

Trabajo Fin de Máster

Diseño de una máquina portable de grabado láser
para superficies selectivas en frecuencia en
ventanas bajo-emisivas de ferrocarriles y edificios

Design of a portable laser marking device for
frequency selective surface definition on low-e
windows for railways and architecture

Autor/es

María Muñoz Molina

Director/es

Íñigo Salinas Áriz

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Febrero 2025

Resumen

El uso de vidrios bajo-emisivos, equipados con capas metálicas para mejorar el aislamiento térmico, es cada vez más común en aplicaciones de transporte y arquitectura. Sin embargo, estas capas metálicas presentan una limitación significativa al bloquear las señales de radiofrecuencia (RF) necesarias para las comunicaciones móviles. Para permitir mantener el aislamiento térmico y a su vez dejar pasar estas señales de radiofrecuencia, se deben definir superficies selectivas en frecuencia (FSS) sobre esas capas metálicas.

Inicialmente, las FSS se trazan mediante una máquina de grabado láser durante el proceso de fabricación de las ventanas, después de depositar la capa metálica. Sin embargo, surge el desafío de trazar estas FSS a ventanas ya instaladas, especialmente en entornos como ferrocarriles o edificios.

Este proyecto aborda dicho desafío mediante el estudio teórico y diseño de los componentes requeridos para el desarrollo de una máquina de grabado láser portátil. Su objetivo es grabar FSS directamente sobre vidrios bajo-emisivos ya instalados. Se evaluará la precisión del dispositivo y la calidad del grabado mediante comparaciones entre resultados experimentales y simulaciones teóricas.

Palabras clave: vidrio, bajo-emisivo, capa metálica, superficie selectiva en frecuencia (FSS), láser.

Summary

The use of low-emissivity glass, equipped with metallic coatings to enhance thermal insulation, is increasingly common in transportation and architectural applications. However, these metallic coatings present a significant limitation by blocking radiofrequency (RF) signals necessary for mobile communications. To maintain thermal insulation while allowing the passage of these RF signals, frequency selective surfaces (FSS) must be defined on these metallic coatings.

Initially, FSS are etched using a laser engraving machine during the window manufacturing process, after the metallic coating is deposited. However, the challenge arises when FSS need to be engraved onto already-installed windows, particularly in environments such as railways or buildings.

This project addresses this challenge by studying and designing the components required to develop a portable laser engraving machine. Its purpose is to directly engrave FSS onto low-emissivity glass already installed in these environments. The precision of the device and the quality of the engravings will be evaluated through comparisons between experimental results and theoretical simulations.

Keywords: glass, low-emissivity, metallic coating, frequency selective surface (FSS), laser.

Índice

Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Contexto del proyecto.....	5
1.2 Estado del Arte	6
Superficies selectivas en frecuencia	6
Máquinas de grabado láser portátiles.....	7
1.3 Objetivos	8
1.4 Cronograma.....	9
1.5 Organización de la memoria	9
Capítulo 2. Diseño del sistema	10
2.1. Cabezal óptico	11
Láser.....	11
Lente de focal variable.....	13
Galvanómetro.....	14
Lente f-theta	15
2.2. Control del sistema principal.....	17
Microcontrolador	17
Convertor D/A	18
Ordenador	18
2.3. Otros dispositivos.....	19
Motor.....	19
Cámara.....	20
2.4. Presupuesto.....	20
Capítulo 3. Software de control del equipo	21
3.1. Control de la emisión, potencia y frecuencia del láser	21
3.2. Control galvanómetro y láser mediante Arduino.....	22
3.3. Interfaz gráfica	24
Capítulo 4. Caracterización del sistema de grabado láser	25
4.1. Generación de las tramas.....	25
4.2. Grabado de líneas	25
Potencia	26
Densidad (niveles entre puntos o puntos/mm)	28
Tiempo de grabado.....	31
Frecuencia.....	32
Área de marcado y uniformidad.....	36
4.3. Grabado de una cuadrícula	39
Distorsión en forma de barril y almohada.....	39
4.4. Grabado de varias cuadrículas	41
Distorsión debida al alineamiento del motor	41
Procesado de la imagen.....	44
Capítulo 5. Estudios adicionales	47
5.1. Máquina de grabado láser final	47
5.2. Patrón trébol	49
5.3. Time Gating	52
Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras.....	53
Bibliografía	54
ANEXOS	55
Anexo I. Especificaciones de los dispositivos seleccionados	55
Anexo II. Código C#	64
Anexo III. Código Arduino	69
Anexo IV. Código Python.....	69

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto del proyecto

El uso de vidrios con propiedades térmicas, como los vidrios bajo-emisivos y de control solar, se ha incrementado significativamente en aplicaciones de arquitectura y transporte debido a su capacidad para mejorar la eficiencia energética. Estos vidrios integran capas metálicas de espesor nanométrico en su superficie, diseñadas para reflejar la energía y proporcionar un aislamiento térmico superior. (Figura 1. 1)

Sin embargo, estas mismas capas metálicas generan un efecto no deseado: bloquean las ondas electromagnéticas utilizadas en tecnologías inalámbricas como redes móviles o WiFi, cuya frecuencia se encuentra en el rango de 0,6 a 6 GHz. Este bloqueo puede generar pérdidas de cobertura en espacios cerrados, ya que una capa de plata de entre 20 y 100 nanómetros de espesor puede introducir una atenuación de 40-50 dB en este rango de frecuencias.

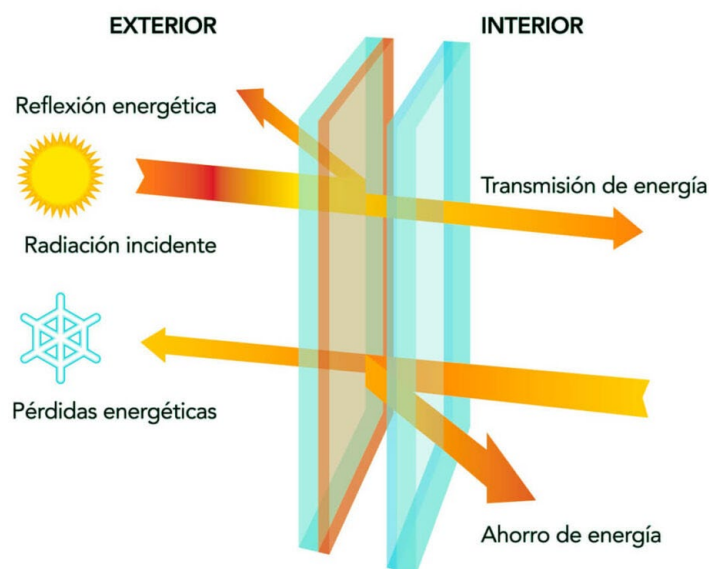


Figura 1. 1. Vidrios bajo emisivos [1]

Una solución a este problema son las superficies selectivas en frecuencia (FSS, *Frequency Selective Surface*). Se trata de superficies, normalmente metálicas, con patrones periódicos diseñados para transmitir, reflejar o absorber ondas electromagnéticas de un rango de frecuencias determinado. Si se definen patrones de este tipo en las capas metálicas de los vidrios bajo-emisivos o de control solar, se puede conseguir disminuir la atenuación de las señales de radiofrecuencia considerablemente, a costa de una pérdida de eficiencia energética proporcional al área de capa metálica retirada.

El grabado de las FSS se lleva a cabo utilizando un láser de media-alta potencia. Hasta el momento, la mayoría de las ventanas han sido grabadas empleando equipos instalados en plantas de producción. Estas máquinas están diseñadas para trabajar en un entorno fijo, permitiendo realizar con precisión el grabado en ventanas nuevas durante su fabricación.

Actualmente, muchos ferrocarriles están equipados con vidrios bajo emisivos que contienen capas metálicas, pero carecen de FSS trazadas en ellas, lo que provoca problemas de cobertura. Este proyecto busca resolver esta limitación mediante el desarrollo de una máquina de grabado láser portátil capaz de trazar FSS directamente sobre las capas metálicas de vidrios ya instalados

en ferrocarriles y, en un futuro, en edificios. Se busca que tenga prestaciones similares o no muy inferiores a las del sistema de planta.

El Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) y Zepren Solutions han colaborado en el desarrollo de esta tecnología en el marco del proyecto Mobifrec, en alianza con Ariño Duglass. Este avance permitirá a Ariño Duglass acceder a un nicho de mercado que incluye gran cantidad de trenes y edificios en todo el mundo, especialmente durante los próximos años, en los que todavía existirán gran cantidad de vidrios instalados en los que no se ha realizado este tratamiento en fabricación.

El trabajo que se plantea consiste en el diseño de una máquina láser portátil para el grabado de superficies selectivas en frecuencia tanto para transporte como para arquitectura.

1.2 Estado del Arte

Superficies selectivas en frecuencia

Las superficies selectivas en frecuencia son estructuras, repetidas periódicamente y normalmente metálicas, diseñadas para reflejar, transmitir o absorber campos electromagnéticos [2]. Esta forma periódica es la que produce un comportamiento frecuencial determinado [3]. Habitualmente, son utilizadas como filtros para el rango de frecuencias de las microondas (entre 300 MHz y 30 GHz). Para obtener dicho filtro, se trazan líneas o formas geométricas en la capa metálica con una dimensión menor que la longitud de onda.

Las FSS se han empleado desde hace tiempo en el diseño de antenas y otros elementos de radiofrecuencia, pero desde hace unos pocos años se han empezado a implementar sobre acristalamientos para mejorar la cobertura de redes inalámbricas [3].

