se colocó cuidadosamente en la zona de trabajo de la plataforma de desplazamiento. Se procuró que las dimensiones de la muestra fueran compatibles con el área útil de grabado, aproximadamente 1 cm x 1 cm.

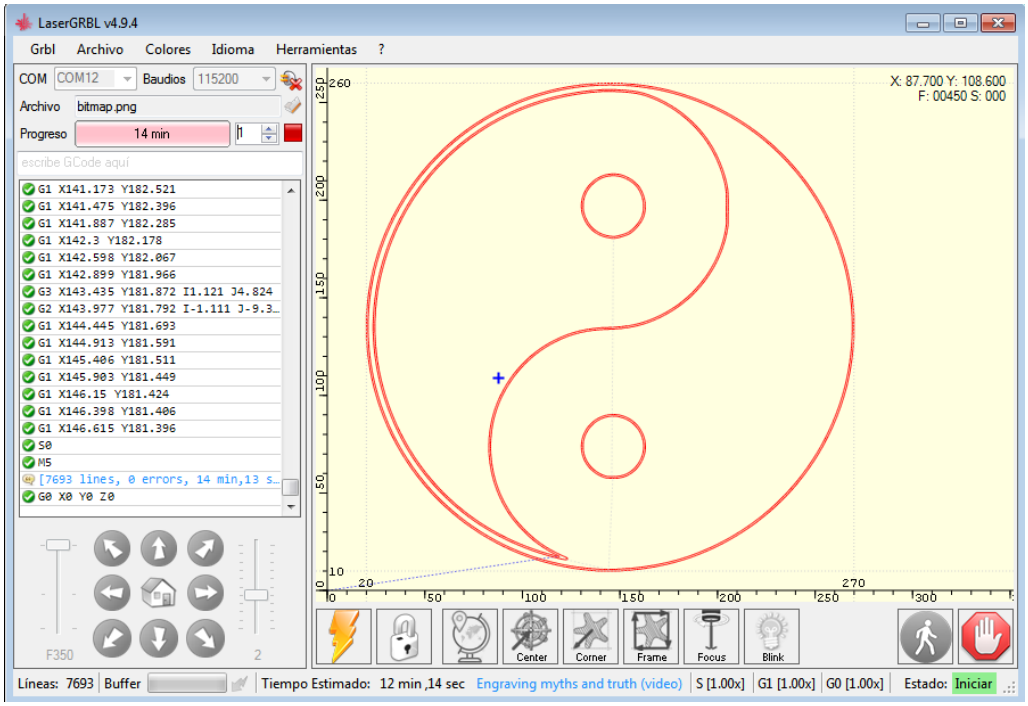
- **Conexión de la máquina con la interfaz LaserGRBL:** Se estableció la conexión entre la máquina de grabado y una computadora mediante esta interfaz. En este paso, se configura la geometría a grabar.
- **Selección de la operación en la máquina prototipo:** En la interfaz de usuario se seleccionó la opción correspondiente al tipo de operación a realizar, en este caso, grabado con láser.
- **Calibración del láser:** Se energizó el láser con una potencia óptica de 399 mW (2.85 V y 140 mA). Posteriormente, se realizó la calibración manual del enfoque utilizando la plataforma de desplazamiento, buscando obtener un punto de grabado lo más fino posible.
- **Ejecución del proceso:** Se inició el grabado de la figura Yin-Yang, con un diámetro de 250 μm y una velocidad de avance de 300 μm/min. Bajo estas condiciones, el tiempo estimado para completar el grabado fue de aproximadamente 14 minutos.
- **Finalización y análisis:** Una vez concluido el proceso, se extrajo la muestra para su análisis. Se evaluó la calidad del grabado, la precisión del contorno y la fidelidad de reproducción de la figura original.

Siguiendo la metodología establecida, se procedió a la configuración del software LaserGRBL para llevar a cabo el proceso de grabado. En la Figura 6.2a, se puede observar una captura de pantalla del entorno de configuración del software. La ventana en segundo plano corresponde a la sección de vectorización de la imagen, en la cual se definen aspectos como el valor de contraste, el brillo, blancos entre otros. Por otro lado, la ventana superpuesta en primer plano muestra la configuración específica del grabado, donde se ajustan parámetros como la velocidad de avance, la potencia del láser y las dimensiones de la geometría a grabar.

En la Figura 6.2b, se presenta una imagen del proceso de grabado en ejecución. En esta captura de pantalla se puede observar el monitoreo en tiempo real del progreso del grabado, lo que permite verificar la correcta reproducción del patrón y realizar ajustes inmediatos, si fuera necesario.



(a)



(b)

Figura 6.2. (a) Parámetros de vectorización y dimensiones de la geometría, (b) tiempo estimado de grabado y trayectoria.

Antes de presentar los resultados obtenidos con el sistema debidamente calibrado, se consideró pertinente incluir una serie de pruebas preliminares realizadas con una calibración deficiente de los sensores de microdesplazamiento.

En la Figura 6.3, se muestra una regla micrométrica con una escala de 10 µm, ubicada sobre el área de trabajo de la plataforma de desplazamiento. Sobre la cual, se posicionó un microscopio digital, cuya función fue observar y registrar con mayor detalle el movimiento realizado por el cabezal durante la ejecución de la trayectoria correspondiente a la geometría Yin-Yang.

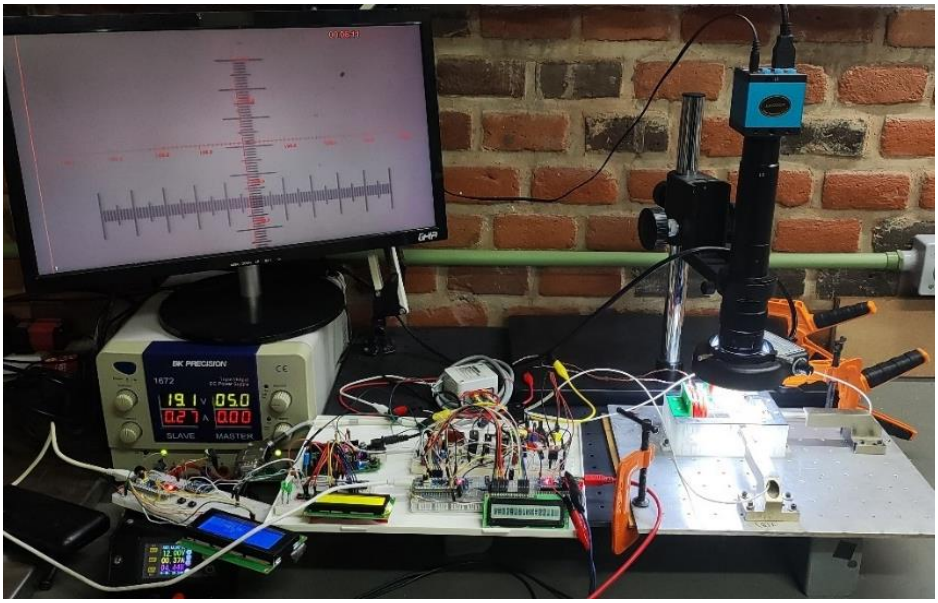


Figura 6.3. Montaje experimental para observar el movimiento de una geometría Yin-Yang.

La trayectoria seguida durante el grabado, producto de esta mala calibración, se presenta en la Figura 6.4. En esta imagen se puede observar la representación del movimiento aproximado, tomando como punto de referencia una imperfección visible en la regla micrométrica. Esta trayectoria, sobrepuesta a la geometría esperada del Yin-Yang (representada en color rojo), muestra una distorsión evidente: la figura aparece ovalada, indicando que el sistema no está desplazándose de manera uniforme en ambos ejes.

En particular, solo uno de los ejes registra correctamente el desplazamiento de 250 µm, mientras que el eje perpendicular presenta un error debido a una mala calibración del sensor. Para validar esta hipótesis y analizar el impacto de la calibración errónea en el resultado final, se procedió a realizar pruebas de grabado adicionales.

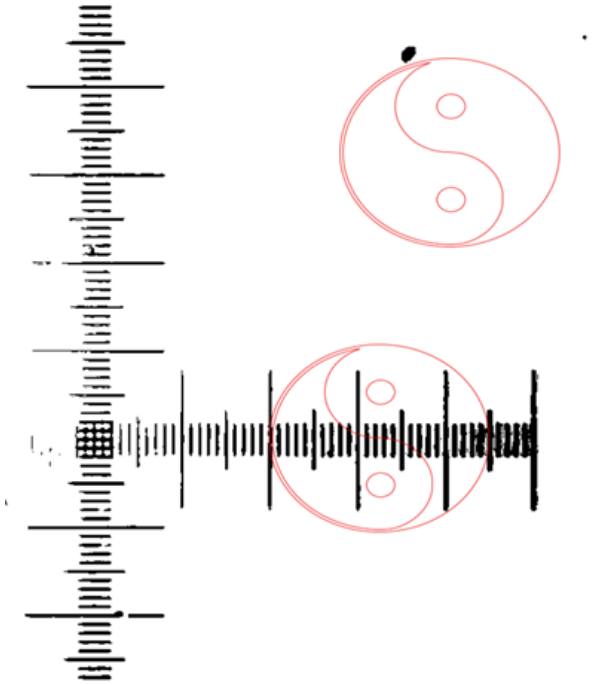


Figura 6.4. Trayectoria del desplazamiento registrado donde el objetivo fue generar una geometría Yin-Yang.

En la Figura 6.5 se muestra un acercamiento del montaje del sistema láser utilizado durante el proceso de grabado. Para esta aplicación se empleó un diodo láser extraído de una unidad de DVD, el cual emite una radiación con una longitud de onda de 650 nm, correspondiente al espectro del color rojo visible.

Gracias a que se trata de un láser visible, es posible observar el punto de enfoque (spot) durante la operación, lo cual facilita la alineación y calibración del sistema. No obstante, debido a la concentración de energía en un área reducida, existe un riesgo significativo para la vista, por lo que, es estrictamente necesario el uso de gafas de protección adecuadas que bloqueen la longitud de onda específica del láser, minimizando el riesgo de daño ocular.

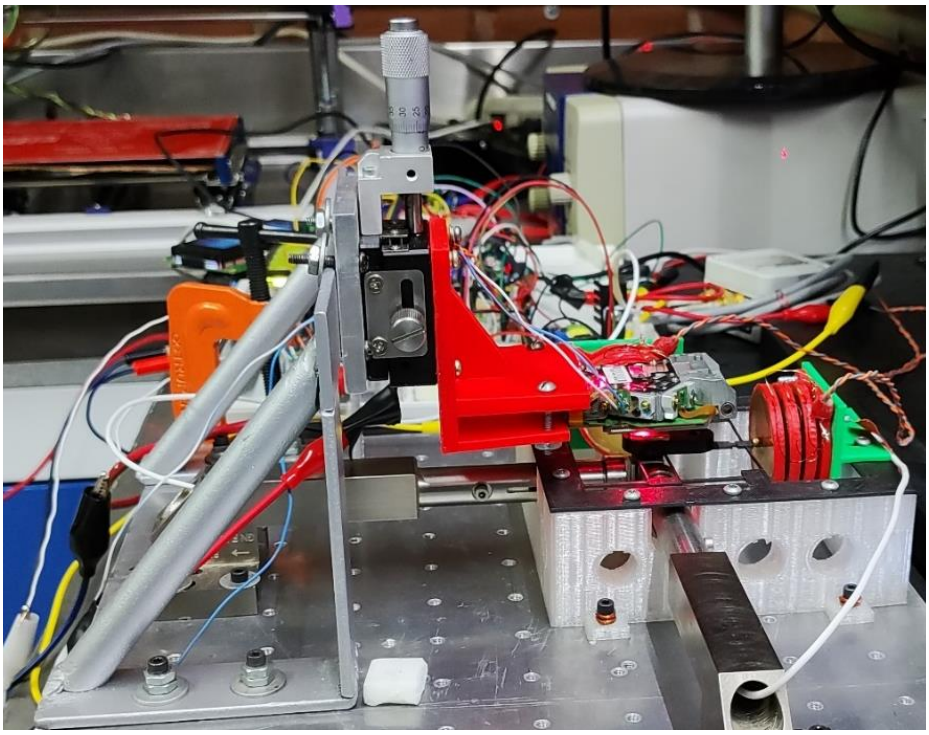


Figura 6.5. Montaje del láser de DVD posicionado sobre la zona de trabajo, operando a una potencia de 399 mW (2.85 V y 140 mA).

6.1.1. Calibración deficiente de sensores de microdesplazamiento

El resultado del grabado realizado con una calibración deficiente de los sensores de microdesplazamiento se muestra en la Figura 6.6. En este resultado es posible observar claramente las deformaciones en la geometría grabada, las cuales son consistentes con las trayectorias observadas en la Figura 6.5.

Adicionalmente, en las Figuras 6.7 y 6.8 se presentan dos acercamientos del área grabada, obtenidos mediante el uso de dos lentes con diferentes aumentos y diferente iluminación. Estas imágenes permiten examinar con mayor precisión los detalles de la geometría y la calidad del grabado. Se confirma que la forma obtenida en el grabado corresponde a la trayectoria distorsionada visualizada anteriormente, en la cual la geometría Yin-Yang presenta una deformación en forma ovalada.

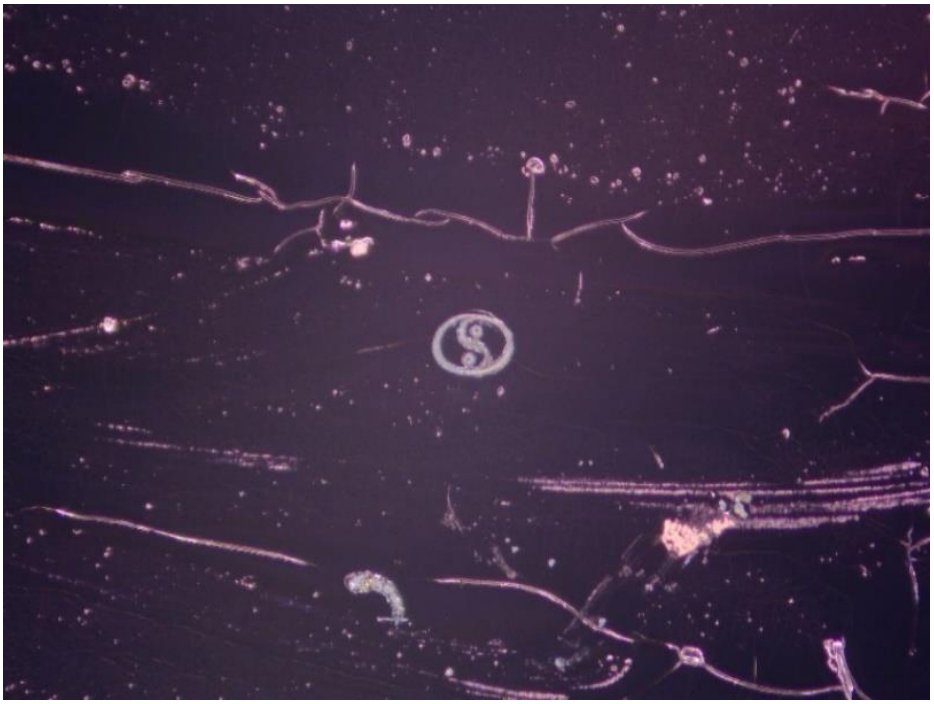


Figura 6.6. Observación del grabado con una lente de 1.4x (aprox. 4x en pantalla).

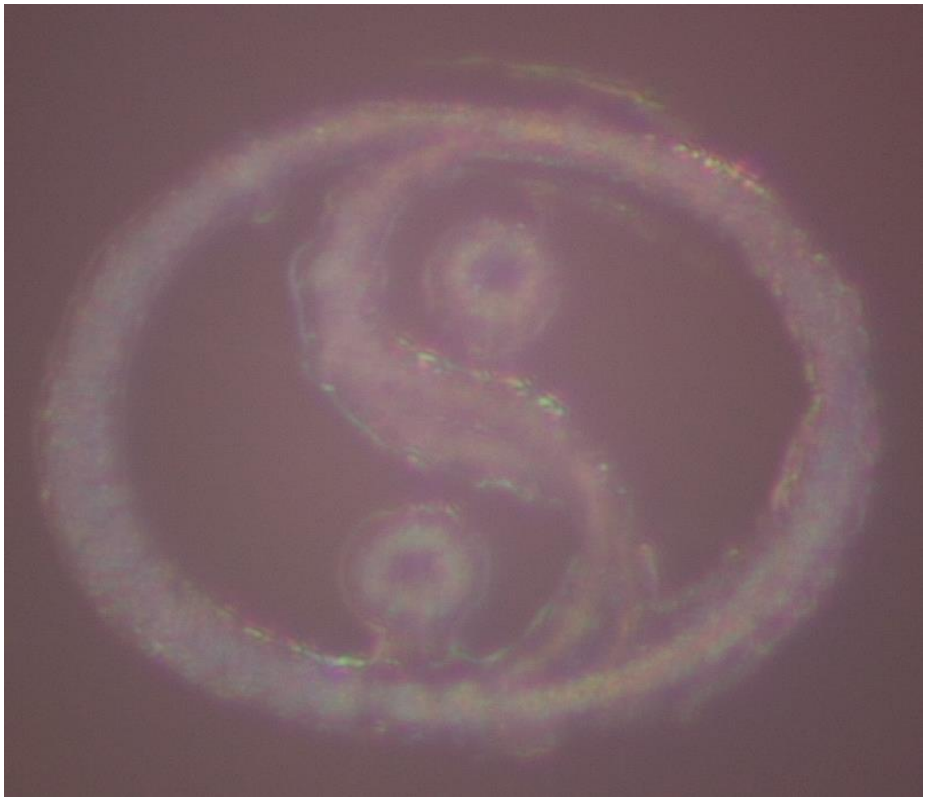


Figura 6.7. Observación del grabado con una lente de 9x (aprox. 60x en pantalla).



Figura 6.8. Observación del grabado con una lente de 40x aprox.

Este resultado corrobora la hipótesis planteada: una incorrecta calibración de los sensores de desplazamiento compromete seriamente la precisión dimensional del sistema, generando errores sistemáticos en el trazado de la geometría. Por lo tanto, se concluye que es indispensable mejorar el proceso de calibración de los sensores para asegurar una reproducción fiel de las geometrías deseadas y una correcta ejecución del proceso de grabado.

6.1.2. Calibración correcta de los sensores de microdesplazamiento

Después de realizar una exhaustiva calibración de los sensores de microdesplazamiento, se procedió a repetir la prueba de grabado empleando la misma metodología descrita. En la Figura 6.6 se presenta una imagen del grabado de una geometría Yin-Yang con un diámetro de 250 µm, realizada sobre un sustrato de FR-4 recubierto con tinta negra. Por otro lado, las Figuras 6.10 y 6.11 muestran dos perspectivas distintas del mismo patrón grabado, pero esta vez sobre una superficie de aluminio, también recubierta con tinta negra.

Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en la precisión del grabado. La forma circular de la geometría Yin-Yang se conserva adecuadamente, evitando la distorsión hacia una geometría ovalada que se había observado en pruebas previas, lo cual confirma la efectividad del proceso de calibración de los sensores.

Cabe destacar que, el grabado sobre FR-4 presenta un mayor número de imperfecciones, lo que puede atribuirse a la susceptibilidad de este material a la corrosión y a su menor uniformidad superficial en comparación con el aluminio. En contraste, el grabado sobre la muestra de aluminio exhibe una mayor definición y regularidad.

En la Figura 6.12 se presenta una comparación del tamaño de la geometría grabada con respecto a un cabello humano, cuyo diámetro promedio es de aproximadamente 40 µm. Esta referencia visual permite dimensionar de forma clara la escala micrométrica del grabado realizado, resaltando la precisión alcanzada en el proceso.

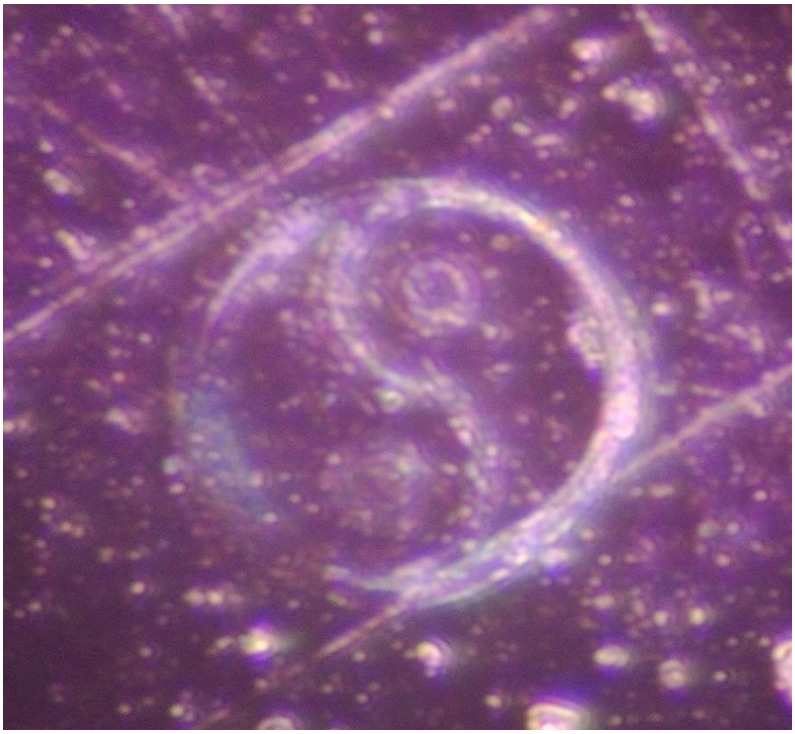


Figura 6.9. Grabado sobre una muestra de FR-4 cubierta con tinta negra.

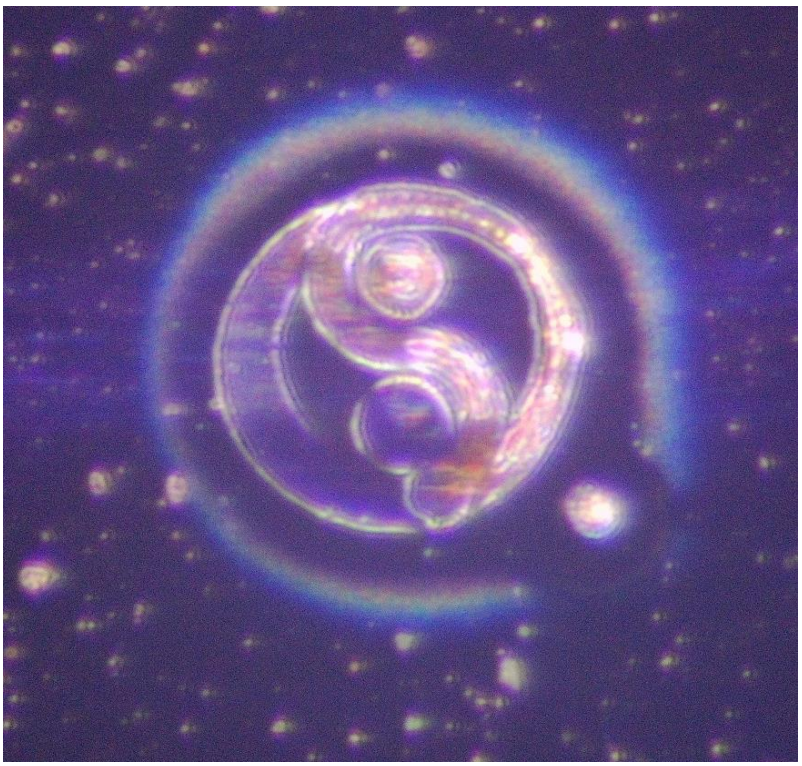


Figura 6.10. Grabado sobre una muestra de aluminio cubierta con tinta negra.

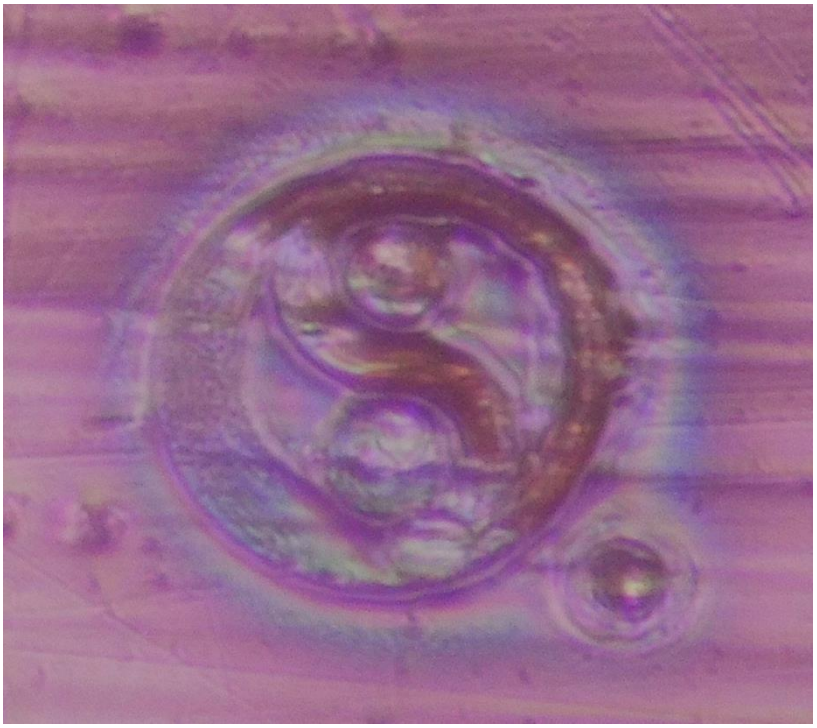


Figura 6.11. Diferente vista de la muestra de aluminio cubierta con tinta negra.

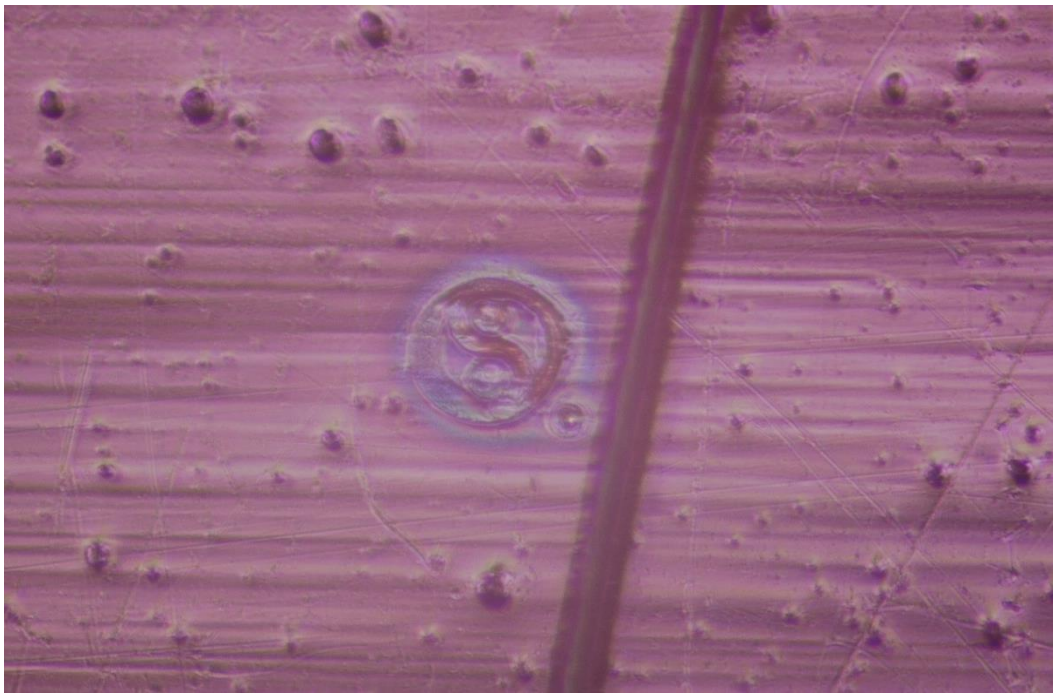


Figura 6.12. Comparación del grabado respecto a un cabello con grosor de aproximadamente 40 µm.

En las Figuras 6.10 y 6.11 se puede observar que una sección de la circunferencia grabada presenta un grosor mayor en comparación con otras zonas. Este efecto se atribuye a una leve inclinación en la superficie de trabajo, lo que provoca una variación en la distancia focal entre el láser y el material. Como resultado, en la región más alejada o cercana al láser, el spot se ensancha, generando un grabado menos preciso y no uniforme. Este inconveniente pone de manifiesto la importancia de una correcta nivelación de la zona de trabajo, o bien, la necesidad de implementar un sistema de enfoque automático que mantenga constante el diámetro del spot a lo largo de todo el proceso de grabado, garantizando una mayor uniformidad y calidad en los resultados.

Con base en el grabado realizado de la geometría Yin-Yang, se confirma la viabilidad de efectuar grabados bidimensionales complejos en un área de hasta 450 µm × 450 µm. Este resultado demuestra que el sistema desarrollado permite una resolución adecuada para representar formas detalladas a microescala.

Sin embargo, los resultados obtenidos también evidencian que la precisión del sistema no alcanza el valor teórico estimado de 0.1 µm. En su lugar, se ha observado que la precisión real del sistema, en condiciones óptimas, se aproxima a 1 µm. Esta discrepancia sugiere la necesidad de mejorar la mecánica del sistema, el control del láser o ambos, para lograr una mayor fidelidad en los desplazamientos.

A partir del análisis de las imágenes obtenidas, se concluye que el sistema posee una funcionalidad de grabado eficiente, lograda mediante la micro CNC de bajo costo de implementación, lo cual representa uno de los objetivos fundamentales del presente prototipo. Además, el diseño del sistema es lo suficientemente flexible para incorporar las funciones de corte y perforado, siempre que se realice una adecuada selección del láser en función del material a procesar.

En este sentido, la funcionalidad de perforación fue evaluada mediante pruebas en una muestra de polietileno con un grosor de 50 µm, utilizando un láser de DVD modelo KWS-200A con una potencia eléctrica de 399 mW. Los resultados, presentados en la Figuras 6.13 y 6.14, muestran que esta potencia fue suficiente para perforar el material. Se concluye que, mediante un ajuste adecuado de la potencia del

láser y una correcta focalización del haz, es posible realizar cortes limpios en este tipo de materiales, lo que valida la realización de esta función.

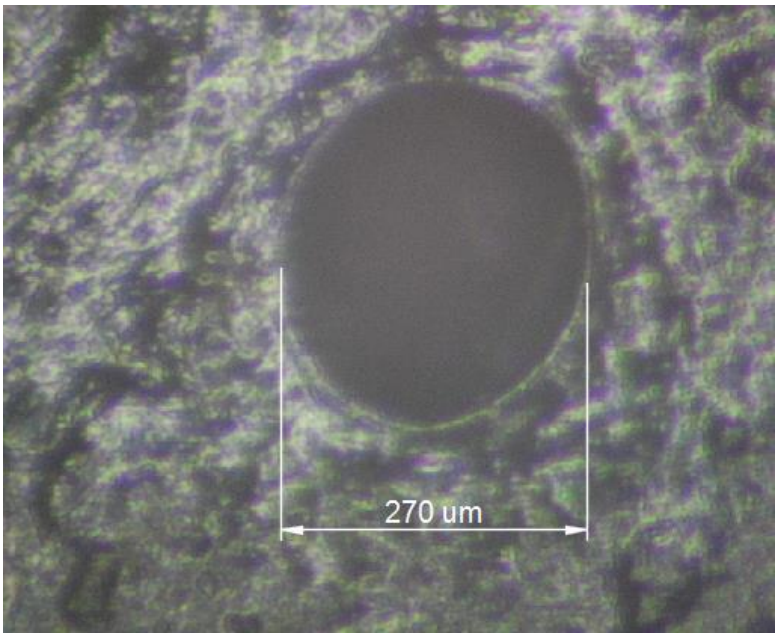


Figura 6.13. Perforación de una muestra de polietileno de grosor aproximado de 50 µm, lograda con una potencia eléctrica del láser de 399 mW.

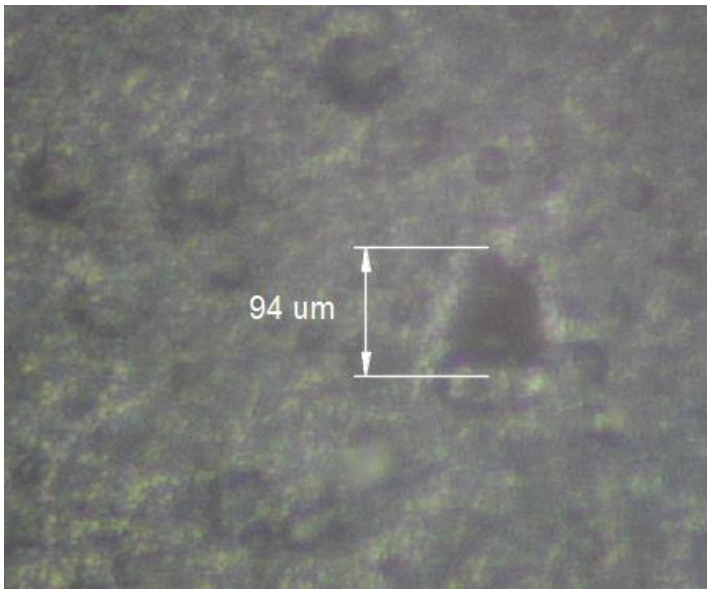


Figura 6.14. Perforación de una muestra de polietileno de grosor aproximado de 50 µm, lograda con una potencia eléctrica del láser de 399 mW. En esta imagen spot del láser logró un enfoque más fino comparado con el mostrado en la Figura 6.13.

6.2. Resultados de las pruebas experimentales de la función de perfilometría superficial

Esta función se implementó utilizando el cabezal óptico de CD modelo SF-P151, el cual se caracteriza por operar a baja potencia óptica (hasta 5 mW) y una longitud de onda de 780 nm. El principio de funcionamiento se basa en la medición de la distancia entre el sensor y un punto sobre la superficie del objeto de estudio. Al realizar un barrido controlado de la muestra, con diferentes incrementos espaciales, es posible generar un mapa tridimensional que representa la topografía de la superficie analizada.

El diseño del sensor de medición ha sido mejorado a partir del trabajo desarrollado por (Ferrara Bello & Tecpoyotl Torres, 2019). En la Figura 6.15 se muestra el prototipo del sensor de microdesplazamiento implementado, el cual forma parte integral del sistema de caracterización superficial propuesto.

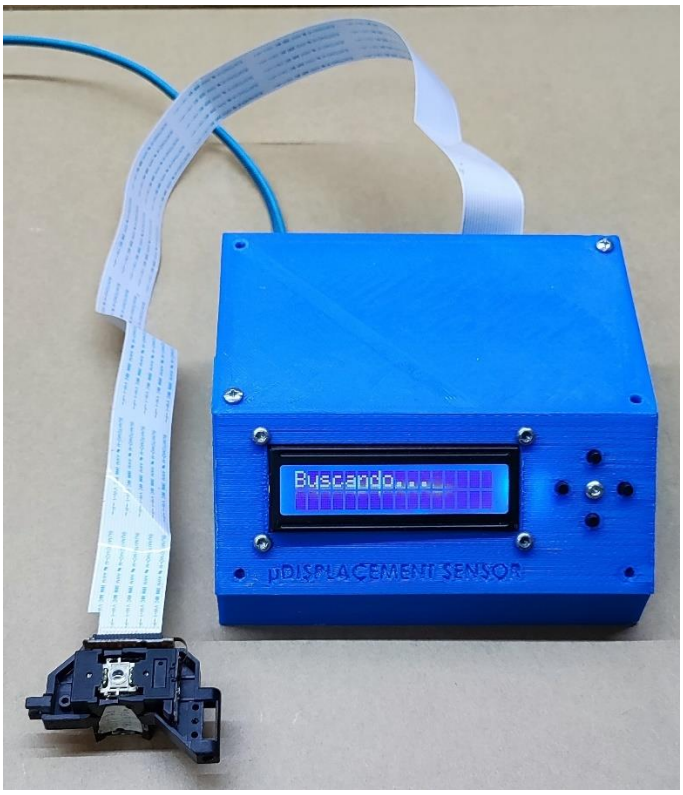


Figura 6.15. Sensor de microdesplazamiento implementado con el Pick-up modelo SF-P151.