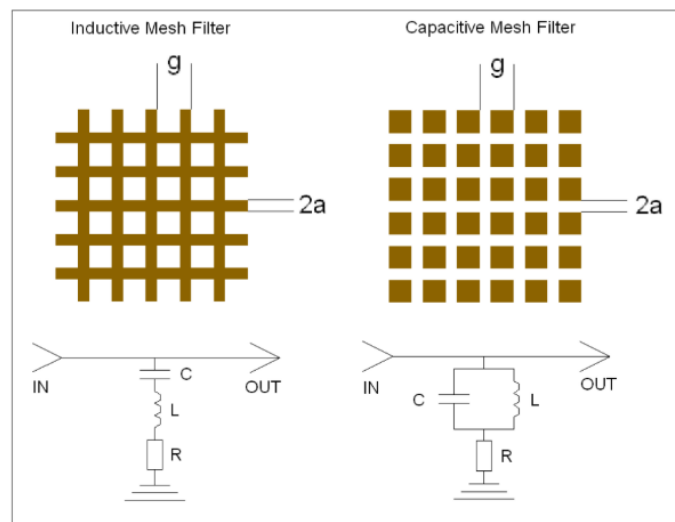


Figura 1. 2. Filtro tipo malla inductivo (paso alto) y parche capacitivo (paso bajo)

Habitualmente las FSS más utilizadas son de tipo malla y tipo parche, que consisten en líneas conductoras o aislantes horizontales y verticales definidas en la capa metálica. En la Figura 1. 2 se puede ver la capa metálica en marrón y la capa eliminada en blanco.

Este tipo de FSS destacan por tener un comportamiento independiente de la polarización del campo eléctrico, es decir, que ambas componentes de polarización tendrán los mismos

coeficientes de transmisión y reflexión, y por lo tanto el coeficiente de transmisión no depende del ángulo de polarización. Se comportarán como filtros paso alto y paso bajo respectivamente.

De los modelos mencionados anteriormente, en este proyecto se han utilizado los filtros tipo parche capacitivos. Uno de los motivos por los que se ha elegido este diseño es que es el más habitualmente utilizado en la mayor parte de edificios y trenes, debido a que tiene un comportamiento paso bajo y, por lo tanto, deja pasar las señales de radio frecuencia sin afectar al filtrado sobre la luz. Normalmente estos utilizan un grosor de línea de 80 o 100 μm y una periodicidad de pocos milímetros (1-15 mm).

Máquinas de grabado láser portátiles

Desde hace más de 20 años existen máquinas de grabado láser para diferentes propósitos. Un ejemplo, enfocado al grabado sobre vidrio (aunque inicialmente destinado a realizar marcas para evitar colisiones de aves), es el sistema desarrollado por la empresa Boraident [4], utilizada por Ariño Duglass como máquina de planta (Figura 1. 3). En este equipo, el vidrio es transportado al sistema para realizar el grabado deseado y, posteriormente, se retira manualmente o se clasifica automáticamente en una unidad de almacenamiento.



Figura 1. 3. Máquina de grabado láser de Boraident

En los últimos años, el trazado de FSS en ventanas ha ganado popularidad, impulsando el desarrollo de los primeros prototipos de sistemas portátiles para poder tener un mayor alcance. Sin embargo, estos dispositivos aún no son comerciales y presentan problemas que limitan su precisión frente a las máquinas de planta y son, en general, poco versátiles.

Uno de ellos, ha sido desarrollado también por la empresa Boraident, en la que la máquina portátil contiene un marco que se adhiere con ventosas a la carrocería del tren y mediante diferentes sensores el cabezal láser solamente aplica láser en el vidrio (Figura 1. 4). El inconveniente que presenta esta máquina es que lleva incorporada una tijera elevadora y es demasiado grande, por lo que no se podría aplicar en el interior de muchos edificios ni en el exterior a partir de una determinada altura.



Figura 1. 4. Máquina CellFREE con la plataforma elevadora plegada (izquierda) y desplegada (derecha)

Por ello, Ariño Duglass y Zepren Solutions, en colaboración con el Grupo de Tecnologías Fotónicas, se han propuesto desarrollar otro prototipo de una máquina portátil de grabado láser. Este Trabajo Fin de Máster corresponde las primeras fases de diseño y pruebas del prototipo, que posteriormente será llevado a fase comercial por Zepren.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de una máquina portable de grabado láser para superficies selectivas en frecuencia en ventanas bajo-emisivas de ferrocarriles y edificios. Este objetivo se puede dividir en los siguientes objetivos parciales:

- Estudio de los componentes de hardware y software requeridos para el desarrollo de una máquina de grabado láser portátil.
- Diseño del montaje de un sistema láser portátil para el grabado de superficies selectivas en frecuencia
- Caracterización experimental de su correcto funcionamiento y precisión.
- Simulación de otros tipos de patrones de FSS para su grabado con el láser portátil.

1.4 Cronograma

A continuación, se muestra la distribución del trabajo realizado entre los meses de enero y mayo en el siguiente cronograma:

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
Estudio del hardware y software					
Diseño del montaje					
Caracterización experimental					
Simulaciones de otras FSS					
Memoria					

1.5 Organización de la memoria

La memoria se va a dividir en 6 capítulos. Tras esta introducción, el segundo de ellos abordará el problema que se pretende resolver y un esquema general de la solución elegida, detallando el diseño de la máquina láser portátil. El tercero explicará el software de control con interfaz gráfica creado para nuestro sistema. El cuarto capítulo se centrará en la verificación del correcto funcionamiento del sistema mediante la realización de distintas pruebas. El último capítulo estará dedicado a trabajos adicionales relacionados con el sistema, entre ellas su industrialización y evaluar el funcionamiento del sistema utilizando un patrón diferente de FSS.

Finalmente se expondrán las conclusiones y la bibliografía.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL SISTEMA

En esta sección se describirá el montaje elegido para el diseño de una máquina portátil de grabado de superficies selectivas en frecuencia (FSS). Se detallarán los motivos de la elección de cada componente, explicando su función específica dentro del sistema. Asimismo, se especificará el modelo concreto de cada componente.

El objetivo principal es conseguir realizar un grabado adecuado de las FSS, para ello se tendrá en cuenta que las líneas tienen que trazarse con una precisión por debajo del milímetro, siendo de aproximadamente de 100 μm . Y que será necesario grabar con buena precisión tanto una malla como una ventana completa. Además, habrá que grabar tanto en un vidrio monolítico, compuesto exclusivamente por una capa de aire y una metálica, como en una ventana completa, compuesta por varias capas de aire y metálicas, en la que habrá que grabar a distintas distancias dependiendo de la capa sobre la que se desee grabar.

Para conseguir realizar un grabado adecuado se necesitarán tener en cuenta siguientes requisitos mediante los cuales se han elegido los componentes del sistema:

1. Grabar a la mínima potencia que permita eliminar la capa metálica sin llegar a quemarla y que cumpla las necesidades de transmisión deseadas en cada caso.
2. Minimizar el tiempo que la máquina tarda en trazar la FSS en una ventana completa, asegurando que su funcionamiento se asemeje al de la máquina de planta. Esto es importante, ya que un operario deberá controlar la máquina y grabar en cada una de las ventanas del tren, por lo que se busca la máxima eficiencia y rapidez del proceso. La máquina de planta de producción tarda un total de 13 minutos en trazar ventana de 1339x964mm compuesta por mallas de 10x10mm.
3. Conseguir que sea una máquina portable, es decir, que pese lo mínimo posible, utilizando los dispositivos más ligeros y eficientes.

En la Figura 2. 1, se pueden observar los distintos dispositivos que formarán parte del cabezal óptico del proyecto. El sistema incluye un láser como fuente de luz, una lente de focal variable para ajustar dinámicamente el enfoque del haz en vidrios con capas metálicas a diferentes distancias, un galvanómetro que contiene dos espejos que permiten mover el haz de luz y grabar en puntos específicos con precisión. Además, se utilizará una lente f-theta para poder realizar el grabado sobre una superficie plana.

A continuación se comentarán las funciones de cada uno de los dispositivos.

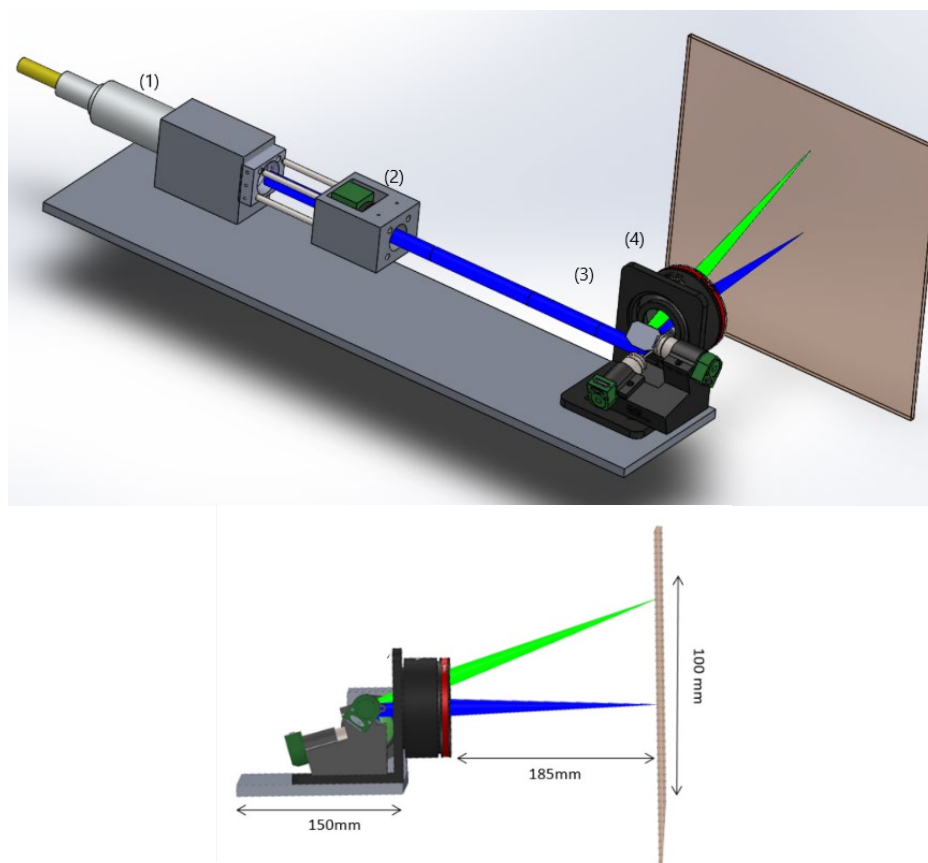
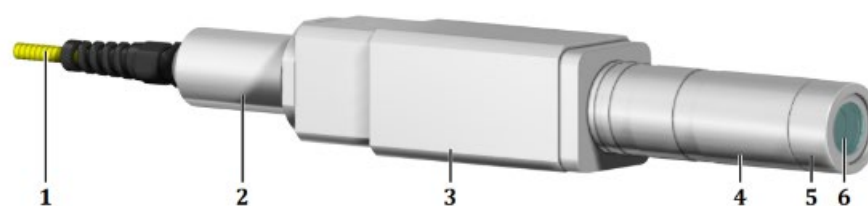


Figura 2. 1. Esquema del cabezal: salida del láser (1), lente de focal variable (2), galvanómetro (3), lente f-theta (4)

2.1. Cabezal óptico

Láser

Lo primero que vamos a necesitar para implementar nuestro sistema es una fuente láser adecuada. Para que el láser salga colimado, dispondrá de un cabezal óptico en el que la radiación láser creada en este módulo será guiada mediante una fibra óptica al cabezal y se entregará de forma colimada en su abertura. (Figura 2. 2)



Item	Designation	Item	Designation
1	Fiber	4	Telescope
2	Collimator	5	Replaceable holder with protective glass
3	Isolator	6	Protective glass (beam exit opening)

Figura 2. 2. Sistema de colimación del láser

Las primeras pruebas realizadas fueron mediante un láser rojo de baja potencia (633 nm) para observar el movimiento del haz, aunque sin realizar grabado. Posteriormente, para las primeras pruebas de grabado, se utilizó un láser de fibra pulsado en infrarrojo (1064 nm), modelo SLD6005Q de GSI Lumonics y de potencia 15W, del que se disponía en el Grupo de Tecnologías Fotónicas, y con el que ya se pudieron empezar a realizar pruebas eliminando capa metálica.

Una vez definidos los requisitos de potencia y frecuencia de modulación necesarios para realizar un grabado adecuado sobre la capa metálica vistos en la primera parte de este capítulo, se adquirió el modelo YLP-V2-1-100-50-50, Ytterbium Pulsed Fiber Laser, S/N 23100038 de la marca IPG Photonics, cuyas características principales se encuentran en el Anexo I y son:

- Longitud de onda de emisión de 1064.8 nm
- Opera a una frecuencia entre 2-500 kHz
- Emisión en un rango de potencia entre 0 y 50 W
- Alimentación de 24 V

El láser elegido es un láser pulsado. Esto quiere decir que la luz es suministrada a intervalos, es decir, existirán pequeños momentos temporales en los que el láser no emitirá luz. Estos momentos se encuentran por debajo de un segundo. Cuando estamos utilizando un láser en modo pulsado, tendremos que tener en cuenta su potencia y su frecuencia de modulación de la señal. La frecuencia de modulación corresponde con los pulsos emitidos por segundo. Cuantos más pulsos por segundos sean emitidos, se dibujarán puntos en menor distancia, pero puede haber un mal grabado al ser menos energéticos.

En el capítulo 4 se realizarán las pruebas pertinentes para comprobar cuál es la potencia y frecuencia óptima de grabado.

Desde un ordenador se puede controlar su emisión, activando y desactivando la modulación para trazar las líneas sobre la capa metálica depositada en los vidrios, y pudiendo decidir mediante la modulación en qué momento grabar.



Item	Designation	Description
1	Fiber	Guides the laser beam
2	Air outlet grid	Air outlet for the cooling device of the product
3	Cooling device	Air cooler with protection against contact
4	Voltage supply interface	Voltage supply interface of the product
5	External interfaces	Communication interfaces
6	Optical head: Air-cooled optical isolator	Beam exit opening of the laser
7	Cabinet	Laser module cabinet

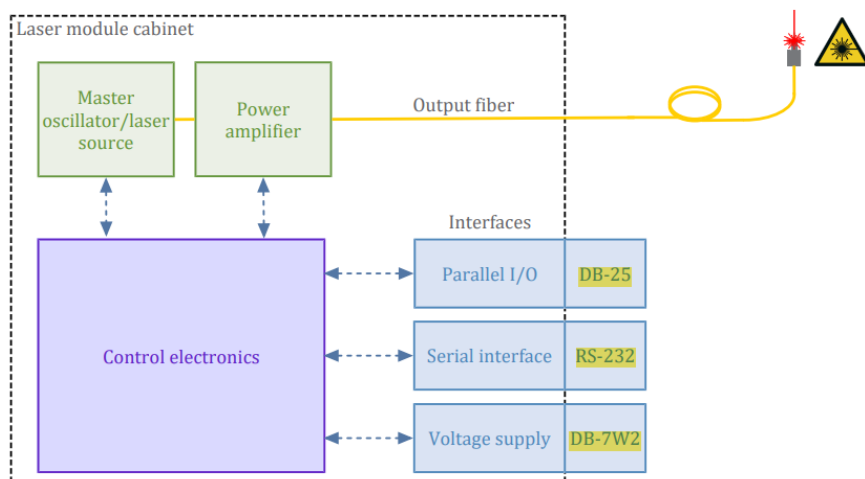


Figura 2. 3. Láser elegido

Lente de focal variable

Un problema que surge con las ventanas compuestas por vidrios con distintas capas metálicas es que se van a encontrar a distintas distancias. Para poder realizar un enfoque del haz láser sin tener que alejar y acercar todo el montaje se necesitará una lente de focal variable. Ya que el ajuste mecánico no permitiría conseguir la precisión necesaria.

La lente de focal variable se añadirá después del láser y será ajustada electrónicamente para variar la distancia del enfoque del haz láser. Será el último elemento introducido en el montaje, ya que solo se necesitará en el dispositivo final, por lo que en las pruebas realizadas en nuestro laboratorio no aparecerá.

El modelo elegido de lente ajustable ha sido el Optotune EL-10-42-OF-NIR-4D-50W. De 50 W debido a la potencia máxima del láser. Para ajustar esta lente será necesario otro dispositivo el cual ajustará la lente en función de una señal de entrada analógica. El dispositivo escogido se trata del modelo EL-E-OF-A-02.

Galvanómetro

Se va a necesitar mover el haz del láser de forma controlada para trazar los patrones de FSS que se deseen. Una técnica ampliamente utilizada en óptica consiste en emplear un galvanómetro controlado por tensión, ya que un buen control de la tensión permite alcanzar un alto nivel de precisión en el proceso. Este dispositivo estará formado por uno o dos motores, según el número de ejes, que se conectará a cada uno de los espejos que posea el cabezal del galvanómetro, moviéndose cada uno independientemente. Mediante el movimiento de los espejos se podrá controlar el haz del láser.



Figura 2. 4. Motores y espejos del galvanómetro

Se busca grabar en el máximo área posible sin moverse, lo que dependerá del ángulo del galvanómetro. Por otro lado, los espejos tendrán que ser lo suficientemente grandes como para que quepa todo el haz del láser en ellos. Por ello, se ha elegido el galvanómetro GVS002 de Thorlabs cuyo ángulo de escaneo máximo va a ser de $\pm 10^\circ$ y va a contener dos espejos de 10x8mm y 14.5x8.5mm respectivamente, como se puede comprobar en el Anexo I.

Este modelo dispone de dos motores y dos espejos para modificar la trayectoria del haz. También es compatible con una DAC de $\pm 10V$, que es la que se utilizará para que el Arduino pueda controlarlo. Además, será configurado con un factor de escala de Voltios por grado ($V/^\circ$) a $1 V/^\circ$ consiguiendo un ángulo de escaneo máximo de $\pm 10^\circ$ con el que se podrá grabar en un área de 10cm por eje.

Para su control, se empleará un Arduino junto con un conversor A/D, necesario ya que los galvanómetros operan con señales analógicas.

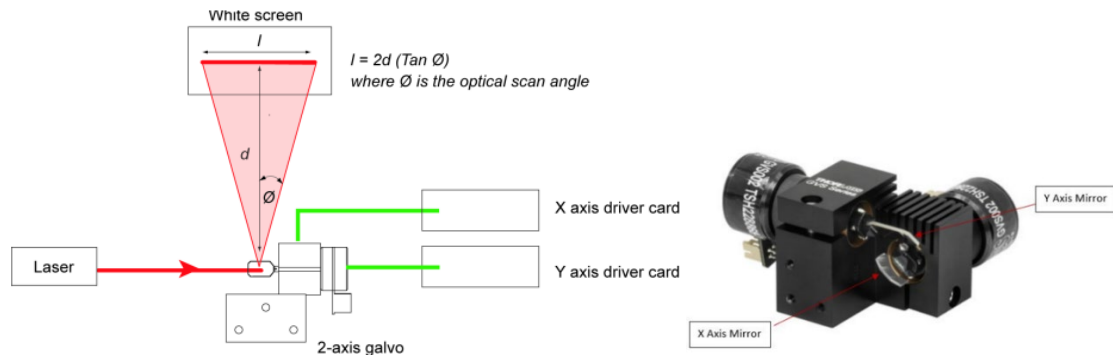


Figura 2. 5. Esquema del galvanómetro

Aunque se haya utilizado una lente f-theta (como se verá posteriormente) para evitar distorsiones proporcionando un plano de imagen plano, debido al uso de dos espejos en el galvanómetro se encontrará una distorsión en forma de “almohada”.