En estas pruebas se utilizó una muestra de FR-4 que fue ligeramente pulida utilizando una lija para metales de grano 1500, con el objetivo de reducir irregularidades superficiales y facilitar una medición más precisa, como se muestra en la Figura 6.16. El perfil topográfico obtenido mediante el sistema de medición se presenta en la Figura 6.17, donde se analizó un área de 82 × 82 µm. Los resultados muestran una elevación máxima de 369.4 µm y una mínima de 322.0 µm, lo que corresponde a un rango total de elevación de 47.4 µm.

Es importante destacar que los picos de elevación máxima se concentran en la región posterior del área analizada, específicamente en la coordenada (80, 0) µm, mientras que los valores mínimos de altura se encuentran en la región frontal, en la coordenada (0, 80) µm. Esta distribución topográfica indica la presencia de una pendiente inclinada a lo largo del eje diagonal del área de análisis, lo cual sugiere un desnivel en la superficie de trabajo. Esta misma inclinación fue evidenciada en los resultados de grabado láser, lo que refuerza la conjetura de una desalineación mecánica o un montaje no perfectamente nivelado.

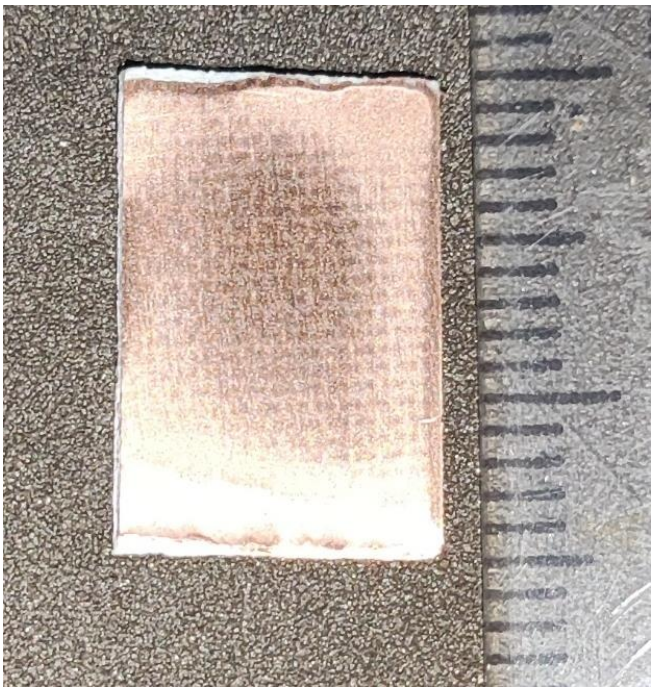


Figura 6.16. Placa de FR-4 pulida con una lija de agua con grano número 1500.

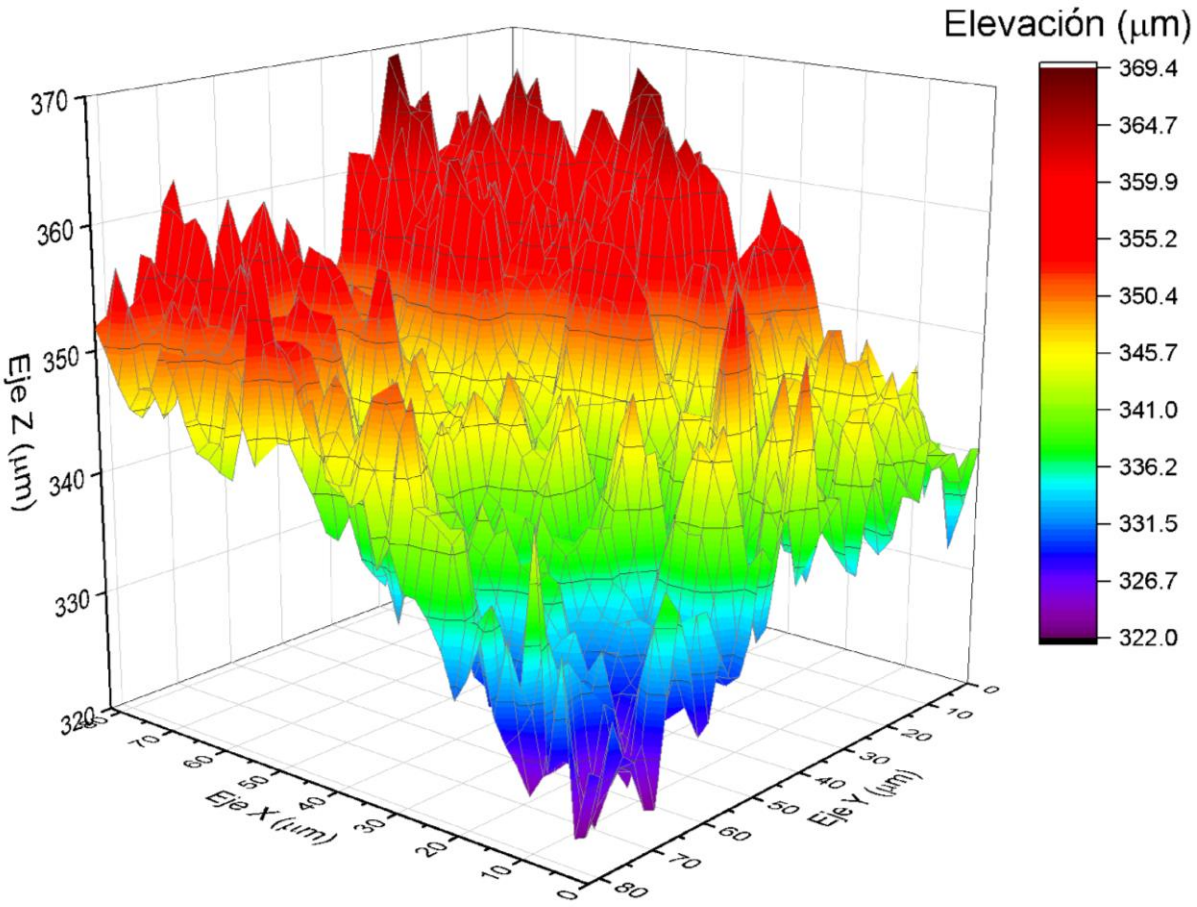


Figura 6.17. Gráfica 3D de los datos registrados de la muestra. El segmento analizado fue de 82 µm x 82 µm con pasos de 2 µm (1681 datos).

En la Figura 6.18, se observa un fragmento de DVD donde se aprecia a simple vista una degradación uniforme. En la Figura 6.19 se muestra el perfilado correspondiente, donde se observa claramente el degradado en las elevaciones laterales, hasta lograr los mínimos en ambos extremos.

En la Figura 6.20 se observa una muestra cuadrada de aluminio de 1cm por lado, a la cual se le realizaron unas rayaduras lineales, mismas que pueden apreciarse claramente en el perfilado mostrado en la Figura 6.18. El pico máximo tiene una elevación de 584 µm. En la Figura 6.18 se muestra un fragmento de DVD en el cual se aprecia, a simple vista, una degradación superficial uniforme. El perfil topográfico correspondiente, obtenido mediante el sistema de medición, se presenta en la Figura

6.19, donde se observa claramente un descenso gradual en las elevaciones laterales, alcanzando los valores mínimos en ambos extremos. Esta forma de degradado sugiere un desgaste simétrico o una deformación generada durante el uso o la manipulación del DVD.

Por otro lado, en la Figura 6.20 se presenta una muestra cuadrada de aluminio con dimensiones de 1 cm por lado, a la cual se le realizaron rayaduras superficiales lineales de forma controlada. Estas rayaduras pueden identificarse claramente en el perfilado mostrado en la Figura 6.21, donde se observa un pico de elevación máxima de 584 µm.

Cabe aclarar que, los valores obtenidos en el perfilado están invertidos respecto a la geometría real de la muestra, es decir, los picos que aparecen como elevaciones en la gráfica corresponden en realidad a zonas profundas en el material. Esta inversión se debe a que el sistema de medición calcula la distancia entre el láser y la superficie de la muestra, por lo que, una mayor profundidad se interpreta como una mayor distancia. Esto es, se representa como un valor más alto en el perfilado.

Este comportamiento debe ser considerado al interpretar los resultados, ya que, aunque permite confirmar la correcta detección de las rayaduras, requiere un ajuste conceptual para representar fielmente la topografía real. La solución a esta inversión consiste en modificar la forma en que el sensor registra los valores de desplazamiento, de modo que un acercamiento del láser a la superficie se traduzca en un incremento en los valores registrados, y un alejamiento se interprete como una disminución. Esta simple inversión en la lógica de registro permite que los datos obtenidos representen de manera intuitiva la relación directa entre elevación física y valor medido, facilitando la interpretación visual.

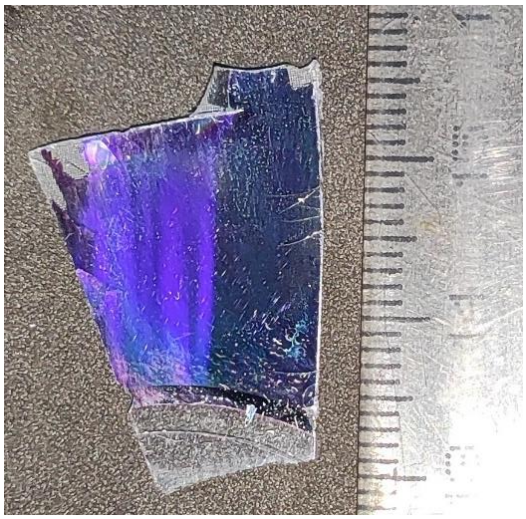


Figura 6.18. Trozo de un disco DVD.

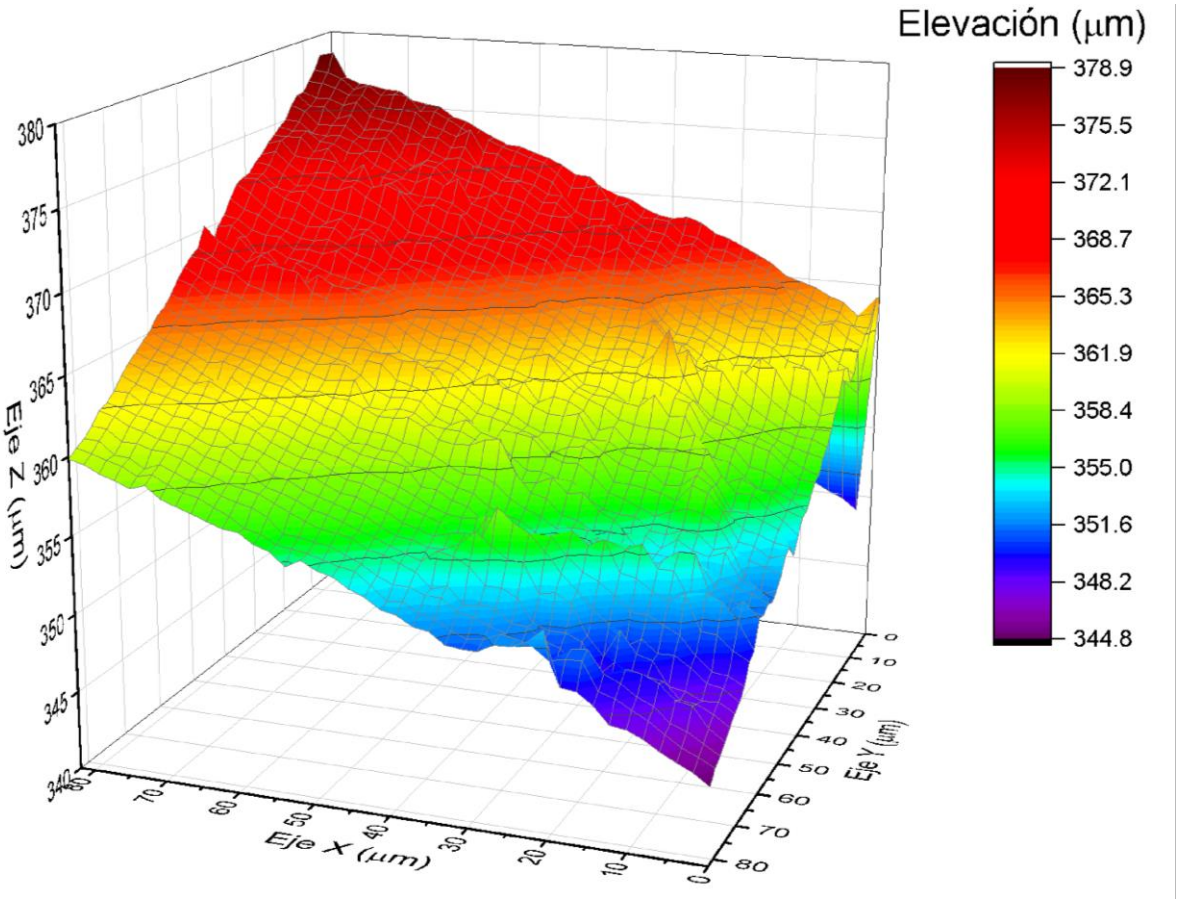


Figura 6.19. Gráfica 3D de los datos registrados de la muestra. El segmento escaneado fue de 82 µm x 82 µm, con pasos de 2 µm (1681 datos).

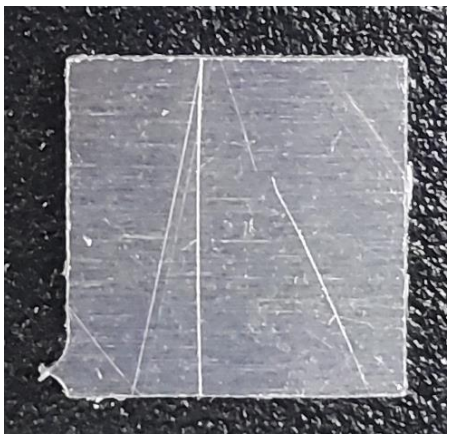


Figura 6.20. Cuadro de aluminio de 1 cm por lado.

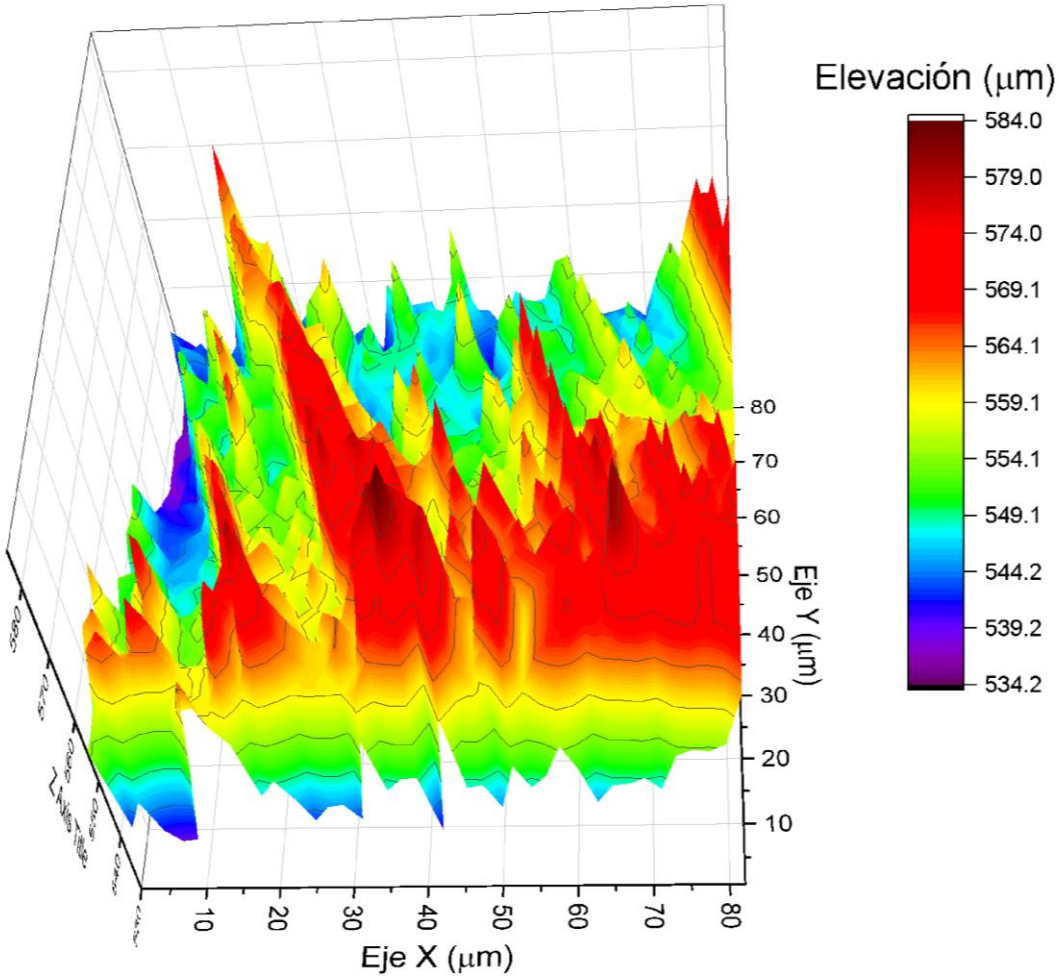


Figura 6.21. Mapa de elevación de las rayaduras de aluminio. Área de escaneo de 82 µm x 82 µm, las mediciones se realizaron con un barrido en ambos ejes con incrementos de 2 µm. Nota: Recuerde que la manera correcta de interpretar a los resultados es una inversión.