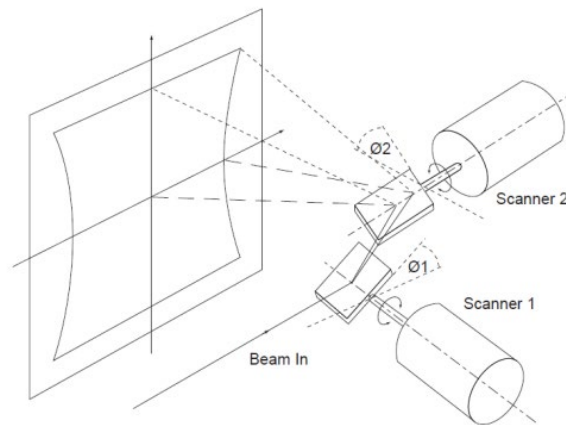


Figura 2. 6. Distorsión en forma de almohada

Esta distorsión ocurre porque la distancia entre el espejo 1 y el campo imagen depende del tamaño de los ángulos de escaneo mecánicos de los espejos 1 y 2. Cuando los ángulos de escaneo aumentan, la distancia entre el espejo y el campo de imagen también aumenta. La distancia en el campo de imagen no es proporcional al ángulo de escaneo, la distancia en el campo de imagen es proporcional a la **tangente del ángulo de escaneo**. Esto significa que, para un aumento constante en el ángulo de escaneo, el movimiento del láser en el campo de imagen no sigue una relación lineal.

Esta distorsión va a provocar que se necesite una corrección mediante software para convertir las líneas curvas proyectadas en líneas rectas, haciendo así una cuadrícula.

En los siguientes capítulos veremos dicha distorsión experimentalmente y cómo corregirla.

Lente f-theta

Va a ser necesario utilizar una lente f-theta, que es una lente estándar para los sistemas de marcado, grabado y corte láser basados en escáneres con galvanómetros.

Su característica principal es que sirve para proporcionar una imagen en un plano y con baja distorsión (Figura 2. 7. B). Se necesita una lente de escaneo plano para realizar el grabado, ya que una lente esférica solo puede generar imágenes a lo largo de una superficie esférica (Figura 2. 7. A).

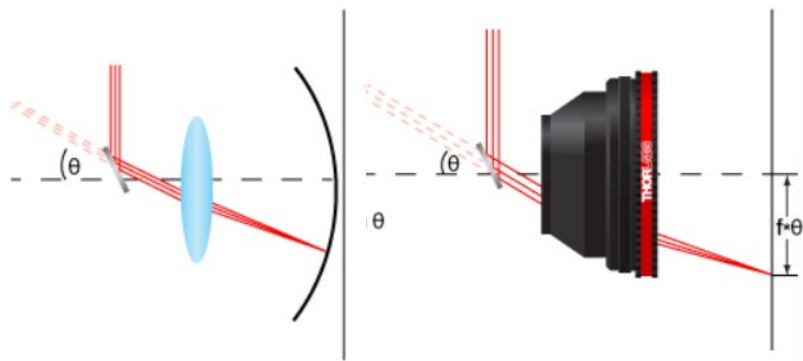


Figura 2. 7. A) Lente esférica. B) Lente f-theta

En una lente f-theta, el desplazamiento del haz de salida es igual a $f \cdot \theta$, donde θ es el ángulo de incidencia del haz de entrada (Figura 2. 7). Las velocidades angulares del haz de entrada y del haz de salida son directamente proporcionales, lo que permite que los espejos del galvanómetro funcionen a una velocidad angular constante, y simplifica enormemente la electrónica de control. En este sistema, que es de dos espejos, la pupila de entrada de la lente f-theta se colocará entre los dos espejos. Para maximizar el rendimiento de la lente f-theta, la separación de los espejos debe minimizarse.

El tamaño del punto (resolución e intensidad) es casi constante en todo el plano de la imagen.

Se busca grabar en la máxima área posible sin moverse para reducir el tiempo de grabado total de la ventana. Esto va a condicionar el sistema óptico, el galvanómetro como ya se ha comentado antes va a grabar en un área de 100mmx100mm y la lente a utilizar estará limitada por esta distancia.



Figura 2. 8. Lente f-theta seleccionada

Será necesaria una lente para una longitud de onda igual a la de emisión del láser, es decir, 1064 nm. Además, es necesario un campo de escaneo de 100 mm x 100 mm aproximadamente. Se ha elegido el modelo FTH160-1064 de Thorlabs, cuya focal es de 160 mm.

2.2. Control del sistema principal

Para controlar la parte óptica harán falta varios dispositivos (Figura 2. 9). El motor del galvanómetro y la lente variable utilizarán un conversor digital analógico para ser controlados por el Arduino. Además, se emplea una cámara para mejorar la precisión del grabado y un motor para mover el sistema en ambos ejes cubriendo una amplia área de trazado. Finalmente, mediante un ordenador se controlarán y coordinarán todos los componentes.

Las distintas conexiones entre estos dispositivos se encuentran en el Anexo I.

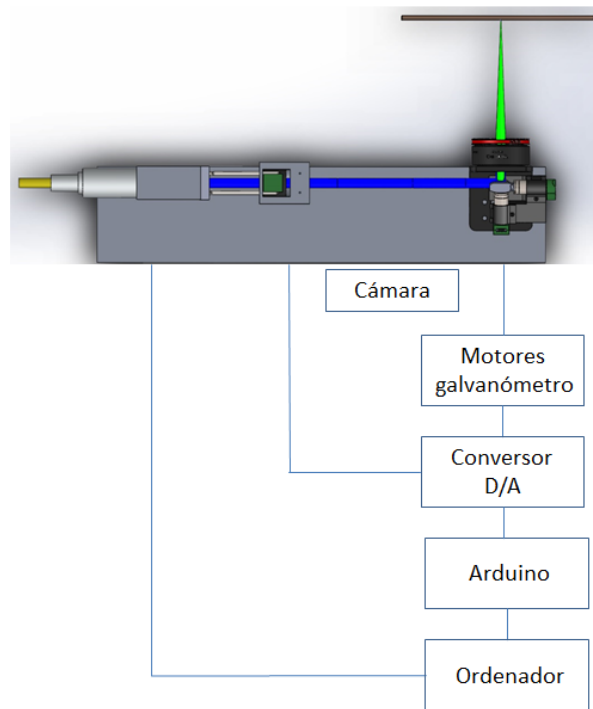


Figura 2. 9. Montaje general

Microcontrolador

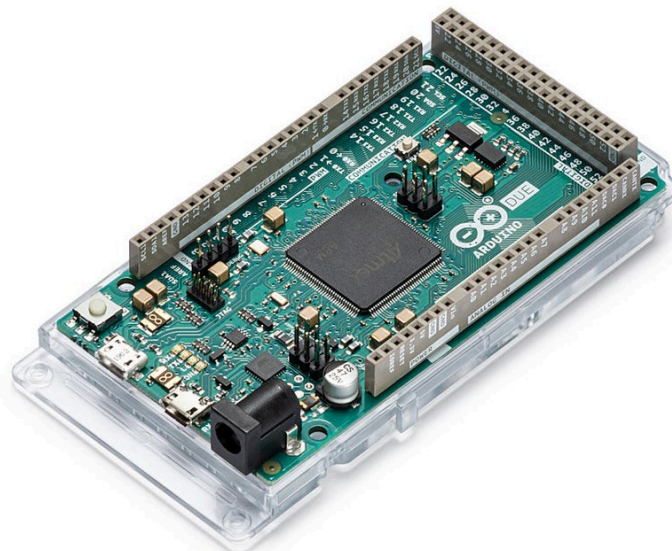


Figura 2. 10. Arduino DUE

Un microcontrolador (Arduino DUE) desempeñará un papel clave como controlador del sistema. Su función principal será gestionar los motores del galvanómetro, controlando el movimiento de los espejos que ajustan la orientación del haz láser hacia las posiciones deseadas con alta precisión. Además, el Arduino DUE también será responsable de operar la lente de focal variable, permitiendo ajustes dinámicos del enfoque según sea necesario.

Este controlador recibirá comandos desde un ordenador, que actuará como interfaz principal del sistema, enviando instrucciones para coordinar las diferentes operaciones. La elección del Arduino DUE es debida a que tiene mayor potencia, para así poder enviar rápidamente los comandos SPI a los conversores digital-analógico.

Conversor D/A

Este dispositivo actúa como un intermediario esencial entre el Arduino y el galvanómetro, la que sin él no sería posible establecer una adecuada comunicación. El sistema convierte la señal digital generada por el Arduino en una señal analógica para controlar el galvanómetro.

Como conversor digital-analógico para generar las señales que se suministran a los drivers de los galvanómetros se emplea el circuito **LTC2664** en una placa de evaluación **DC2376A**. Tiene 4 canales de 16 bits y es capaz de proporcionar señales de $\pm 10V$, justo las que necesitan los galvanómetros.

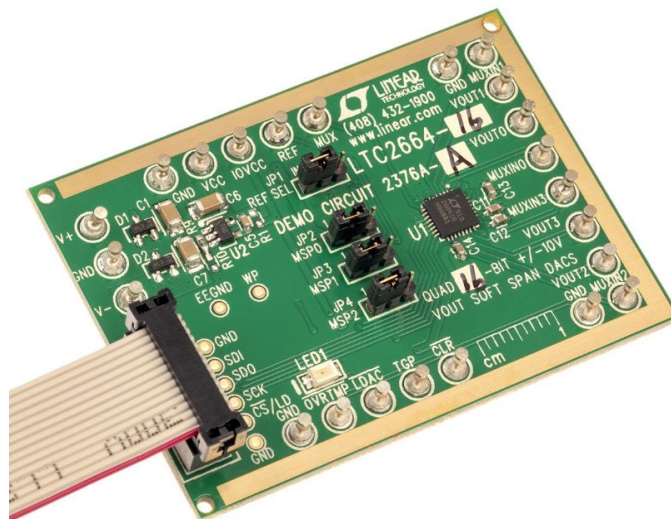


Figura 2. 11. Conversor A/D DC2376A

En este sistema, el **LTC2664** desempeña un papel fundamental, ya que no solo traduce las señales digitales del Arduino a un formato analógico compatible con los drivers, sino que también asegura que las señales tengan los niveles de voltaje correctos para el funcionamiento óptimo del galvanómetro.