En la Figura 6.22 se presenta una muestra de silicio que contiene una rejilla de ranuras rectilíneas grabadas mediante DRIE (Deep Reactive Ion Etching). En dicha imagen se identifican claramente tres patrones distintos de grupos de rejillas, los cuales difieren en dimensiones. El perfil topográfico correspondiente a una sección de 200 × 200 µm, obtenido con un paso de escaneo de 5 µm, se muestra en la Figura 6.23. En este perfilado se aprecian con claridad las elevaciones y valles que corresponden a cada una de las rejillas grabadas.

Adicionalmente, en la Figura 6.24 se presentan las líneas de contorno generadas a partir del mismo conjunto de datos, las cuales permiten identificar con mayor precisión las magnitudes relativas de elevación en la muestra.

Estos resultados demuestran la capacidad del sistema para detectar, con precisión de pasos de escaneo de hasta 1 µm, variaciones topográficas en diferentes muestras, lo que valida su aplicación en el análisis detallado de superficies. Esta capacidad permite analizar con alta resolución los patrones complejos generados por procesos de fabricación como el grabado DRIE, confirmando que el sistema es adecuado para caracterizar superficies con niveles de detalle a microescala.

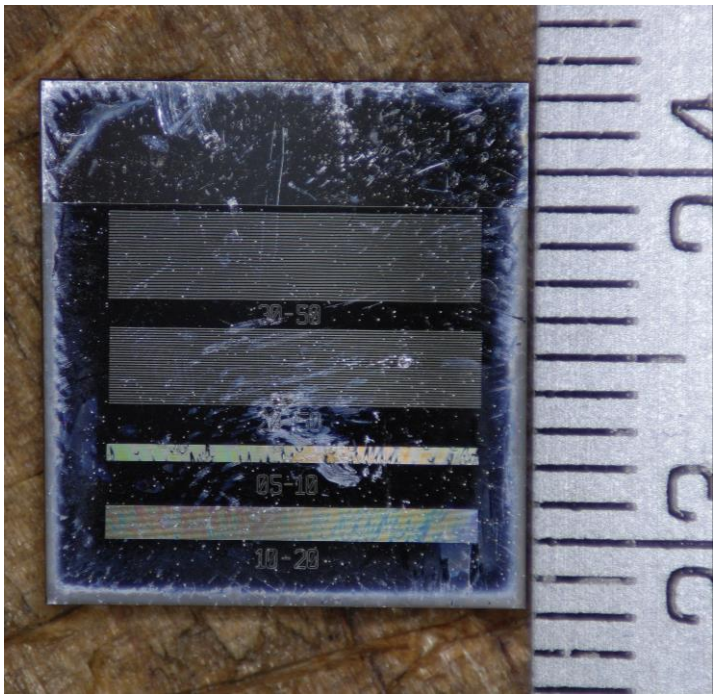


Figura 6.22. Muestra de Silicio con una rejilla de ranuras grabadas con DRIE.

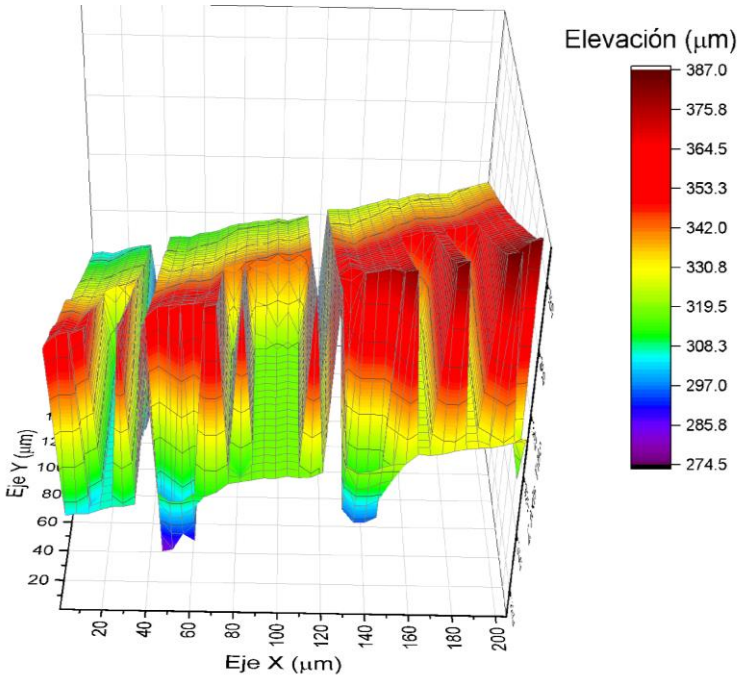


Figura 6.23. Gráfica 3D de las ranuras grabadas. Área de escaneo de 200 µm x 200 µm, las mediciones se realizaron con un barrido en ambos ejes con incrementos de 5 µm.

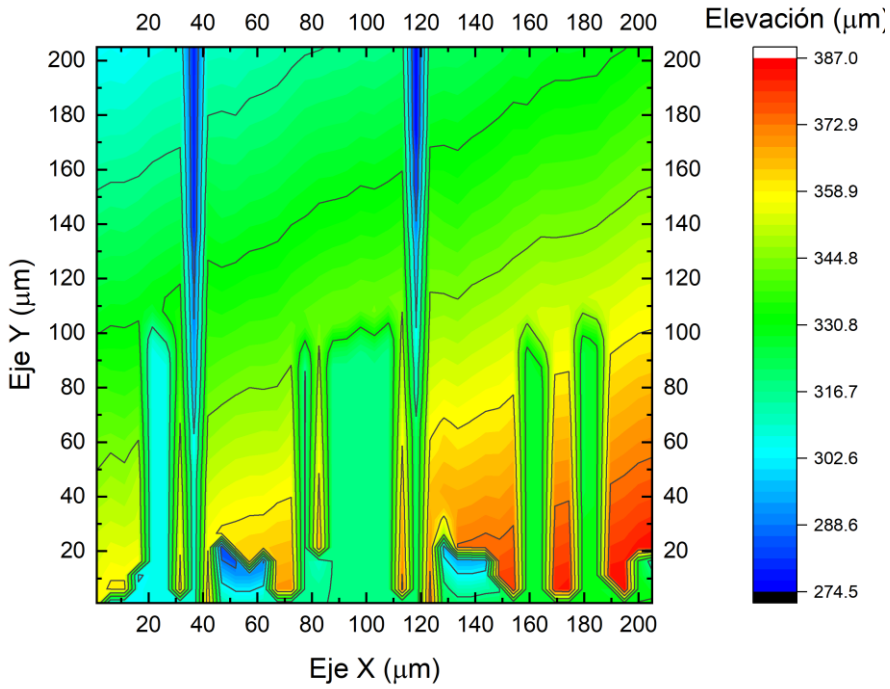


Figura 6.24. Vista de los contornos del mapa de elevación de la muestra de Silicio.

6.3. Resultados de las pruebas experimentales de la función de microscopia digital

Finalmente, se presentan los resultados de las pruebas de la función de microscopía digital. El principio de funcionamiento se basa en la medición de la señal reflejada desde un punto sobre la superficie de la muestra. Este tipo de sensor genera una señal en forma de curva S, conocida como señal de error de enfoque (SFE), en la cual, cuando la distancia de enfoque se aproxima al mínimo diámetro del spot, se alcanza el punto óptimo de enfoque. A medida que el enfoque se aleja del punto ideal, la forma de la señal cambia, como se muestra en la Figura 6.26. Esta señal se obtuvo al realizar la prueba sobre una superficie altamente reflectante, como la de un disco de una unidad de almacenamiento HDD, el cual se muestra en la Figura 6.25.

En contraste, materiales como FR-4, presentado en la Figura 6.27, genera una señal de menor intensidad, como se puede observar en la Figura 6.28.

Con este principio, es posible interpretar zonas oscuras con menor intensidad y superficies claras con mayor intensidad, lo que permite formar imágenes básicas al realizar un barrido sobre la muestra.



Figura 6.25. Material altamente reflectante recuperado de un disco HDD.

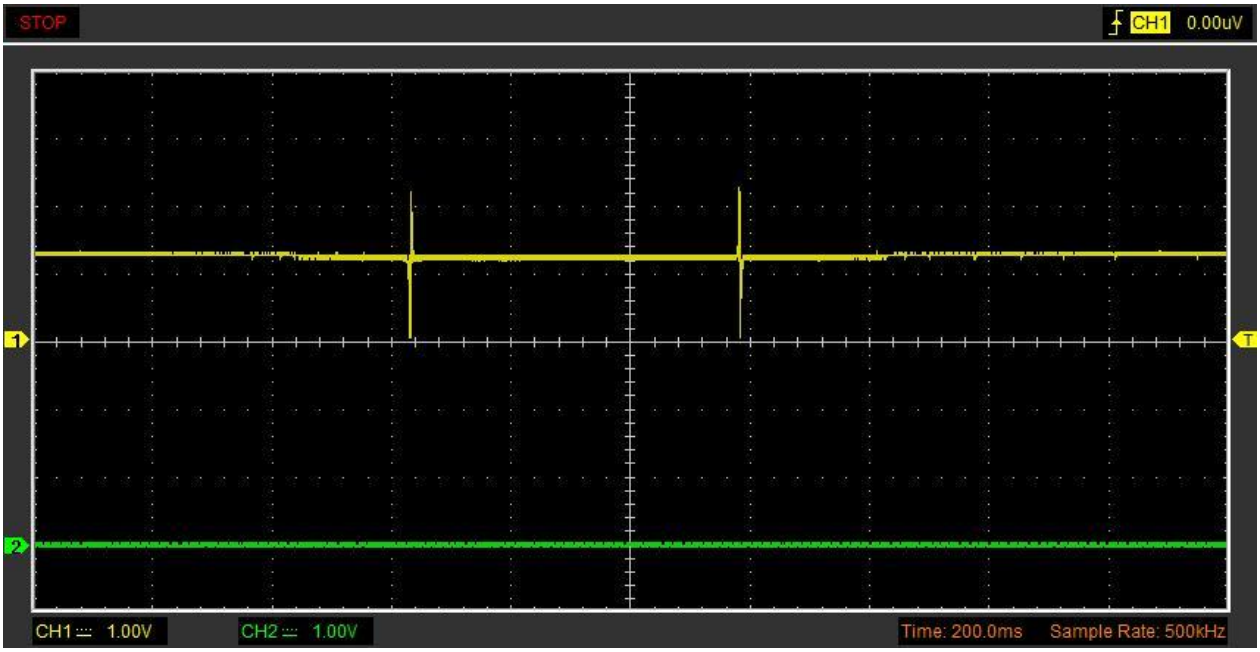


Figura 6.26. Señal de error de enfoque SFE obtenida con el material altamente reflectante.

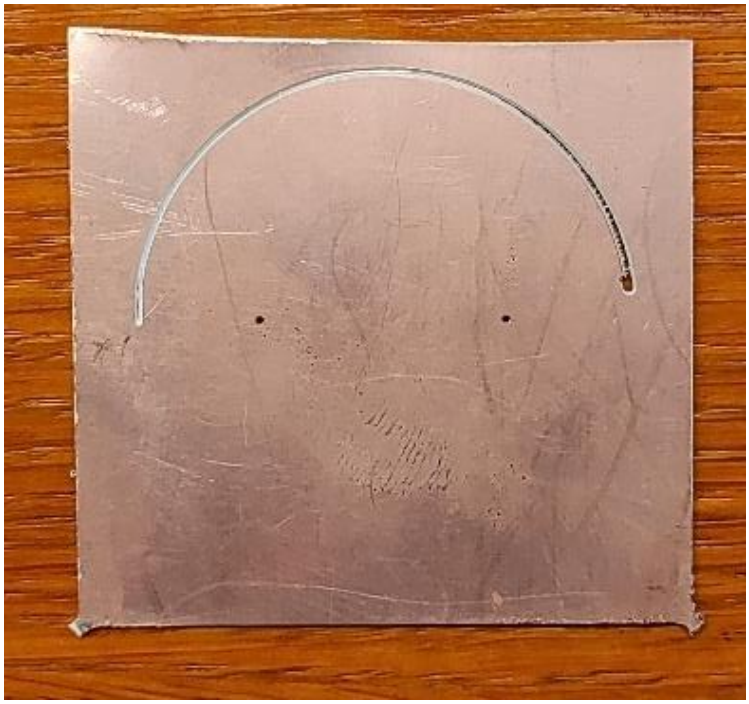


Figura 6.27. Muestra de FR-4, parcialmente reflectante.

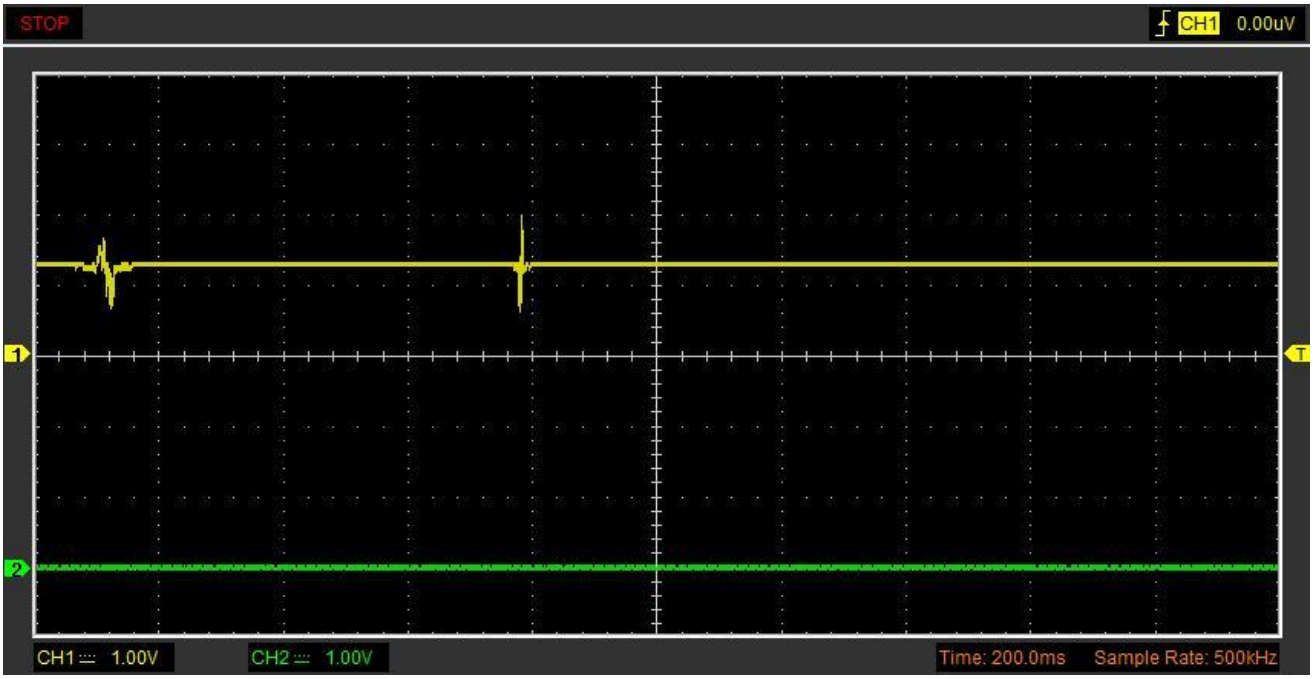


Figura 6.28. Señal de error de enfoque SFE obtenida con el material parcialmente reflectante.

La primera muestra analizada fue un segmento de FR-4, utilizado como sustrato, recubierto con una capa de soldadura en pasta. Esta pasta está compuesta por esferas de estaño y un agente químico (Flux) que facilita la soladura del material. La pasta de soldadura fue ideal para las pruebas, ya que presenta zonas oscuras, correspondientes al Flux, y zonas claras, correspondientes a las esferas de estaño. En la Figura 6.29 se puede observar claramente la muestra cubierta por la pasta de soldadura.

La Figura 6.30 muestra el resultado de la captura realizada con el microscopio experimental, parte de la máquina desarrollada en este trabajo, donde se pueden distinguir claramente las esferas de estaño, cuya distribución varía en diámetro desde aproximadamente 10 µm hasta 20 µm. En la Figura 6.31, se presenta una imagen de la soldadura en pasta observada mediante un microscopio digital industrial. Al comparar visualmente las imágenes obtenidas con los datos del Pick-up, se puede concluir que la distribución del material en las imágenes coincide con la distribución real observada, lo que valida la precisión del método experimental empleado.

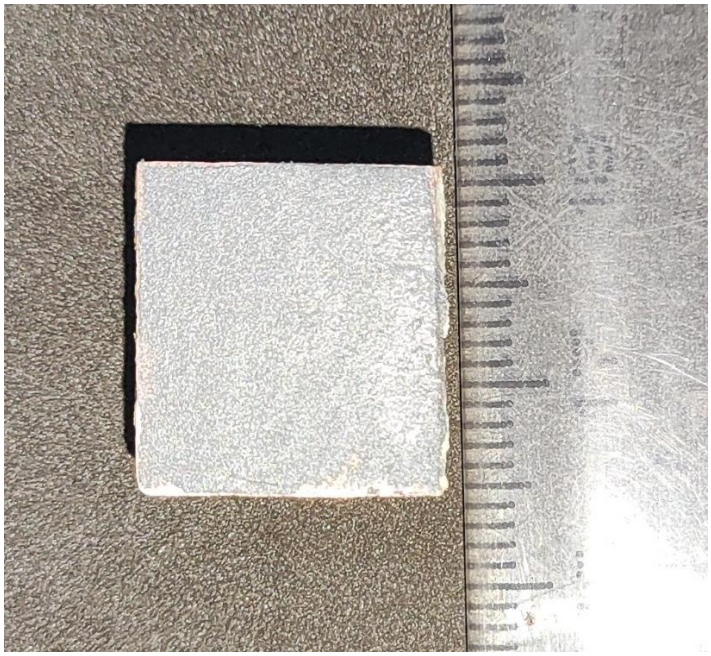


Figura 6.29. Placa FR-4 cubierta de soldadura en pasta.