Ordenador

Actuará como la interfaz principal para controlar todo el sistema y se encargará de:

- Enviar comandos al Arduino (controlador del galvanómetro) y al láser (ajustando los parámetros de grabado).
- Realizar el movimiento del motor.
- Tratar la imagen de la cámara para realizar un grabado más preciso

La interacción entre todos estos elementos va a generar gran cantidad de dificultades, que serán tratadas en los siguientes apartados de la memoria.

2.3. Otros dispositivos

Motor

Una vez se haya conseguido trazar una cuadrícula completa, se van a utilizar dos motores para realizar el grabado completo de una ventana, desplazando todo el cabezal en ambos ejes, tanto en dirección horizontal (eje X) como en vertical (eje Y). En la Figura 2. 12 se muestra el eje de movimiento X, con el que se realizaron las primeras pruebas de unión entre cuadrículas.

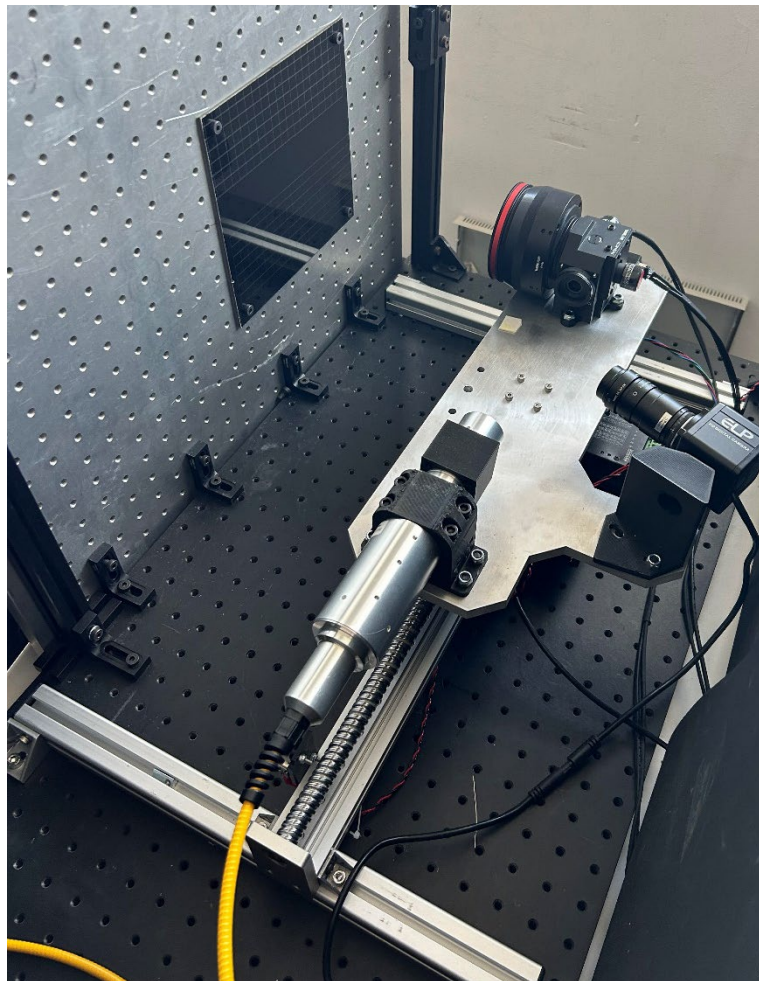


Figura 2. 12. Montaje real con el eje de movimiento en X

El proceso de grabado consistirá en tres pasos:

1. Área de grabado inicial (10 cm x 10 cm): El grabado se realiza en una sección de 10 cm x 10 cm (limitada por el galvanómetro y la lente). Esto permite trabajar en zonas pequeñas de manera más precisa.
2. Una vez completado el grabado en la sección inicial, el motor desplazará el montaje sobre el eje X (hacia la derecha) para trabajar en la siguiente sección de 10 cm x 10 cm. Esto lo realizará hasta acabar de completar el grabado de toda la fila.

3. Cuando se haya terminado de grabar toda la fila horizontal, el sistema se desplazará sobre el eje Y (hacia abajo) para comenzar una nueva fila.
4. Este ciclo se repetirá hasta cubrir toda el área de la ventana, asegurando que cada sección sea grabada de manera uniforme y precisa.

Esto nos va a permitir mayor flexibilidad, ya que se podrá ajustar el movimiento del motor en función del tamaño de la ventana.

Es importante señalar que esta parte del proyecto será desarrollada por la empresa Zepren Solutions, y, por lo tanto, no se abordará en detalle en este trabajo de fin de máster. Sin embargo, el sistema diseñado se integrará en el montaje final, formando parte de la solución completa que será comercializada.

Cámara

Como ya ha sido comentado, debido al ángulo de escaneo del galvanómetro, se va a poder grabar una malla de 100 mm x 100 mm cada vez. Pero hará falta trazar tantas como sea necesario para completar una ventana entera, por lo que se irá trazando una a una y empalmándose con las que ya estén dibujadas gracias a los motores de ambos ejes.

Para esto, será necesaria una cámara que compruebe que el grabado se ha realizado correctamente y que mediante el reconocimiento y procesado de la imagen consiga unir varias mallas entre sí hasta completar la ventana.

La cámara deberá tener la suficiente resolución como para encontrar el pixel en el que comenzar a trazar cada una de las cuadrículas. Se utilizó una cámara ELP HD Digital Camera de 2MP.

2.4. Presupuesto

Una vez, se han mencionado todos los elementos del sistema que se van a utilizar se podrá obtener un presupuesto aproximado del costo total. Aunque la parte mecánica, salvo el motor, no ha sido empleada en este trabajo de fin de máster, se hará referencia a ella más adelante, ya que formará parte del prototipo final. De igual manera, se incluirá la RAC, que integrará tanto el ordenador como las fuentes de alimentación del sistema.

Dispositivo	Precio
Láser	12.835,04
Lente	859,54
Galvanómetro	2.134,28
Arduino DUE	50,78
Conversor D/A	85,38
Optotune	3041
Mecánica	5000
RAC	3500
TOTAL	27.506,02

CAPÍTULO 3. SOFTWARE DE CONTROL DEL EQUIPO

En este capítulo se va a explicar cómo realizar la comunicación entre el ordenador y los distintos dispositivos del sistema para conseguir el grabado deseado.

3.1. Control de la emisión, potencia y frecuencia del láser

Para trazar las FSS se va a necesitar tener en cuenta qué potencia y frecuencia de modulación del haz pulsado son suficientes para hacerlo. Además, va a ser necesario controlar cuándo se graba y cuándo no para obtener la estructura de FSS que se desee en cada momento. En nuestro caso, al tratarse de cuadrículas, se dejará de grabar cada vez que se realice una línea y se pase a la siguiente.

Para una conmutación rápida, es conveniente tratar de mantener siempre activa la emisión del láser, mientras que la modulación va a ser lo que se activará según sea necesario para grabar o no. Al apagar la modulación, el láser no funciona en régimen pulsado y su potencia de salida es muy baja, con lo que no se produce grabado. Esto puede controlarse de dos maneras:

La primera será controlando directamente el láser, mandando un comando de texto desde el ordenador por puerto serie (RS-232). También se podrá controlar mediante una entrada digital (conectada al puerto DB-25 del láser), con la que se manejará el encendido y apagado de la modulación del láser de una manera más rápida y eficiente cómo se verá en el siguiente capítulo. Se usará una salida digital del Arduino en esta entrada para sincronizar los movimientos del galvanómetro con el grabado de los patrones de FSS. El código se encontrará en el Anexo II.

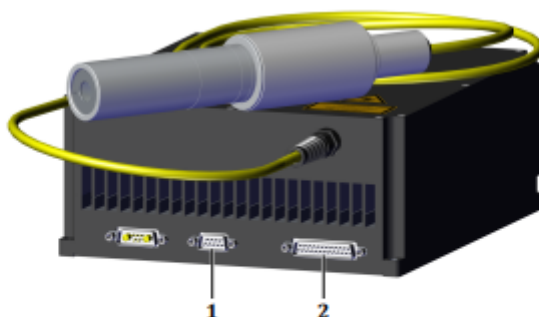


Figure 9: External interfaces, taking as example the lasers up to 50 W

Item	Designation	Item	Designation
1	Serial interface (RS-232)	2	Parallel I/O (DB-25)

Figura 3. 1. Interfaces externas del láser

Por RS-232:

Tipo	Comando	Código del comando	Descripción	Equivalente a la línea de control DB-25
Set	Laser Emission ON	30	Encender la modulación	EM
Set	Laser Emission OFF	31	Apagar la modulación	EM
Set	EE ON	42	Encender la emisión	EE
Set	EE OFF	43	Apagar la emisión	EE
Set	Guide Laser ON	40	Encender el láser rojo	RG
Set	Guide Laser OFF	41	Apagar el láser rojo	RG

Set	Set PRR	28	Establece la frecuencia de repetición del pulso en khz	Sync
Set	Operating Power	32	Establece la potencia en [%] Rango 0...100, resolución de 255 niveles para la escala completa	D0-D7 & Latch

Tabla 1. Comandos

Por otro lado, para controlar manualmente la modulación, encender y apagar la emisión y el láser de prueba y poder modificar la potencia y frecuencia de operación utilizaremos los comandos de la Tabla 1. para que se comunique el ordenador y el láser directamente mediante un comando de texto por RS-232.

Por DB-25:

19	EM	Emission Modulation (EM) input. HIGH: Emission ON LOW or disconnected: Emission OFF	full control
23	AuxOFF	Auxiliary Emission OFF input. HIGH: OK (Normal operation) LOW or disconnected: STOP (Laser automatically switches OFF all optical stages)	enable/disable

Para encender y apagar la modulación (EM) mediante una conexión digital serán necesaria una salida digital del Arduino. El objetivo de hacerlo así es mejorar los tiempos de espera entre el trazado de varias líneas seguidas, como veremos en los siguientes capítulos.