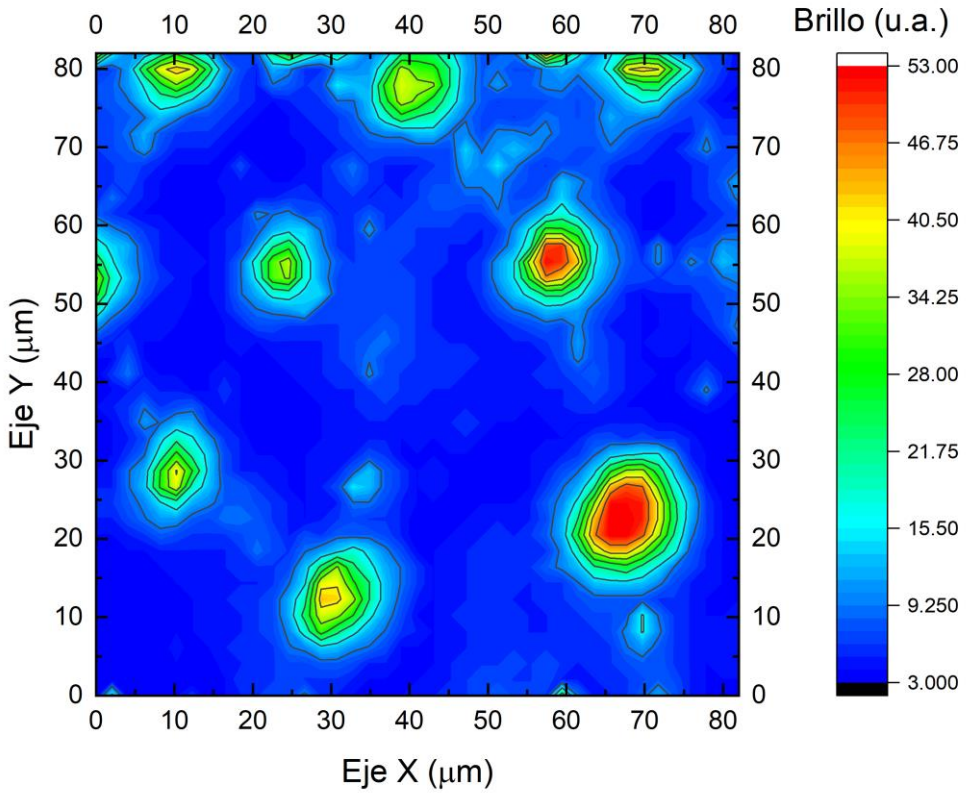


Figura 6.30. SFE en diferentes puntos de una sección de 82 µm x 82 µm. El barrido de desplazamiento se realizó con pasos de 2 µm (1681 datos).

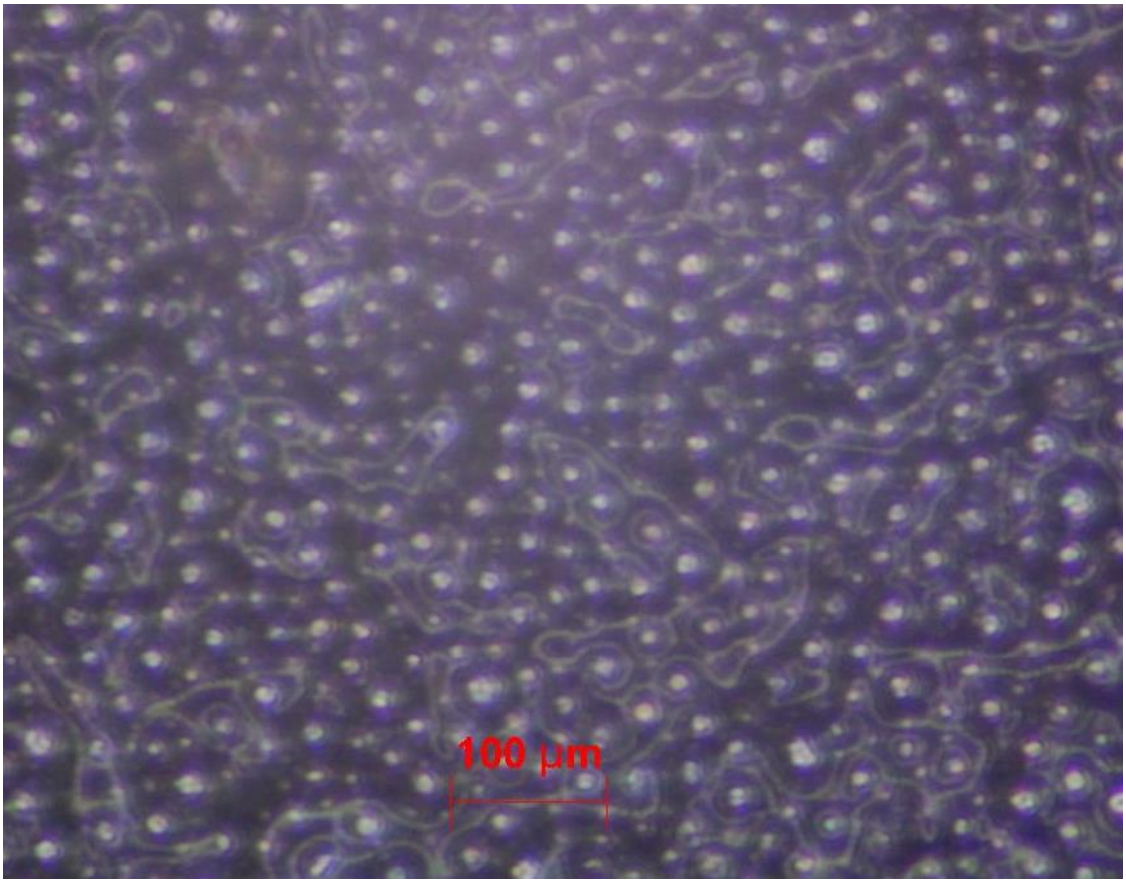


Figura 6.31. Imagen capturada de la soldadura en pasta por un microscopio industrial.

La segunda muestra analizada correspondió a un fragmento de un disco compacto (CD), en el cual la información está codificada mediante un patrón de puntos de distintas tonalidades que representan los datos digitales. En la Figura 6.32 se muestra la imagen de la muestra utilizada, mientras que en la Figura 6.33 se presentan los resultados obtenidos.

En la Figura 6.33 es posible distinguir claramente los puntos que conforman el patrón de codificación del CD. Sin embargo, debido al estado físico deteriorado del disco, se pueden observar zonas con numerosos defectos.

Posteriormente, se realizó un segundo análisis con un incremento en la resolución, ajustando el paso de escaneo a 1 µm. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 6.34. Gracias al aumento en la resolución, se logró visualizar con mayor detalle a los patrones de información grabados en el CD, lo que permitió una mejor interpretación de su estructura.

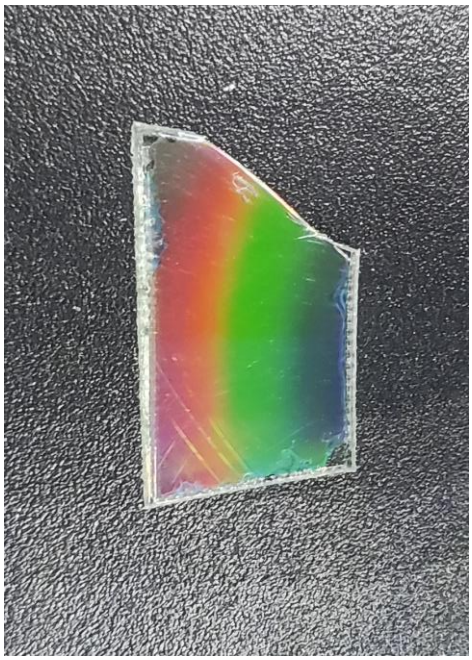


Figura 6.32. Trozo de CD.

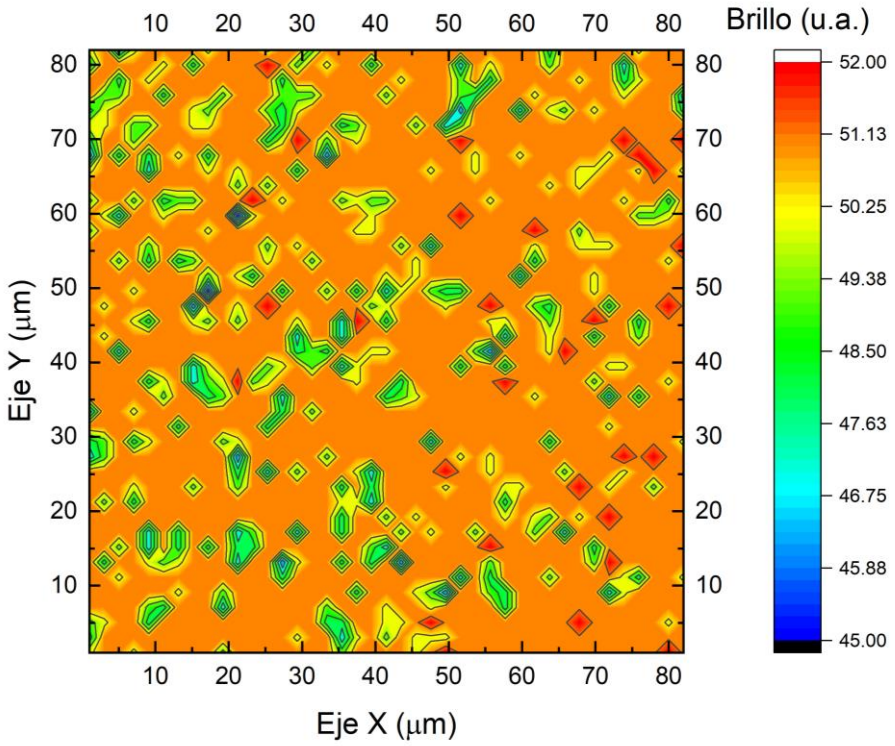


Figura 6.33. Escaneo de imagen en un área 82 µm x 82 µm. Incremento de desplazamiento de 2 µm.

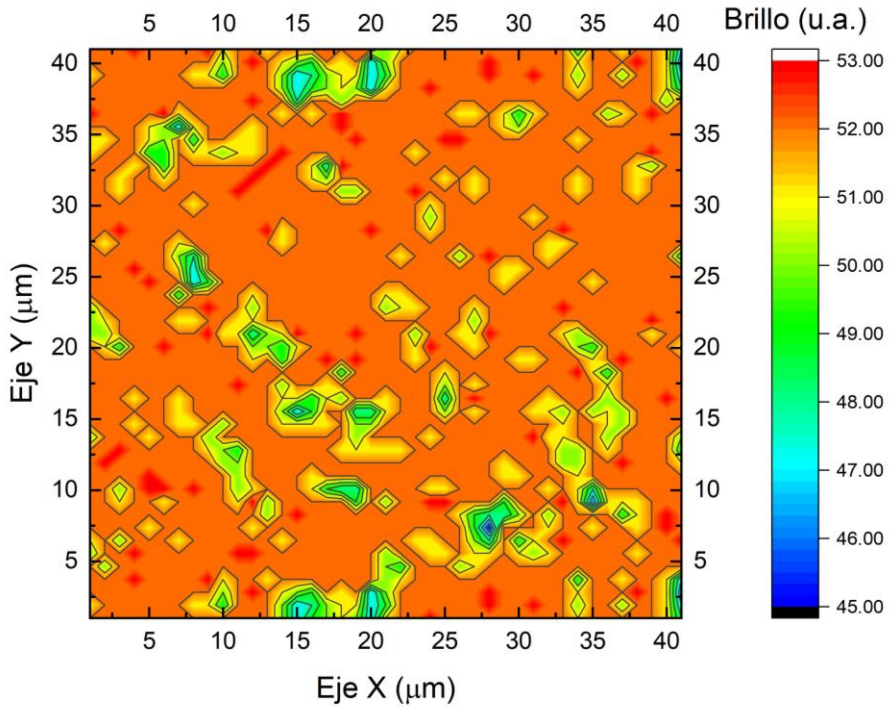


Figura 6.34. Escaneo de imagen en un área 41 µm x 41 µm. Incremento de desplazamiento de 1 µm.

Estos resultados demuestran la capacidad y precisión del equipo utilizado para realizar análisis a nivel microscópico en diferentes tipos de superficies, incluso en aquellas altamente reflectantes, las cuales suelen representar un desafío para los equipos convencionales debido a las dificultades de enfoque y los problemas de saturación durante la captación de imágenes.

Adicionalmente, se concluye que el sistema de lazo cerrado analógico, implementado mediante amplificadores operacionales, superó en desempeño al sistema digital equivalente. Esta configuración permitió alcanzar una mayor velocidad de desplazamiento, llegando hasta los 300 µm/min, sin pérdidas de posición. Se logró un movimiento constante y uniforme en ambos ejes, lo cual es fundamental para garantizar la precisión en los procesos. Esta mejora también contribuyó a minimizar el efecto de eje cruzado, fenómeno causado por el diseño asimétrico de la plataforma de desplazamiento, asegurando una mayor estabilidad y repetibilidad en los movimientos.

Conclusiones

En este capítulo se exponen las conclusiones y los principales logros derivados del análisis de los resultados obtenidos.

Se proponen, además, posibles mejoras al diseño y funcionamiento del sistema, así como líneas de trabajo futuro que podrían potenciar su desempeño y aplicabilidad.

Finalmente, se incluye una tabla con el desglose de los elementos que inciden en el costo de implementación total del prototipo, con el fin de proporcionar una visión clara sobre su viabilidad económica y su potencial de replicabilidad en entornos de recursos limitados.

7. Conclusiones

En esta tesis doctoral se desarrolló una máquina multifuncional con operaciones micrométricas, capaz de realizar operaciones de grabado, corte, perfilado y escaneo con alta precisión.

Este trabajo enfrentó múltiples desafíos técnicos, entre ellos:

- Construir una máquina de alta precisión empleando en su mayoría dispositivos reciclados.
- Diseñar un sistema con una rápida capacidad de respuesta.
- Implementar una plataforma de microdesplazamiento confiable en coordenadas XYZ.
- Demostrar experimentalmente la funcionalidad adecuada de cada una de las operaciones mencionadas.

Por lo que, el objetivo general se estableció como:

Diseñar e implementar una máquina para operaciones de grabado, corte, perfilado y escaneo de piezas micrométricas en un sistema de coordenadas de tres ejes (XYZ), empleando mecanismos flexibles en su estructura y actuadores piezoeléctricos accionados por un control numérico computarizado.

Este objetivo fue cumplido en su totalidad, generándose las siguientes conclusiones:

1. La plataforma de desplazamiento de geometría asimétrica presentó ligeras desviaciones en los ejes X e Y. Éstas fueron compensadas mediante ajustes en la etapa de control, resaltando la necesidad de un sistema de control robusto y adaptable.

2. Los novedosos actuadores piezoeléctricos tipo stack, diseñados y fabricados artesanalmente, mostraron variaciones en el desplazamiento

generado, debido a su proceso de fabricación manual. Esto refuerza la importancia de contar con una etapa de control eficaz para garantizar la repetibilidad y precisión del sistema.

3. El láser utilizado fue recuperado de una unidad óptica de DVD. El diámetro del spot, de 530 nm, establece un límite físico en la resolución alcanzable, la cual puede lograse mediante un correcto enfoque del spot del láser. En este caso se logró alcanzar el enfoque del spot con un diámetro de 30 μm, debido a que se realizó de manera manual. Cabe señalar que, la información técnica con relación a este proceso no está disponible.

4. El sistema de control electrónico fue capaz de suministrar voltajes de 0 a 150 VDC, con una velocidad de conversión que permite alcanzar frecuencias de 100 Hz sin deformar a la señal de entrada, debido al diseño e implementación de una fuente lineal.

5. Se integró exitosamente un sensor comercial de alta precisión con una sensibilidad observada de hasta 20 nm.

6. La resolución de los movimientos de la máquina es de 1 μm, con un error mínimo de 0.85%. Lo cual, fue logrado con el uso del sistema de control digital.

7. Se diseñaron y evaluaron dos configuraciones de control:
    - Sistema de lazo cerrado digital: Presentó limitaciones por latencia en los módulos ADC y el controlador inicial. Sin embargo, permitió identificar mejoras clave en el diseño.
    - Sistema de lazo cerrado analógico: Eliminó problemas de latencia, permitiendo una resolución real de aproximadamente 1 μm, como se documenta en el capítulo 6.

8. En la función de perfilometría, la máquina fue capaz de escanear superficies y generar representaciones 3D que coinciden con la topografía real.

9. En cuanto a la función de microscopía digital, se demostró una resolución de 1 µm, inherente al spot del láser. La comparación con imágenes obtenidas de un microscopio digital industrial corroboró la confiabilidad de los resultados. El uso potencial de módulos con longitud de onda de 405 nm sugiere una expansión viable para futuras aplicaciones.

10. Se evaluaron distintos materiales para la fabricación de la plataforma de desplazamiento, entre ellos PETG, PLA y ABS. Tras comparar tanto el desempeño, como las propiedades mecánicas de cada material, se concluyó que el PETG es el más adecuado. Este material presentó un alejamiento en la simetría de sólo 1.51 %, y fue el segundo en lograr el mayor desplazamiento. Aunque el ABS alcanzó el mayor desplazamiento entre los tres, mostró un alejamiento en la simetría significativamente mayor, con un valor de 3.92 %, lo cual compromete la precisión y el comportamiento simétrico del microposicionador.

11. La máquina logró realizar grabados complejos en 2D sobre un espacio de trabajo de 450 × 450 µm, con pasos de 0.1 µm. Un ejemplo notable fue el grabado de la geometría Yin-Yang con un diámetro externo de 250 µm y con diámetros de los círculos internos de 25 µm.

12. Para lograr esta precisión y realizar grabados complejos fue esencial implementar un control de lazo cerrado eficiente. Las mejoras en el sistema de control incrementaron significativamente la velocidad de respuesta de la plataforma de trabajo.

13. El prototipo desarrollado posee un alto potencial de aplicación en múltiples áreas de la ciencia y la tecnología. Además, la experiencia adquirida permite considerar adaptaciones que conduzcan al desarrollo de nuevas

159

máquinas, como sistemas de microimpresión 3D en resina, o plataformas de precisión semiautomáticas para microscopía óptica.

14. En cuanto al costo de implementación, en la Tabla 7.1 se presentan los componentes que integran a la máquina, obteniéndose un total de aproximadamente 10,000 MXN. En trabajos futuros se proyecta el desarrollo de sensores de diseño propio con características similares, lo que permitiría reducir el costo total de la máquina en al menos un 50 %, aumentando así su viabilidad para la comercialización.

15. Considerando que se alcanzaron resultados con un nivel de precisión del orden de 1 µm, a pesar de la asimetría de la plataforma de microdesplazamiento que generó el efecto de eje cruzado, se puede inferir que la implementación de una plataforma simétrica, libre de dicho efecto, permitiría obtener desempeños aún más precisos. Esto sugiere que futuras mejoras en el diseño estructural podrían optimizar significativamente la precisión y el rendimiento del sistema.

Tabla 7.1. Costo del prototipo.

Material	Precio en MXN pesos
Sensores de microdesplazamiento	$ 6,000.00
Componentes electrónicos	$ 2,000.00
Plataforma de microdesplazamiento	$ 600.00
Material para la estructura	$ 1,000.00
Lectores Pick-up	$ 600.00
Total	**$ 10,200.00**

En síntesis, esta tesis no sólo demuestra la viabilidad técnica de una máquina micrométrica multifuncional desarrollada con recursos limitados, sino que también propone una arquitectura adaptable, replicable y escalable para futuras investigaciones. La integración coordinada del diseño mecánico, control electrónico, procesamiento de señales y validación experimental aporta al estado del arte en sistemas de microfabricación un prototipo de precisión en una escala en la que no se hallaron maquinas comerciales similares, abriendo nuevas posibilidades para la innovación tecnológica desde un enfoque sustentable y accesible.

BIBLIOGRAFÍA

Ali, S. M., & Mohsin, H. (2021). Design and Fabrication of 3-Axes Mini CNC Milling Machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1094*(1), 012005. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1094/1/012005

Al-Jodah, A., Shirinzadeh, B., Ghafarian, M., Das, T. K., & Pinskier, J. (2021). Design, modeling, and control of a large range 3-DOF micropositioning stage. *Mechanism and Machine Theory*, *156*, 104159. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104159

Asua, E., García-Arribas, A., & Etxebarria, V. (2008). Micropositioning using shape memory alloy actuators. *European Physical Journal: Special Topics*, *158*(1), 231–236. https://doi.org/10.1140/epjst/e2008-00680-4

Berkovic, G., & Shafir, E. (2012). Optical methods for distance and displacement measurements. *Advances in Optics and Photonics*, *4*(4), 441. https://doi.org/10.1364/AOP.4.000441

Bonet Gil, E. (2018). State of the Art of Canal Control Algorithms. In *Experimental Design and Verification of a Centralized Controller for Irrigation Canals* (pp. 17–34). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-307-3.50002-1

Boonmee, C., Kositanont, C., & Leejarkpai, T. (2016). Degradation of Poly (lactic acid) under Simulated Landfill Conditions. *Environment and Natural Resources Journal*, *14*(2), 1–9. https://doi.org/10.14456/ennrj.2016.8

C. Kuo, B. (1996). *Sistemas de Control Automático* (7° Edición). Prentice Hall Hispanoamericana.

Chen, B. M., Lee, T. H., Hang, C. C., Guo, Y., & Weerasooriya, S. (1999). An H ∞ almost disturbance decoupling robust controller design for a piezoelectric bimorph actuator with hysteresis. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *7*(2), 160–174. https://doi.org/10.1109/87.748143

Chinmay Vilas Samak et al., , Chinmay Vilas Samak et al.,. (2018). Design of a Two-Wheel Self-Balancing Robot with the Implementation of a Novel State Feedback for PID Controller using On-Board State Estimation Algorithm. *International Journal of Robotics Research and Development*, *8*(2), 1–10. https://doi.org/10.24247/ijrrddec20181

demaquinasyherramientas. (2015, March 7). *¿Qué tener en cuenta al elegir una Fresadora?*

Derammelaere, S., Verbelen, F., & Stockman, K. (2014). Open loop control of a stepping motor with step loss detection and stall detection using back-EMF based load angle estimation. *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 788–793. https://doi.org/10.1109/AIM.2014.6878175

Dhaliwal, G. S., & Dundar, M. A. (2020). Four Point Flexural Response of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene. *Journal of Composites Science*, *4*(2), 63. https://doi.org/10.3390/jcs4020063

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de Control Moderno* (10° Edición). Pearson Educación, S.A.

Editors -Ron Pethig, S., & Dante Espinosa, H. (2008). *MICRO-CUTTING Microsystem and Nanotechnology Series*.

Ferrara Bello, C. A., & Tecpoyotl Torres, M. (2019). *DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA MICROPINZA DE BAJO COSTO, BASADA EN UN ARREGLO DE ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS*. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS.

Fleming, A. J. (2013). A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance. *Sensors and Actuators A: Physical*, *190*, 106–126. https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.016

Gan, J., Zhang, X., Li, H., & Wu, H. (2017). Full closed-loop controls of micro/nano positioning system with nonlinear hysteresis using micro-vision system. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *257*, 125–133. https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.02.013

Gao, J., Zeng, Z., Tang, H., Chen, X., Qiu, Q., He, S., He, Y., & Yang, Z. (2016). Design and assessment of a piezo-actuated 3-DOF flexible nanopositioner with large stroke. *IEEE 3M-NANO 2016 - 6th IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*, *1563000740*, 19–24. https://doi.org/10.1109/3M-NANO.2016.7824922

García Breijo, E. (2008). *Compilador C CSS Y Simulador Proteus Para Microcontroladores PIC*. Alfaomega Grupo Editorial, S.A.

García Jaimes, L. E. (2009). *Control Digital Teoría y Practica* (Segunda Edición).

Gonçalves de Moura, I., Vasconcelos de Sá, A., Lemos Machado Abreu, A. S., & Alves Machado, A. V. (2017). Bioplastics from agro-wastes for food packaging applications. In *Food Packaging* (pp. 223–263). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804302-8.00007-8

Grupo XDS. (2016). *PETG Ficha Técnica* (p. 2). http://www.grupoxds.com/wp-content/uploads/2016/12/PETG.pdf

Guilleus, Q., Leroy, E., Eck, L., & Hafez, M. (2017). A compact design for ultra-sonic piezoelectric motor with embedded strain wave reducer for high torque applications. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS*. https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2017.8092565

Guo, Z., Tian, Y., Liu, C., Wang, F., Liu, X., Shirinzadeh, B., & Zhang, D. (2015). Design and control methodology of a 3-DOF flexure-based mechanism for micro/nano-positioning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *32*, 93–105. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.10.003

Hwu, E. Te, Hung, S. K., Yang, C. W., Huang, K. Y., & Hwang, I. S. (2008). Real-time detection of linear and angular displacements with a modified DVD optical head. *Nanotechnology*, *19*(11). https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/11/115501

Jamil, A. A., Tu, W. F., Ali, S. W., Terriche, Y., & Guerrero, J. M. (2022). Fractional-Order PID Controllers for Temperature Control: A Review. *Energies*, *15*(10), 3800. https://doi.org/10.3390/en15103800

Kaajakari, V. (2009). *Practical MEMS* (Illustrated). Small Gear Publishing.

Kaçar, A., Özer, M. B., & Taşcioğlu, Y. (2020). A novel artificial pancreas: Energy efficient valveless piezoelectric actuated closed-loop insulin pump for T1DM. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(15), 1–18. https://doi.org/10.3390/APP10155294

Kenton, B. J., & Leang, K. K. (2012). Design and control of a three-axis serial-kinematic high-bandwidth nanopositioner. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *17*(2), 356–369. https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2105499

Khan, M. U., Prelle, C., Lamarque, F., & Büttgenbach, S. (2017). Design and Assessment of a Micropositioning System Driven by Electromagnetic Actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *22*(1), 551–560. https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2613548

Kim, J., Kim, K., Choe, S. H., & Choi, H. (2020). Development of an accurate resonant frequency controlled wire ultrasound surgical instrument. *Sensors (Switzerland)*, *20*(11), 13–15. https://doi.org/10.3390/s20113059

Krar, S., & Gill, A. (n.d.). *COMPUTER NUMERICAL CONTROL PROGRAMMING BASICS A Primer for the SkillsUSA/VICA Championships Computer Numerical Control Programming Basics*.

Kula, K. S. (2024). Tuning a PI/PID Controller with Direct Synthesis to Obtain a Non-Oscillatory Response of Time-Delayed Systems. *Applied Sciences*, *14*(13), 5468. https://doi.org/10.3390/app14135468

Lee, S. H. (2015). Note: Compact and light displacement sensor for a precision measurement system in large motion. *Review of Scientific Instruments*, *86*(8), 1–4. https://doi.org/10.1063/1.4928528

Lee, S. H. (2018). Note: A 3D-printed flexure nanostage driven by piezo buzzers. *Review of Scientific Instruments*, *89*(10), 1–4. https://doi.org/10.1063/1.5048219

Li, Y., Wu, K., & Ai, Z. J. (2012). A circuit design of high-precision micro-displacement sensor system for DVD pickup head. *2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, SOPO 2012*, *1*, 2–5. https://doi.org/10.1109/SOPO.2012.6270450

Li, Y., & Xu, Q. (2011a). A totally decoupled piezo-driven XYZ flexure parallel micropositioning stage for micro/nanomanipulation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *8*(2), 265–279. https://doi.org/10.1109/TASE.2010.2077675

Li, Y., & Xu, Q. (2011b). A totally decoupled piezo-driven XYZ flexure parallel micropositioning stage for micro/nanomanipulation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *8*(2), 265–279. https://doi.org/10.1109/TASE.2010.2077675

Liu, H., Zhong, J., Lee, C., Lee, S.-W., & Lin, L. (2018). A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Applied Physics Reviews*, *5*(4). https://doi.org/10.1063/1.5074184

Liu, P., & Yan, P. (2017). A modified pseudo-rigid-body modeling approach for compliant mechanisms with fixed-guided beam flexures. *Mechanical Sciences*, *8*(2), 359–368. https://doi.org/10.5194/ms-8-359-2017

Lobontiu, N. (2002). Compliant mechanisms: Design of flexure hinges. In *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges* (pp. 1–448).

Ma, H. K., Chen, R. H., & Hsu, Y. H. (2015). Development of a piezoelectric-driven miniature pump for biomedical applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *234*, 23–33. https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.08.003

Morgan, M. T., & Haley, T. A. (2007). Design of Food Process Controls Systems. In *Handbook of Farm Dairy and Food Machinery* (pp. 485–552). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-081551538-8.50019-4

mqaperu.com. (2023, August 9). *https://mqaperu.com.pe/producto/torno-de-motor-cd6260c-raptor-heavy-duty/.* TORNO DE MOTOR CD6260C RAPTOR HEAVY DUTY.

Nakic, C., Bieker, J., Lammle, D., Winterstein, T., Schlaak, H. F., Schaumann, G., & Abel, T. (2016). Development of an electrothermal micro positioning platform for laser targets with two degrees of freedom. *2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/MARSS.2016.7561700

Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto* (2° Edición). Prentice Hall Hispanoamericana.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (Quinta edición). Prentice Hall.

Prasad, S. E., Waechter, D. F., Blacow, R. G., King, H. W., & Yaman, Y. (2005). Application of piezoelectrics to smart structures. *Il Eccomas Thematic Conference on Smart Structures and Materials*, *May*, 1–16. http://www.sensortech.ca/site/content/2005-01.pdf

Ricardo Hernández Gaviño, I., Hurtado Rangel Ricardo Yáñez Mendoza, R., Rica, C., España, E., Rico, P., & Prentice Hall, V. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB REVISIÓN TÉCNICA*.

RODRIGUEZ RAMIREZ, J. A., MARIACA BELTRÁN, Y. D. J., GARCIA SALMORAN, I. A., CLEMENTE MIRAFUENTE, C. M., RODRIGUEZ RAMIREZ, J. A., ACOSTA FLORES, M., & GARCIA CASTREJON, J. C. (2019). NUEVA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS MECÁNICOS UTILIZANDO MODELOS A ESCALA Y LEYES DE SIMILITUD. *DYNA INGENIERIA E INDUSTRIA*, *94*(1), 59–66. https://doi.org/10.6036/8825

Rybachuk, M., Alice Mauger, C., Fiedler, T., & Öchsner, A. (2017). Anisotropic mechanical properties of fused deposition modeled parts fabricated by using acrylonitrile butadiene styrene polymer. *Journal of Polymer Engineering*, *37*(7), 699–706. https://doi.org/10.1515/polyeng-2016-0263

Safari, A., & Akdoğan, E. K. (2008). Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications.

In A. Safari & E. K. Akdoğan (Eds.), *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2

Salivahanan, S., Rengaraj, R., & Venkatakrishnan, G. R. (2015). *Control Systems Engineering* (First Edition). Pearson.

Saputra, R. P., & Atmaja, T. D. (2013). Design of low cost compact modular small scale (CMSS)-CNC lathe machine. *Article in International Journal of Applied Engineering Research*, 1–10. https://www.researchgate.net/publication/268981188

Saund, B., & DeVlieg, R. (2013). High Accuracy Articulated Robots with CNC Control Systems. *SAE International Journal of Aerospace*, *6*(2), 2013-01–2292. https://doi.org/10.4271/2013-01-2292

Shabanian, A., Goldschmidtboeing, F., Vilches, S., Phan, H. H., Bhat Kashekodi, A., Rajaeipour, P., & Woias, P. (2016). A novel piezo actuated high stroke membrane for micropumps. *Microelectronic Engineering*, *158*, 26–29. https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.03.016

Shi, S., Lin, J., Wang, X., & Xu, X. (2015). Analysis of the transient backlash error in CNC machine tools with closed loops. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *93*, 49–60. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.009

Suh, S.-H., Kang, S. K., Chung, D.-H., & Stroud, I. (2008). *Theory and Design of CNC Systems*. Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-336-1

Suthisomboon, T., Bargiel, S., Rabenorosoa, K., & Pengwang, E. (2020). *Design and Simulation of XZ MEMS Micropositioning with 3D-Complex Structure*. 1–5. https://doi.org/10.1109/dtip51112.2020.9139150

Tarrazó-Serrano, D., Castiñeira-Ibáñez, S., Sánchez-Aparisi, E., Uris, A., & Rubio, C. (2018). MRI Compatible Planar Material Acoustic Lenses. *Applied Sciences*, *8*(12), 2634. https://doi.org/10.3390/app8122634

Tian, Y., Ma, Y., Wang, F., Lu, K., & Zhang, D. (2020). A novel XYZ micro/nano positioner with an amplifier based on L-shape levers and half-bridge structure. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *302*, 111777. https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111777

Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design*, *58*, 242–246. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038

Verotti, M. (2020). A pseudo-rigid body model based on finite displacements and strain energy. *Mechanism and Machine Theory*, *149*, 103811. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103811

Wan, S., & Xu, Q. (2016). Design and analysis of a new compliant XY micropositioning stage based on Roberts mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, *95*, 125–139. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.09.003

Wang, W. M., Huang, K. Y., Huang, H. F., Hwang, I. S., & Hwu, E. Te. (2013). Low-voltage and high-performance buzzer-scanner based streamlined atomic force microscope system. *Nanotechnology*, *24*(45). https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/45/455503

Xu, Q. (2014). A novel compliant micropositioning stage with dual ranges and resolutions. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *205*, 6–14. https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.10.010

Zhang, J. X. J., & Hoshino, K. (2019). Mechanical transducers: Cantilevers, acoustic wave sensors, and thermal sensors. In *Molecular Sensors and Nanodevices* (pp. 311–412). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814862-4.00006-5

Zhang, P. (2008). Digital Controllers for Industrial Control. *Industrial Control Technology*, 429–568. https://doi.org/10.1016/B978-081551571-5.50005-0

Zhang, Q., Zhao, J., Peng, Y., Pu, H., & Yang, Y. (2020). A novel amplification ratio model of a decoupled XY precision positioning stage combined with elastic beam theory and Castigliano's second theorem considering the exact loading force. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *136*, 106473. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106473

Zhang, Q., Zhao, J., Shen, X., Xiao, Q., Huang, J., & Wang, Y. (2019). Design, modeling, and testing of a novel xy piezo-actuated compliant micro-positioning stage. *Micromachines*, *10*(9). https://doi.org/10.3390/mi10090581

Zhang, X., & Xu, Q. (2015a). Design of a new flexure-based XYZ parallel nanopositioning stage. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, 1962–1966. https://doi.org/10.1109/ROBIO.2015.7419060

Zhang, X., & Xu, Q. (2015b). Mechanism design of a compact XYZ parallel flexure stage. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2015 - In Conjunction with 2015 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, *083*(August), 953–957. https://doi.org/10.1109/ICInfA.2015.7279424

Zhang, X., Zhang, Y., & Xu, Q. (2017). Design and control of a novel piezo-driven XY parallel nanopositioning stage. *Microsystem Technologies*, *23*(4), 1067–1080. https://doi.org/10.1007/s00542-016-2854-y

Zhang, Y. H., & Lee, C. H. (2019). Piezoelectric energy harvesting pedal integrated with a compliant load amplifier. *Advances in Mechanical Engineering*, *11*(1), 1–9. https://doi.org/10.1177/1687814018820142

ANEXO A

DATOS TÉCNICOS DE LA MÁQUINA MULTIFUNCIONAL

MEMS LGAC

ANEXO A. DATOS TÉCNICOS DE LA MÁQUINA MULTIFUNCIONAL

De acuerdo con los resultados obtenidos, el uso de la máquina se recomienda para materiales no metálicos, tales como:

- Capa de tinta de aceite negro
- Nailon negro
- Madera
- Polímeros negros

Las características técnicas de la máquina en cada una de las funciones se muestran en la Tabla A.1.