Otra entrada digital que se utilizará será AuxOFF, que servirá para poder poner un botón de emergencia y cortar de golpe cualquier tipo de emisión por parte del láser. Esto será útil para garantizar la máxima seguridad y no dañar la salud del operario.

3.2. Control galvanómetro y láser mediante Arduino

Como se explicó anteriormente, el controlador del sistema será un microcontrolador Arduino, que gestionará los movimientos necesarios para trazar los patrones de las FSS. El Arduino, a través de la interfaz SPI (Serial Peripheral Interface), comunicará al convertidor digital-analógico (DAC) el voltaje que este debe enviar al galvanómetro o al Optotune para su control.

En el caso del galvanómetro, el rango de control se establece entre $\pm 10V$. Dado que el DAC utilizado tiene una resolución de 16 bits, puede generar 2^{16} niveles de voltaje, es decir, 65,536 niveles en total, de los cuales uno representa el 0V y el resto se distribuye de manera uniforme entre -10V y +10V.

Por otro lado, el Optotune opera en un rango de voltaje de 0 a 5V. Aunque la DAC sigue teniendo 16 bits de resolución y, por lo tanto, 65,536 niveles, en este caso solo se utiliza un rango parcial del total, correspondiente a los valores entre 0 y 5V. Esto resulta en $5/20 \times 65,536 = 16,384$ niveles efectivos, ya que el resto de los niveles fuera de este rango no se utilizan.

Todos los comandos tienen la forma $X_{n1}_{n2}_{...}$ donde X es la letra que representa el comando y $n1, n2, ...$ los parámetros (enteros salvo en el caso del comando P). El código se encontrará en el Anexo III.

Comando	Parámetros	Descripción
Número de serie (S)	Ninguno	Devuelve un número que identifica al Arduino
Emisión (E)	1 o 0	Encender o apagar la modulación del láser
Mover (M)	Coordenada en X1 Coordenada en Y	Mover el láser a un punto concreto (X, Y)
Línea horizontal (X)	Coordenada X0 Coordenada X1 Número de puntos que forman la línea	Trazar una línea horizontal desde el punto X0 hasta el X1
Línea vertical (Y)	Coordenada Y0 Coordenada Y1 Número de puntos que forman la línea	Trazar una línea vertical desde el punto Y0 hasta el Y1
Línea arbitraria (L)	Coordenada X0 Coordenada X1 Coordenada Y0 Coordenada Y1 Número de puntos que forman la línea	Trazar una línea desde el punto ($X0, Y0$) hasta el ($X1, Y1$)
Tiempo de espera de las líneas (W)	Espera inicial (ns) Espera final (ns)	Cambiar el tiempo de espera al principio y al final de una línea (para evitar la formación de puntos)
Corrección (C)	1 o 0	Activar o desactivar la corrección de la distorsión del galvanómetro
Parámetros de corrección (P)	16 parámetros tipo double (el punto decimal es .)	Cambiar los 16 parámetros para realizar la corrección (4 por cuadrante)
Optotune (O)	Entero [0 16383]	Cambia la focal de la lente introduciendo un voltaje de 0 a 5V

Tabla 2. Comandos Arduino

Para trazar las FSS, se enviarán desde el Arduino los comandos para trazar cada una de las líneas. También se utilizarán distintos comandos como el del tiempo de espera y los de corrección para mejorar la precisión de trazado de esas líneas, como se explicará en el capítulo 4.

Además, el Arduino también controlará la modulación del láser, activando y desactivando la emisión a través de la entrada digital (DB-25). Este mecanismo es fundamental para garantizar que solo esté encendido durante el grabado en las zonas deseadas, lo que permitirá evitar líneas no deseadas durante los movimientos de reposicionamiento del haz del láser.

3.3. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica del prototipo se ha realizado en Visual Studio, concretamente en el lenguaje de programación C#, véase el código en el Anexo II.. Se utilizó para realizar las primeras pruebas del grabado de líneas, cuadrículas y de encadenar cuadrículas como se verá en el Capítulo 4.

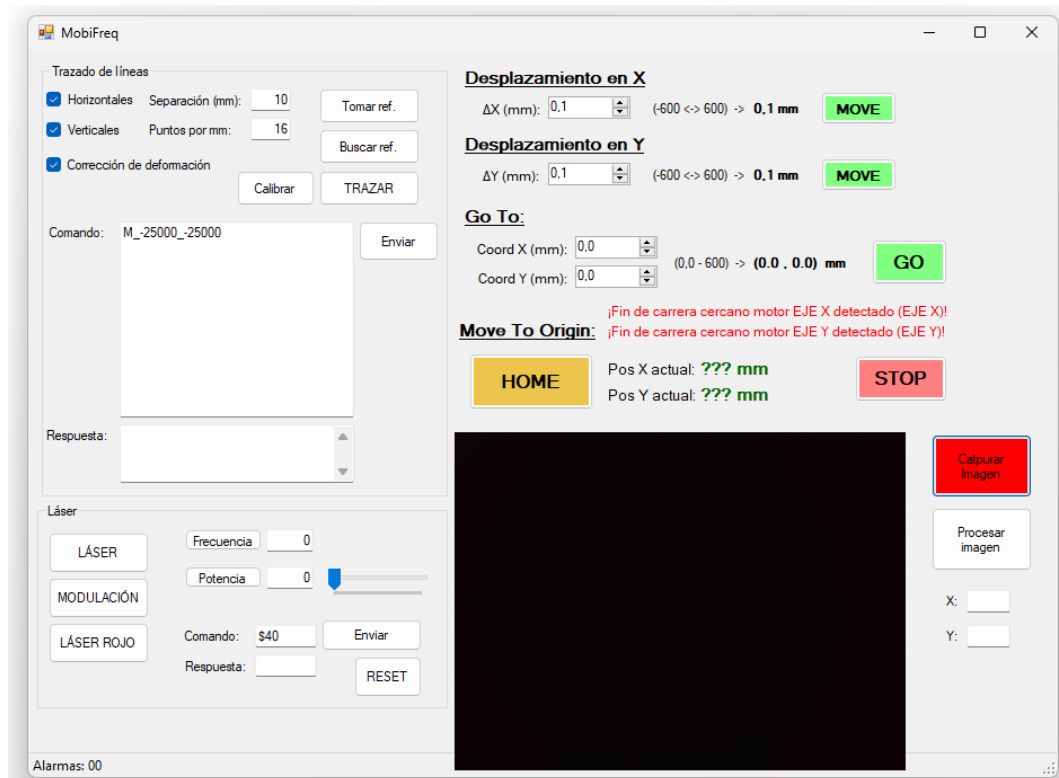


Figura 3. 2. Interfaz gráfica

La interfaz ha sido dividida en 4 bloques principales:

1. **Trazado de líneas:** Realiza el trazado de líneas horizontales y verticales, permitiendo así generar cuadrículas con las especificaciones deseadas.
2. **Láser:** Este bloque permite encender y apagar tanto el láser principal como el láser rojo de referencia, además de ajustar la modulación y otros parámetros iniciales. Estas funciones son esenciales para realizar pruebas preliminares, ajustar la potencia y frecuencia del láser, y garantizar que el sistema esté listo para operar de manera segura.
3. **Procesado de la imagen:** Diseñado para facilitar el encadenamiento de varias FSS mediante el uso del motor para ajustar el posicionamiento del cabezal. Captura la imagen de donde empieza a trazar el láser la cuadrícula y la procesa para asegurar una correcta alineación entre las cuadrículas contiguas trazadas.
4. **Motor:** Controla el desplazamiento en los ejes X e Y, así como mover el sistema al origen o detenerlo en cualquier momento. Después de trazar una cuadrícula, este módulo asegura un movimiento preciso para posicionar el cabezal y unir las cuadrículas mediante el procesamiento de imágenes.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE GRABADO LÁSER

4.1. Generación de las tramas

El trazado de las líneas se consigue suministrando una rampa de tensión analógica (entre -10 y +10V) a los ejes del galvanómetro. Esa rampa se genera mediante un conversor digital-analógico conectado por SPI al Arduino. Los “**puntos**” son el número de niveles de tensión en los que se discretiza cada tramo de línea trazado. Dado que el conversor es de 16 bits, existen 65535 diferentes valores, que equivalen aproximadamente a 100 mm de grabado tanto para el eje X como para el Y. El número de puntos por milímetro en que se discretiza la línea afecta linealmente a la velocidad de trazado de las líneas.

Las muestras utilizadas son vidrios monolíticos (acristalamientos formados por un solo vidrio) en los que en una de sus caras se ha depositado capa metálica. Mediante el láser diseñado, se trazarán las FSS retirando la capa metálica.

En todos los casos, la incidencia se realiza por la **cara vidrio** de la muestra, la que no tiene capa metálica. Todas las pruebas realizadas se hicieron sin lente de focal variable ni motor, ya que estos serán necesarios más adelante, cuando tengamos más de un monolítico, es decir, una ventana completa y queramos grabar en mayor área del vidrio.

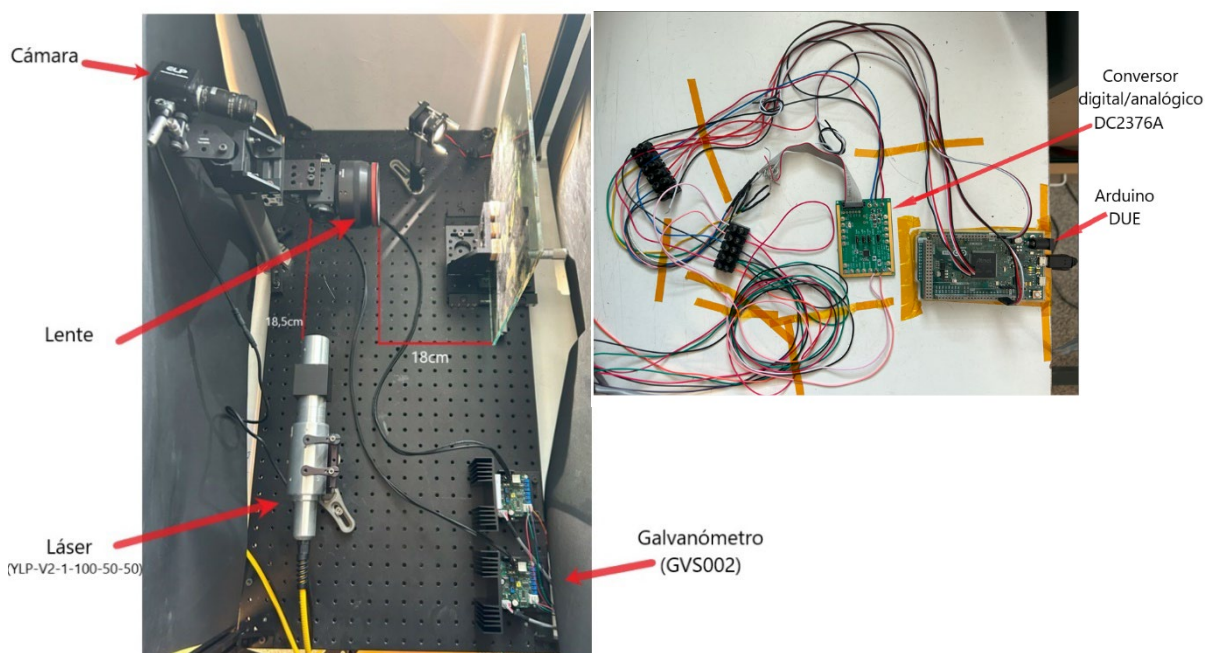


Figura 4. 1. Prototipo inicial del sistema de grabado

4.2. Grabado de líneas

En este apartado, se va a realizar el ajuste de los parámetros necesarios para realizar el grabado. Para obtener un buen grabado se va a buscar retirar la capa completamente de cada línea trazada mediante el láser para conseguir que funcione correctamente la FSS trazada. Además, que las líneas estén lo mejor dibujadas posible sin observarse los puntos ni huecos que impidan la correcta transmisión de la señal. También se buscará que las líneas tengan un aspecto similar a las de la máquina de planta y que el grabado se realice en un tiempo similar a esta.

A partir de las siguientes pruebas, se determinarán la potencia, la frecuencia y el tiempo óptimos para maximizar la eficiencia del diseño de la máquina portátil.

Potencia

Las primeras pruebas realizadas fueron variando el nivel de potencia de emisión del láser y trazando de líneas verticales y horizontales con las siguientes características:

Prueba	Número de líneas	Puntos/mm	Potencia	Frecuencia
1	20	16	0 a 19%	50kHz
2	21	16	0 a 100%	50kHz
3	21	40	0 a 100%	50kHz

Tabla 3. Resumen de las pruebas de potencia realizadas

Todas las pruebas de potencia se realizaron a una frecuencia de 50 kHz. Para esta primera prueba, se trazaron un total de 20 líneas, separadas por 0.3mm entre sí. Estas líneas se grabaron con un barrido completo de tensión en el eje X (de65.535 niveles), seleccionando la parte central de la región de grabado para el eje Y.

La densidad utilizada fue de 16 puntos por milímetro y se varió la potencia de **0 a 19%** (0 a 9.5W) con una resolución del 1% (20 líneas).

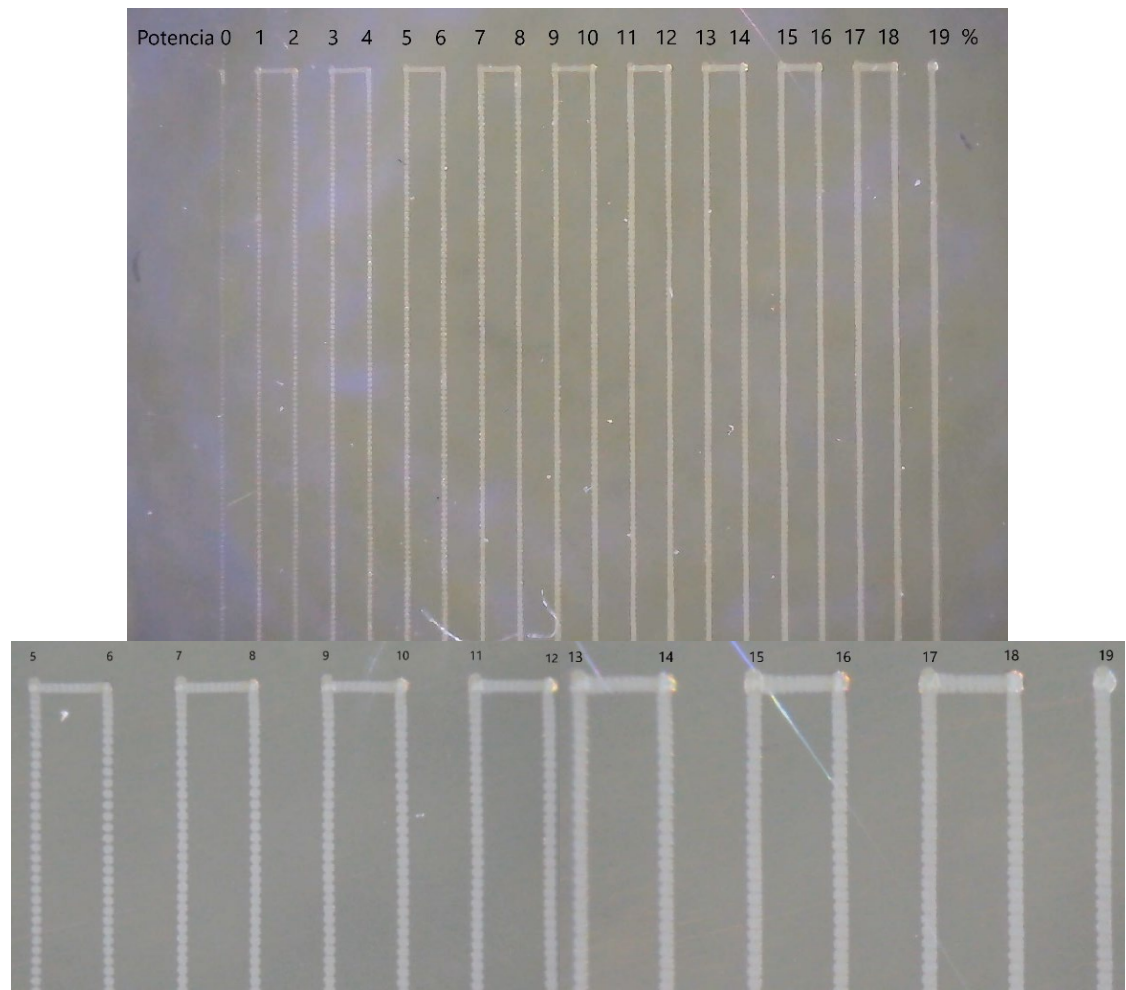


Figura 4. 2. Imagen del barrido en potencia (0-19%) con 16 puntos/mm

A menor potencia, menor es el tamaño de los puntos. Entre el 0-8% se pueden apreciar los puntos a lo largo de la línea. A partir del 9% de potencia ya se solaparían los puntos formando la línea. Como se puede comprobar, para un 19% de la potencia total aún se distinguen ligeramente los puntos, por lo que en las siguientes pruebas se varió la potencia entre el **0-100%**.

Se realizó una segunda prueba, en la que solo se modificó la potencia de grabado, incrementándola hasta el 100% de la potencia del láser (Tabla 3), que corresponde con 50 W.



Figura 4. 3. Imagen del barrido en potencia (0-100%) con 16 puntos/mm

Para 16 puntos/mm (Figura 4. 3) todavía se observaban los puntos que componen la línea independientemente de la potencia suministrada, por lo que para la última prueba se aumentó el número de puntos por milímetro a **40**, manteniendo el resto de los parámetros fijos:

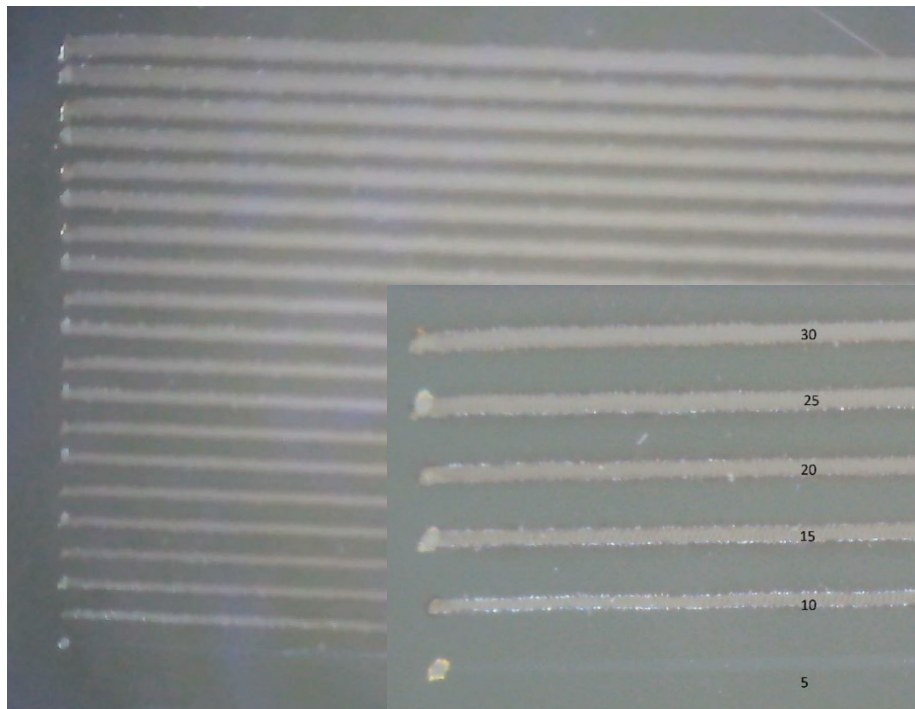


Figura 4. 4. Imagen del barrido en potencia (0-100%) con 40 puntos/mm

En este caso, al aumentar la densidad de puntos y disminuir la velocidad, se puede comprobar cómo a partir del 20% de la potencia total ya se obtendrá un buen trazado de las líneas. Con esta prueba se puede concluir que la potencia a la que se tracen las líneas no va a afectar tanto como el **número de puntos por milímetro** con el que las trazamos. Aumentar la potencia se traduce en aumentar el **grosor** de la línea (entre 20 y 118 μm), por lo que no hará falta una potencia muy elevada para realizar un buen grabado.