Tabla A. 1. Características técnicas de la máquina en cada una de las funciones.

Características	Grabado		Perfilómetro	Microscopio
	Dimensiones máximas	Dimensiones mínimas		
Área de grabado (µm x µm)	450 x 450	0.600 x 0.600	450 x 450	450 x 450
Profundidad (µm)	3	3	N. A	N. A
Velocidad de operación (µm/min)	300	300	240	140
Longitud de onda del láser (nm)	645-660 o 400-410	645-660 o 400-410	780	405, 650 y 780
Dimensión mínima de grabado/escaneo (µm)	1	1	1	1
Spot Láser (nm)	530	530	800	800
Potencia (mW)	399	399	80-140	80-140

RECONOCIMIENTOS Y PUBLICACIONES

ANEXO B. RECONOCIMIENTOS Y PUBLICACIONES

A.B.1. Artículo publicado en: Micromachines MDPI, 2023

micromachines

MDPI

Article

Additive Manufactured Piezoelectric-Driven Miniature Gripper

C. Andres Ferrara-Bello [1], Margarita Tecpoyotl-Torres [2,*] and S. Fernanda Rodriguez-Fuentes [3]

[1] Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas-Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (IICBA-CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca 62209, Mor., Mexico; carlos.ferrarabll@uaem.edu.mx
[2] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca 62209, Mor., Mexico
[3] Posgrado en Sustentabilidad Energética del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas-Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (IICBA-CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca 62209, Mor., Mexico; sahiril.rodriguez@uaem.edu.mx
* Correspondence: tecpoyotl@uaem.mx

Abstract: In several cases, it is desirable to have prototypes of low-cost fabrication and adequate performance. In academic laboratories and industries, miniature and microgrippers can be very useful for observations and the analysis of small objects. Piezoelectrically actuated microgrippers, commonly fabricated with aluminum, and with micrometer stroke or displacement, have been considered as Microelectromechanical Systems (MEMS). Recently, additive manufacture using several polymers has also been used for the fabrication of miniature grippers. This work focuses on the design of a piezoelectric-driven miniature gripper, additive manufactured with polylactic acid (PLA), which was modeled using a pseudo rigid body model (PRBM). It was also numerically and experimentally characterized with an acceptable level of approximation. The piezoelectric stack is composed of widely available buzzers. The aperture between the jaws allows it to hold objects with diameters lower than 500 μm, and weights lower than 1.4 g, such as the strands of some plants, salt grains, metal wires, etc. The novelty of this work is given by the miniature gripper's simple design, as well as the low-cost of the materials and the fabrication process used. In addition, the initial aperture of the jaws can be adjusted, by adhering the metal tips in the required position.

Keywords: micromanipulation; PLA; piezoelectric actuation; microdisplacement

check for updates

Citation: Ferrara-Bello, C.A.; Tecpoyotl-Torres, M.; Rodriguez-Fuentes, S.F. Additive Manufactured Piezoelectric-Driven Miniature Gripper. *Micromachines* **2023**, *14*, 727. https://doi.org/10.3390/mi14040727

Academic Editors: Sukho Park and Jose Luis Sanchez-Rojas

Received: 24 February 2023
Revised: 24 March 2023
Accepted: 24 March 2023
Published: 25 March 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Micro-/nano-manipulation systems can achieve different functions, such as the gripping, decoupling, puncturing, injecting, and positioning of small objects with micro/nanometric dimensions [1]. Their operation can be manual or automated, and their size should not necessarily have dimensions in the order of the samples to be manipulated. Micromanipulation systems have achieved great relevance due to the need to manipulate small-sized clamping objects, which is required in several areas, with controlled conditions of force, displacement, and time.

Micromanipulation systems are widely used in different research and industrial areas due to the miniaturization trend, the sophistication of microelectromechanical systems (MEMS), and in general, technology advancement [2]. These systems have applications in biomedicine [3], microassembly [4], nanomedicine, and biology [5], among others. For example, in the domain of cell biology, a micropositioning system can be used to move a microinjection pipette to transfer drugs [6]. In the area of MEMS, microassembly is often used to simplify manufacturing processes when designs are complex or different micromanufacturing technologies are used [4].

The structure of the micromanipulation systems is composed of different elements, usually a control system, a displacement platform, a tool for holding the sample, and

actuators

MDPI

Article

XYZ Micropositioning System Based on Compliance Mechanisms Fabricated by Additive Manufacturing

Andres Ferrara-Bello [1], Pedro Vargas-Chable [2], Gerardo Vera-Dimas [2], Rafael Vargas-Bernal [3] and Margarita Tecpoyotl-Torres [4,*]

[1] Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (IICBA-CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), P. C. 62209 Cuernavaca, Mexico; carlos.ferrarabll@uaem.edu.mx
[2] Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías (FCQeI), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), P. C. 62209 Cuernavaca, Mexico; pedro.vargas@uaem.mx (P.V.-C.); gvera@uaem.mx (G.V.-D.)
[3] Departamento de Ingeniería en Materiales, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), P. C. 36821 Irapuato, Mexico; rafael.vb@irapuato.tecnm.mx
[4] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (IICBA-CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), P. C. 62209 Cuernavaca, Mexico
* Correspondence: tecpoyotl@uaem.mx

Abstract: This article presents the design and implementation of a micropositioning system actuated by three piezoelectric stacks to control its displacements on XYZ axes. The use of conventional piezoelectric buzzers allows us to reduce fabrication costs. The working or mobile platform is the base for objects that will be manipulated, for example, in automated assembling. The micropositioner can be integrated into a microgripper to generate a complete manipulation system. For micropositioner fabrication, at first, Polylactic Acid (PLA) was chosen as the structural material, but after simulation and some experimental tests performed with a micropositioner made of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), it showed larger displacement (approx. 20%) due to its lower stiffness. A third test was performed with a positioner made with Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG), obtaining an intermediate performance. The originality of this work resides in the geometrical arrangement based on thermoplastic polymer compliance mechanisms, as well as in the use of additive manufacturing to fabricate it. An experimental setup was developed to carry out experimental tests. ANSYS™ was used for simulation.

Keywords: ABS; PLA; PETG; MEMS; micromanipulation; piezoelectric actuation; hysteresis effect linearization

check for updates

Citation: Ferrara-Bello, A.; Vargas-Chable, P.; Vera-Dimas, G.; Vargas-Bernal, R.; Tecpoyotl-Torres, M. XYZ Micropositioning System Based on Compliance Mechanisms Fabricated by Additive Manufacturing. *Actuators* **2021**, *10*, 68. https://doi.org/10.3390/act10040068

Academic Editors: André Preumont, Kainan Wang and Haim Abramovich

Received: 20 February 2021
Accepted: 25 March 2021
Published: 28 March 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

In the last century, great advances occurred in the development of technology towards miniaturization, such as the case of the manufacture of electronic components in the planar form [1]. This achievement allowed the massive integration of electronic elements in a millimeter area of silicon. Since then, the development of devices derived from electronics with increasingly smaller dimensions has been accelerated, currently reaching nanometric scales [2,3].

Nowadays, the need to hold, move, and locate with precision to biological and non-biological objects, with dimensions from millimeter to sub-nanometric, has increased for applications such as study, observation, alignment, monitoring, measurement, manipulation, technological development, monitoring of the evolution of samples, or assembly. This need has been met by the industry and the scientific community, developing several designs of micro/nano grippers [4] and micro/nanopositioners [5] with operating ranges according to the object to be treated, with dimensions from macro to the nano range. The application of nanomanipulation has penetrated several disciplines and sectors, such as materials science, semiconductor, cell biology, and neuroscience [6,7].

A.B.3. Artículo aceptado en: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2022

Novel Low Temperature sensor based on optimized Z-shaped beam actuator

M. Tecpoyotl-Torres
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, IICBA-CIICAp-UAEM.
tecpoyotl@uaem.mx
S. F. Rodriguez-Fuentes
Maestría en Sustentabilidad Energética, IICBA-CIICAp-UAEM
sahiril.rodriguez@uaem.edu.mx
C.A Ferrara-Bello
Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, IICBA-CIICAp-UAEM
carlos.ferarabll@uaem.edu.mx
D.M. Martinez-Rodriguez, P. Vargas-Chable
Faculta de Ciencias Químicas e Ingeniería, FCQeI-UAEM
dalia.martinez@uaem.edu.mx , vargas@uaem.mx

Abstract

This work focuses on the performance of a modified Z-Shaped chevron actuator, thermally actuated, based on an arrangement of 8 pairs of beams anchored at their outer ends. The numerical analysis was performed using ANSYS™ Workbench software to obtain displacement and compare it with results of the experimental and theoretical analysis. Using a maximum temperature of 65° C, the displacement in the shaft, experimentally obtained, corresponds to 2.53 mm, while in the theoretical model the displacement value is 2.54 mm, that means an error of 0.65%. An amplification factor of approximately 59.2 is obtained. In the numerical model, the increase in each beam's length is of 0.067 mm applying the same temperature, while the displacement value of the shaft is 3.97 mm.

Keywords: Thermal sensor, Pseudo Rigid Body Model, Amplification factor, Ansys.

1. Introduction

MEMS, also known as microsystems, are typically defined as microscopic devices designed, fabricated, and used to interact or produce changes within a controlled environment [1]. Areas such as electronics, semiconductor fabrication, wafer handling of various materials, integrated circuit assembly, require this type of precision technology at micro/nanometer scales, and benefit from increasingly efficient systems that meet these characteristics.

Another area in which MEMS are leading to significant improvements is minimally invasive surgery. This is made possible by new miniaturized devices and instruments, incorporating mechanical microstructures, micro-optical and fiber-optic components, tactile and pressure microsensors, etc. Linear motors for microsurgery control the position of surgical instruments on a very small scale (on the order of a micrometers) improving the results of most current surgical techniques [2]. Other actuators have been developed for support medical applications.

The thermal sensor MEMS D6T is an infrared temperature sensor from OMRON® that works without direct contact used for human detection, as well as abnormal temperatures in a process, such as in a refrigerator [3]. A MEMS sensor is reported in [4], which develops a monolithically integrated polyimide temperature and humidity sensor with a wide temperature range and response sensitivity. A structural arrangement to perform temperature sensing, is described in [5] , it is a temperature sensor composed of a double-ended resonator with the coupling of a structural voltage amplifier, which operates by variation of the thermal expansion coefficient from -20 °C up to 60 °C. In [6] a chevron microactuator with a cascade type arrangement is presented to sense ambient temperature changes, the electrical signals are obtained by changing the capacitance of an interdigitated capacitor. A bimorph sensor, based on a cantilever structure, for temperature sensing is shown in [7], which operates with radiation heat transfer and induced vibration.

Chevron actuators, also called V-beam thermal actuators, or bent-beam actuators, are among the most popular MEMS actuators. These actuators are heated by the Joule Effect, due to the passage of current through the structure, generated by applying a potential difference on the contacts anchored to the substrate (anchors).

The Z-shaped actuator, unlike the previous one, facilitates manufacturing and design because it does not have inclined beams. These actuators share common features with each other, they are both symmetrically configured and capable of producing rectilinear motion. Secondly, V-shaped actuators rely primarily on beam extension, while Z-shaped actuators rely primarily on beam bending to achieve rectilinear motion [8]. This leads to differences in both operation and performance.

A.B.4. Reconocimiento de la: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2020



A.B.5. Reconociemiento de la: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2020



A.B.6. Constancia de: MEXICAN DIGITAL LIF COMMUNITY, 2021



MEXICAN DIGITAL LIF COMMUNITY

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

Carlos Ferrara

Por su participación en el Congreso Virtual de Líderes en Innovación 2021, llevado a cabo del 8 al 10 de febrero.

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres
Presidente General del Congreso

Cristina Lissi
Community Manager LIF

10 de Febrero de 2021

CIICAp · UTEZ · CamBioTec · INNTECVER · Royal Academy of Engineering | Leaders in Innovation Fellowships · Tecnológico de Monterrey · Ingeniería · Kuruchu · Funded by: Newton Fund

"This project is funded as part of the Leaders in Innovation Fellowships (LIF) community activities. The LIF programme is delivered as part of the UK Newton Fund by the Royal Academy of Engineering."

A.B.7. Certificado de Aceptación Artículo MDPI, 2021



actuators

an Open Access Journal by MDPI

CITESCORE 4.2 SCOPUS · IMPACT FACTOR 1.957

CERTIFICATE OF ACCEPTANCE

Certificate of acceptance for the manuscript (**actuators-1135936**) titled:

XYZ Micropositioning System based on Compliance Mechanisms Fabricated by Additive Manufacture

Authored by:

Andres Ferrara-Bello; Pedro Vargas-Chable; Gerardo Vera-Dimas; Rafael Vargas-Bernal; Margarita Tecpoyotl-Torres

has been accepted in *Actuators* (ISSN 2076-0825) on 25 March 2021

MDPI Academic Open Access Publishing since 1996

Basel, March 2021

A.B.8. Constancia de curso “Introducción y seguridad laboral de cuartos limpios ISO 6 e ISO 7” 2021



A.B.9. Estancia de Investigación en CIDESI, 2022

GOBIERNO DE MÉXICO | CONACYT Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología | CIDESI®

San Pablo Querétaro, Querétaro a 4 de abril de 2022

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres
Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Presente

Asunto: Invitación de breve estancia en CIDESI

Estimada Dra. Tecpoyotl Torres:

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Por este medio, extendemos la invitación para realizar una estancia en nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro, del 20 de abril al 13 de mayo de 2022, a los siguientes estudiantes, colaboradores del del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes
- MICA. Carlos Andrés Ferrara Bello
- Lic. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes

Durante este periodo se realizarán las siguientes actividades:

- Asesoría y entrenamiento sobre las metodologías de fabricación que se llevan a cabo en CIDESI.
- Revisión de diseños para fabricación de máscaras
- Realización masters para los procesos de microfabricación en las instalaciones de este Centro.
- Pruebas preliminares de fabricación

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña
Gerente de Microtecnologías

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 www.cidesi.com

2022 Año de Ricardo Flores Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

A.B.10. Certificado de Aceptación Artículo MDPI, 2023



micromachines

an Open Access Journal by MDPI

Indexed in: PubMed | Indexed in: EI Compendex | CITESCORE 4.5 | IMPACT FACTOR 3.523

CERTIFICATE OF PUBLICATION

Certificate of publication for the article titled:

Additive Manufactured Piezoelectric-Driven Miniature Gripper

Authored by:

C. Andres Ferrara-Bello; Margarita Tecpoyotl-Torres; S. Fernanda Rodriguez-Fuentes

Published in:

Micromachines **2023**, Volume 14, Issue 4, 727

MDPI Academic Open Access Publishing since 1996

Basel, May 2023

A.B.11. Reconocimiento por participación en concurso de posters, 2023



XXIV AÑOS DE INVESTIGACIÓN DE EXCELENCIA E INNOVACIÓN

XXIV ANIVERSARIO CIICAP

LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS,
A TRAVÉS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

OTORGA EL PRESENTE RECONOCIMIENTO A

MICA. Carlos Andrés Ferrara Bello

Por su destacada participación en el concurso de posters, con el proyecto :

" **Nanogeneradores de energía, de bajo costo de fabricación, para fines didácticos** "

en el marco del XXIV Aniversario del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.
Que se llevó a cabo el día 15 de Marzo de 2023.

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
TITULAR DE LA DIRECCIÓN
CIICAP-UAEM

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

CIICAp

FOLIO:102/23

A.B.12. Reconocimiento por participación como tallerista, 2023



CÓDIGO IMPLEMENTADO

ANEXO C. CODIGO IMPLEMENTADO

A.C.1. Código de programación del microcontroladore STM32F103C8T6 encargado de convertir señales digitales a señales analógicas y de controlar de forma general la máquina.

```
#include "LiquidCrystal.h"

unsigned int i_X;
unsigned int i_Y;
unsigned int salida;
unsigned int modo=1;
unsigned int submenu;
unsigned int llave[9];
unsigned int pas[5];
unsigned int llave_1;
unsigned int llave_2;
unsigned int llave_3=1;
unsigned int llave_4=1;
unsigned int opcion;
unsigned int i;
unsigned int j;
unsigned int k;
unsigned int puls;
unsigned int cont=0;
unsigned int dutyCycle_1;//eje Y
unsigned int dutyCycle_2;//eje X
unsigned int contador_1=0;
unsigned int contador_2=0;
unsigned int contador_3=0;
unsigned int contador_4=0;
unsigned int val_X=10;
unsigned int val_Y=10;
unsigned int pasos_XY=1;
unsigned int pasos=1;
float pos_Y;
float pos_X;
float incremento;
const int rs = PB11, en = PB10, d4 = PB1, d5 = PB0, d6 = PA7, d7 = PA6;//
Pines conectados al LCD
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

void setup() {

  pinMode(PB13,INPUT);//Direccion Y
  pinMode(PB12,INPUT_PULLDOWN);//Pasos Y
  pinMode(PB15,INPUT);//Direccion X
  pinMode(PB14,INPUT_PULLDOWN);//Pasos X
  pinMode(PA1,INPUT_PULLDOWN);//BOTON 6   regreso
  pinMode(PA2,INPUT_PULLDOWN);//BOTON 5   -
  pinMode(PA5,INPUT_PULLDOWN);//BOTON 4   +
```

```
  pinMode(PA15,INPUT_PULLDOWN);//BOTON 3  ok
  pinMode(PA4,INPUT_PULLDOWN);//BOTON 2   baja
  pinMode(PA3,INPUT_PULLDOWN);//BOTON 1   sube
  pinMode(PB5,OUTPUT);// salida calibracion/modo rapido
  pinMode(PB4,INPUT_PULLDOWN);//Confirmacion de datos enviados
  pinMode(PB3,OUTPUT);// Solicitud de datos series
  pinMode(PC13,OUTPUT);

  pinMode(PB6, PWM);
  pinMode(PB7, PWM);
  digitalWrite(PB3,HIGH);
  digitalWrite(PB5,LOW);

  pas[0]=1;
  pas[1]=2;
  pas[2]=5;
  pas[3]=10;

  Timer4.pause();
  Timer4.setPrescaleFactor(1); // 0.014 µs resolution
  Timer4.setCompare(TIMER_CH1, 1000);
  Timer4.setOverflow(65535);//PWM PERIODO= 0.000910208s PWM
FRECUENCIA=1098.64 Hz
  Timer4.refresh();
  Timer4.resume();

  pwmWrite(PB6, 0);//eje Y
  pwmWrite(PB7, 0);//eje X

   while(digitalRead(PA3)==1){   //BOTON 1   sube

   }

    for(i=0; i<=689; i++){
   dutyCycle_1=i*10;
  pwmWrite(PB6, dutyCycle_1);//eje Y
  pwmWrite(PB7, dutyCycle_1);//eje X
  delay(2);
  }

   lcd.begin(20, 4);//


}
//*******************************************************  MENU  ***********
*****************
void loop() {

    if(modo==1&&llave[0]==0){
         lcd.clear();
         delay(1);//delayMicroseconds(500);
         lcd.print("Micro CNC laser v1.3");
         lcd.setCursor(0, 1);
         lcd.print("-> Micro grabado ");
         lcd.setCursor(0, 2);
         lcd.print("   Perfilometro");
         lcd.setCursor(0, 3);
```

```
          lcd.print("   Microscopio");
          llave[0]=1;  }
     if(digitalRead(PA15)==1 && llave[0]==1){    //   Ok para grabado
          while(digitalRead(PA15)){}
          grabado();
          llave[0]=0;   }

     if(modo==2&&llave[1]==0){
          lcd.clear();
          delay(1);//delayMicroseconds(500);
          lcd.print("Micro CNC laser v1.3");
          lcd.setCursor(0, 1);
          lcd.print("   Micro grabado ");
          lcd.setCursor(0, 2);
          lcd.print("-> Perfilometro");
          lcd.setCursor(0, 3);
          lcd.print("   Microscopio");
          llave[1]=1;  }
     if(digitalRead(PA15)==1 && llave[1]==1){        //   Ok para
perfilometro
       while(digitalRead(PA15)){}
          perfilometro();
          llave[1]=0;   }

     if(modo==3&&llave[2]==0){
       lcd.clear();
       delay(1);//delayMicroseconds(500);
          lcd.print("Micro CNC laser v1.3");
          lcd.setCursor(0, 1);
          lcd.print("   Micro grabado ");
          lcd.setCursor(0, 2);
          lcd.print("   Perfilometro");
          lcd.setCursor(0, 3);
          lcd.print("-> Microscopio");
          llave[2]=1;  }
     if(digitalRead(PA15)==1 && llave[2]==1){          //   Ok para escaneo
          while(digitalRead(PA15)){}
          perfilometro();
          llave[2]=0;   }


      if(digitalRead(PA4)==1){                     // Baja
          modo++;
          if(modo>3) modo=3;
          llave[0]=0;
          llave[1]=0;
          llave[2]=0;
          llave[3]=0;
          delay(150);
          while(digitalRead(PA4)==1){}}
        delay(10);
       if(digitalRead(PA3)==1 && (modo>1)){         // Sube
          modo--;
          llave[0]=0;
          llave[1]=0;
          llave[2]=0;
          llave[3]=0;
```

```
        delay(150);
        while(digitalRead(PA3)==1){}   }


}//FIN LOOP


//*****************************************************  MODO
GRABADO  *******************************************
void grabado(void){
  digitalWrite(PB5,HIGH);
  lcd.clear();
  lcd.home();
  lcd.print("Modo Grabacion Laser");
  delay(100);

  attachInterrupt(PB12, INT_PASOS_Y, RISING);
  attachInterrupt(PB14, INT_PASOS_X, RISING);

  while(digitalRead(PA1)==0){
    contador_3=contador_3+1;
    delayMicroseconds(3);
    delayMicroseconds(2);
    if(contador_3>50000){
       pos_Y=contador_1/10.0;
       pos_X=contador_2/10.0;
       lcd.setCursor(0, 2);
       lcd.print("X=");
       lcd.print(pos_X,2);
       lcd.print(" ");
       lcd.print("Y=");
       lcd.print(pos_Y,2);
       lcd.print("  ");
       contador_3=0;               }
  }//fin while
  while(digitalRead(PA1)){}

}

//*****************************************************  MODO
PERFILOMETRO/MICROSCOPIO  ***************************
void perfilometro(void){
salida=1;
 while(salida==1){
puls=1;
submenu=1;
contador_4=0;
llave[5]=0;
delay(100);
 while(puls==1){    //Submenu
      if(submenu==1&&llave[5]==0){
         lcd.clear();
         delay(1);
         if(modo==2)
         lcd.print("Modo Perfilometro:");
         else
```

```
  lcd.print("Modo Microscopio:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("-> X= ");
  lcd.print(val_X);
  lcd.print("um");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("   Y= ");
  lcd.print(val_Y);
  lcd.print("um");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("   Paso= ");
  lcd.print(pasos);
  lcd.print("um");
  llave[5]=1;  }

if(submenu==2&&llave[6]==0){
  lcd.clear();
  delay(1);
  if(modo==2)
  lcd.print("Modo Perfilometro:");
  else
  lcd.print("Modo Microscopio:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("   X= ");
  lcd.print(val_X);
  lcd.print("um");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("-> Y= ");
  lcd.print(val_Y);
  lcd.print("um");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("   Paso= ");
  lcd.print(pasos);
  lcd.print("um");
  llave[6]=1;  }

if(submenu==3&&llave[7]==0){
  lcd.clear();
  delay(1);
  if(modo==2)
  lcd.print("Modo Perfilometro:");
  else
  lcd.print("Modo Microscopio:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("   X= ");
  lcd.print(val_X);
  lcd.print("um");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("   Y= ");
  lcd.print(val_Y);
  lcd.print("um");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("-> Paso= ");
  lcd.print(pasos);
  lcd.print("um");
  llave[7]=1;  }
```

```
if(digitalRead(PA5)==1 && submenu==1&&val_X<300){  // +
  val_X=val_X+10;
  llave[5]=0;
  delay(50);
  while(digitalRead(PA5)){} }
if(digitalRead(PA5)==1 && submenu==2&&val_Y<300){  // +
  val_Y=val_Y+10;
  llave[6]=0;
  delay(50);
  while(digitalRead(PA5)){} }
if(digitalRead(PA5)==1 && submenu==3&&contador_4<3){  // +
  contador_4++;//cont++;
  pasos=pas[contador_4];//   pasos=pasos+1;
  llave[7]=0;
  delay(50);
  while(digitalRead(PA5)){} }
  delay(10);
if(digitalRead(PA2)==1 && submenu==1&&val_X>10){     //  -
  val_X=val_X-10;
  llave[5]=0;
  delay(50);
  while(digitalRead(PA2)){} }
if(digitalRead(PA2)==1 && submenu==2&&val_Y>10){    //  -
  val_Y=val_Y-10;
  llave[6]=0;
  delay(50);
  while(digitalRead(PA2)){} }
if(digitalRead(PA2)==1 && submenu==3&&contador_4>0){   //  -
  contador_4--;//pasos=pasos-1;
  pasos=pas[contador_4];//
  llave[7]=0;
  delay(50);
  while(digitalRead(PA2)){} }
delay(10);
if(digitalRead(PA4)==1){                  // Baja
  submenu++;
  if(submenu>3) submenu=3;
  llave[5]=0;
  llave[6]=0;
  llave[7]=0;
  delay(150);
  while(digitalRead(PA4)==1){}}
 delay(10);
if(digitalRead(PA3)==1 && (submenu>1)){    // Sube
  submenu--;
  llave[5]=0;
  llave[6]=0;
  llave[7]=0;
  delay(150);
  while(digitalRead(PA3)==1){}   }
 delay(10);

 if(digitalRead(PA15)==1){                // Ok
    delay(100);
    if(digitalRead(PA15)==1){
      puls=2;
      while(digitalRead(PA15)==1){}
```

```
           }}
           delay(10);
        if(digitalRead(PA1)==1){                          //Regresa
          puls=3;
          salida=0;
          while(digitalRead(PA1)==1){}
        }
     }  // Fin submenu

     incremento=68.98421*pasos;
     i_X=val_X/pasos;
     i_Y=val_Y/pasos;

    digitalWrite(PB5,HIGH);// Modo rapido
    lcd.clear();
    lcd.home();

while( puls==2){

  for(i=0; i<i_Y;i++){
      dutyCycle_1=6890+(i*incremento);//inicia en la posicion Y=100
      pwmWrite(PB6, dutyCycle_1);
      for(j=0;j<i_X;j++){

        dutyCycle_2=6890+(j*incremento);//inicia en la posicion X=100
        pwmWrite(PB7, dutyCycle_2);

        lcd.setCursor(0, 2);
        lcd.print("Y=");
        lcd.print(i*pasos);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("X=");
        lcd.print(j*pasos);
        lcd.print(" ");
        delay(4);
        llave_2=digitalRead(PB4);
        digitalWrite(PB3,LOW);
        while(llave_2==digitalRead(PB4)){
          if(digitalRead(PA1)==1){
          puls=1;
          i=500;
          j=i;
          llave_2=!llave_2;
          while(digitalRead(PA1)==1){}
          delay(250);
         //break;
        }
        }
        digitalWrite(PB3,HIGH);
      }//FIN SEGUNDO FOR
      for(j=0;j<i_X;j++){
        dutyCycle_2= dutyCycle_2-incremento;//inicia en la posicion X=100
        pwmWrite(PB7, dutyCycle_2);  }
  }// FIN PRIMER FOR

puls=1;//llave_1=0;
```

```
}//Fin modo de trabajo

 }  //fin while
}// FIN modo perfilometro



void INT_PASOS_Y (){
if (digitalRead(PB13)==0&&contador_1<4500){
  contador_1=contador_1+1;
  } else{
    if (contador_1>0)
      contador_1=contador_1-1;
      }
      dutyCycle_1=6890+(contador_1*6.898421);//inicia en la posicion Y=100
      pwmWrite(PB6, dutyCycle_1);
}
void INT_PASOS_X (){
if (digitalRead(PB15)==0&&contador_2<3000){
  contador_2=contador_2+1;
  } else{
    if (contador_2>0)
      contador_2=contador_2-1;
      }
      dutyCycle_2=6890+(contador_2*6.898421);//inicia en la posicion X=100
      pwmWrite(PB7, dutyCycle_2);
}
```

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Cuernavaca, Morelos, 28 de octubre de 2024.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: "Desarrollo de una máquina CNC (Control Numérico Computarizado) para corte y grabado de piezas micrométricas", que presenta el alumno **Carlos Andrés Ferrara Bello**, para obtener el título de **Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. GENNADIY BURLAK
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ
DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL
DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ
DR. RAMÓN CABELLO RUÍZ
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

Se adiciona efirma UAEM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

RAMON CABELLO RUIZ | Fecha:2024-10-28 15:17:21 | FIRMANTE
jS/PYXLzVI+9lVhilaVCy66RahLD4Rj6CCYIzFxZImLDXHwCaQ7ObmbqU2NGmmIrK+ufbIxDOGWw4mvwDWT/fE7BCJmGGozWcFvZzUnR0LhMBUWSTGybK64zJ+ulM7CQbG134E8SHr6/+84ewijFGO7Vj1GHqmj3TYIKIn/8tKUqq3xhSz2zUtpzeMHn9jx6uXLxgOguv03heHgW1WFzHQP9L0rOywTFdWHQMBvWUPW359smB/4vUP+l7EBh7TVNORVR0FTzowVtDVxKc82cLyel7C/jGIhAy9qI7Yj/ATGNbITiMbggR5Hal1wM0djjo6IXcRCkCO5/Kj249PDKow==

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2024-10-28 15:26:22 | FIRMANTE
hCcYK+khshkQC4VmPiaZ2+vaVo3kmbqNy90RFjuL1qPIlrjtkVo/jJ3wL+BaA0Ca9OzK4xmQEs9WBvPBxvPEQ5lZK7umRLLc9rtQZdEyYuwriz7EWf2PkIMFN9pPyNg/VYdpWfeCYZJt2pgZpGsAtBFuLI5XD8T7gdCFSuL5mbpfYIfA5RxeXuvUhqiuOvYQj4/lddqfrxWOPvCoJ3RX+AKJcTvvKBbKPqscaV2IiCnEHHXY1d2PmbWyNJU7smQuzPHI00vAqes+XURe2/FgOdgd/++OKMR+RAR7wfS97udagchsj/hV+2/PKo4NCGJk79gSqBaZw72FNeOLZ+Q37Q==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2024-10-28 19:56:49 | FIRMANTE
NLBso4//XjbgmRXdKUSbqBWGUk1pdmLiWGHATD0YRz9wU/km8nm73GxmpoeClFQbrlvJ6C0eNcZNMdQZ1GCLNUxUvkm9LL57pgsLCsmDQVwiLfac3YpR0ZF6rimMPNLXbFOUpF8xxbMUb6opxZDqQZ5CmvzWxH8zy6VW15UFhCwRD3ltg3BZ8YQQVe7OSkOenFEBkGpsaoQgFtCbVNjvBAyccVxpfBb+OZ+sTl9pamxLRAAmVE9efcKBZ1jJi0dt1Tn8tr6KBvmGSPzSjz9tXcDtTY43nhoX5Siv/YlDNnAAxJAMovNsE+SGZj4SC94Ryl5LH+FZaGz6bHj8objL0A==

GENNADIY BURLAK | Fecha:2024-10-28 21:20:00 | FIRMANTE
Eo4mygI8lXequf43E5Eqdw9ys99qLprXgP1BcbVEaZPYhLs2x3qoR97kXjtq2eOLQJ8BvOuM+ubBFeovnLxPFWW0d8ITmuNUTb2tnYdwDU/6n8ZAu0eyhjhpo9rBVn0S1ckseWthoHsCINedQnn9gEhAFobP2q+k4tZt9LnNIarWfR4M1n5BNNjL2z6c+dXwBhCVAB5NBt7HaiB34njkiPKbl5Na3SvsbEp7AHXoNtDiLC9SLitYopm4cE60MshAwSekxzfhhVDJQxM9juWYmC7OaYkwsCT6NffPqtb/XBjtikkmmIXlfBSZHn6HPmm/bKnb9qUhOPuj9Y66rb80Pg==

OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2024-10-30 11:00:18 | FIRMANTE
FfYVAd2p8MJVga2At5K166SFFL6o569Q0Fw1XZ6DPc4g9ZaAUfs7bOqL0pcYIjrM4JlhIQ6hIwQ2U+DCmt0W0ICDy5aRVOzUon7K+qi5WgACfg/rJulHFdTVmgAEZTeUB4QR5z+aONIBIE1vHiXchVL9nwDWbpXro6tkZbtL5Vfmkm+gTfnz1c6FS5MDOtZYNZYf2IrwgonwVbGXUBERsfqa5VQk6fg3LcH1wQkC3RYb3kDK4ertep/ce05McAlqayOcAuVfrQCu1Ai2QVFdEzb/PL4Ga6CNo0EKgYboj7tnf1PJlTqHM44ZBjFgHvc5MmLzJY9BIUhcG0hP2accaA==

PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2024-11-06 13:29:07 | FIRMANTE
ckvK4ZmDI72dlpFOFW38UZ4TZ9YrV29nIOd5IQvwmERW8hs7CrWnu89BYPuy2h7EOJ9E/PRAIjEOeSw/IWO0t2TryMv7WPqBuk+XYt4HjZFRVfxW/zILHZD0JpW8K/fwofaS1pH/ZbKG0kFvJiVu1eIDnT/Ky81g2TxXmnsbpFvHCpyaKlQ+d+qAINxZ8VEULDMJMHMuqjJmFB6QDJ1hrLthC1nEsR6ndnM+RreAS2Y2D+9sEsJK1VSQfvRjK+ScqvwQlgQS0ODPLe9iThaA1UO/IbXne+0pqDhx5OziFajsF6mu4OylHD5ER4ygS6ZoaHPGtD8eij/VeEySRHVERw==

JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ | Fecha:2024-11-08 05:45:26 | FIRMANTE
UC66qVGuUv4ipLZurQIKcWydL7Y7TaUfzF60CeER1c5ICw+a9UJRE5EY9iEG/VVDBvEzGKbmDzdxSNkn0Lxd/VwKADmGyX9HGNoXGDx85Ux/IT9aH95pH9BXyrEdUti3IdEjA4POfwlvkQmM8tXRX5YmHSSBE0s865UjfeoBkJS1LqHmgaUkJxFr1AbLcb258b/hTW3wG6XXg4fbYKgAMc+WYP6K07xWqLpi5+Gm8vBxZ4B/86bnNbp7mYs4q7OMgSyE7Q282o68HJdP0zjWWPL/h6uV/gp0LgP8hHhXeTM7GxbC8hb/38FjrNjgndNElonGiNSpKXkcuO/nf/0dsg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

BvV6nt1ru

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ORzU7qW8RBXuDm1jAk4VMbtz1hL7uk46