Densidad (niveles entre puntos o puntos/mm)

Ahora se van a realizar distintas pruebas modificando el número de puntos por milímetro, ya que hemos visto que esto es lo que más influye a la hora de trazar las líneas.

Prueba	Número de líneas	Puntos/mm	Potencia	Frecuencia
1	12	0 a 22	10% (5 W)	50kHz
2	16	25 a 40	20% (10W)	50kHz
3	16	12 a 27	20% (10 W)	100kHz
4	16	12 a 27	40% (20 W)	100kHz

Tabla 4. Resumen de las pruebas de densidad

En la primera de ellas se utilizó una frecuencia de 50kHz, una potencia del 10% y se realizaron 12 líneas variando el número de puntos por milímetros de cada una de ellas entre **0 y 22 puntos/mm**.

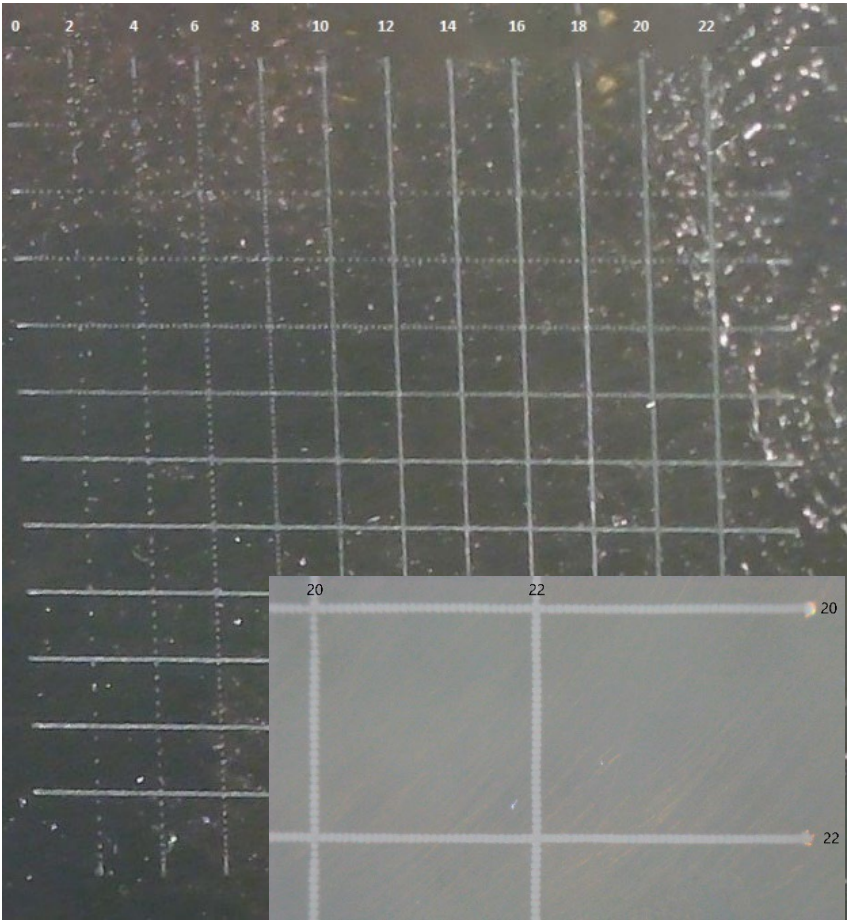


Figura 4. 5. Imagen del barrido en densidad de 0 a 22 puntos por mm

Al aumentar el número de niveles por milímetro la línea trazada se aproximará más a una línea continua. Se puede ver en la imagen en vertical, de izquierda a derecha, cómo al aumentar el número de niveles por milímetro de 0 (primera línea vertical) a 22 (última línea vertical) se van juntando más los puntos que componen la recta. Sin embargo, hay que destacar que **el número de puntos grabados no corresponde con el número de niveles**, sino con la frecuencia de pulsado del láser (50 KHz). Cambiar el número de niveles hace que el barrido sea más o menos rápido y cambia por tanto la separación espacial entre los puntos correspondientes a los pulsos de 50 KHz.

Por tanto, la rampa de tensión que se genera tiene **resolución suficiente** como para no provocar saltos en el movimiento del galvanómetro y que este sea continuo a lo largo de la recta trazada.

Para obtener una línea correctamente trazada se realiza un barrido más amplio de la densidad de niveles **desde 25 a 40**, aumentando así el número de líneas trazadas a 16 y incrementando también la **potencia al 20%**.

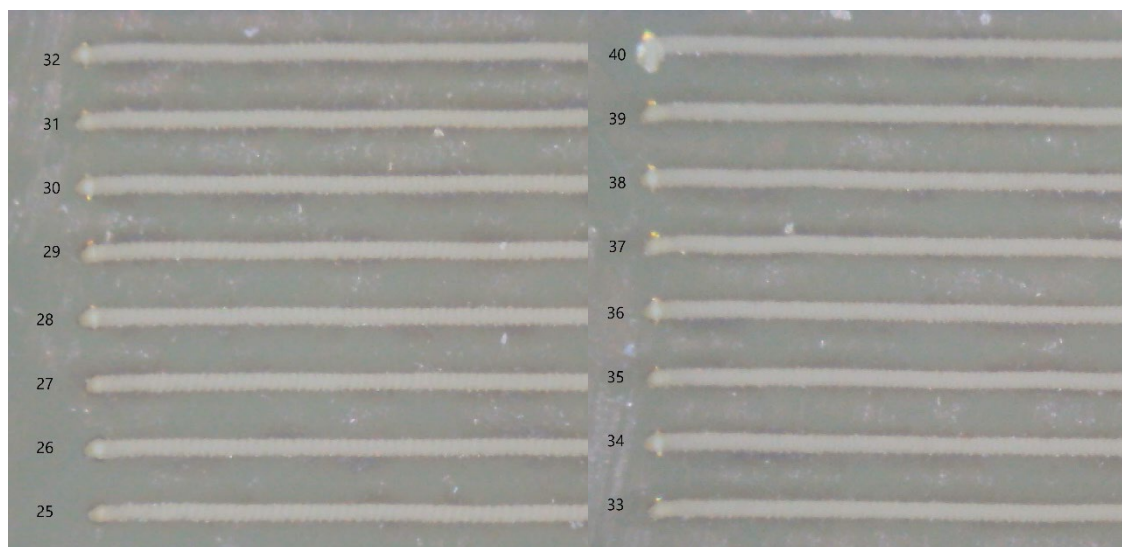


Figura 4. 6. Imagen del barrido en densidad de 25 a 40 puntos por mm

A partir de 32 puntos por milímetro ya se empiezan a obtener buenos resultados. La velocidad para este número de puntos por milímetro es de 1136 mm/s, como se podrá comprobar en la gráfica del barrido en tiempo que se comentará posteriormente.

Por otro lado, realizar un trazado con frecuencia 50KHz y 32 puntos/mm debería ser equivalente a realizarlos con una frecuencia de 100kHz y 16 puntos/mm, como se comprobará a continuación. Para ello, se ha realizado un barrido **de 12 a 27 puntos/mm** (16 líneas) a **100KHz**.

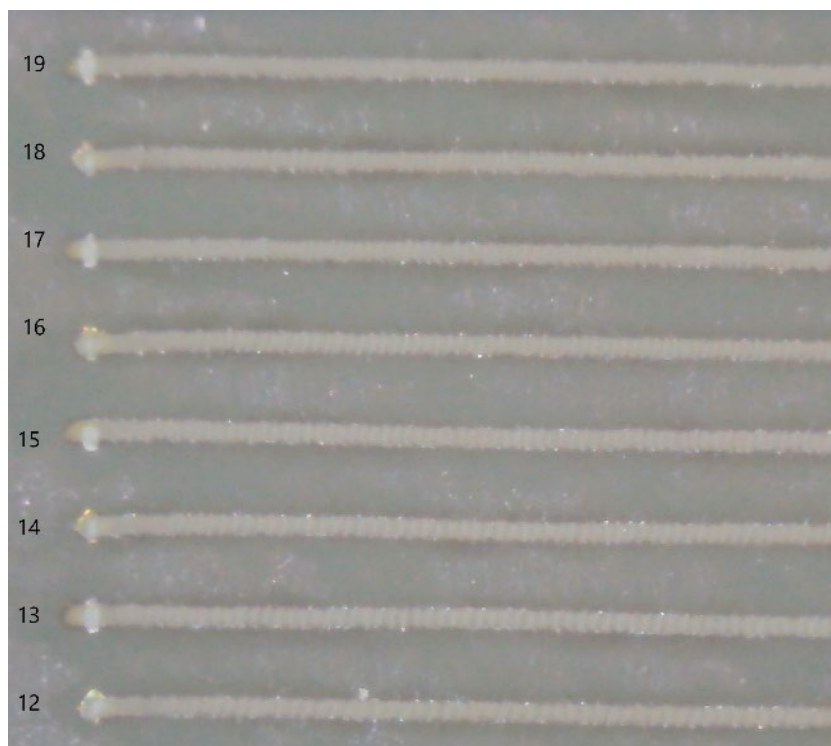


Figura 4. 7. Imagen del barrido en velocidad desde 12 a 27 puntos/mm a 100 KHz

En la Figura 4. 7 se comprueba como para 16 puntos/mm a 100 kHz es similar a realizar el mismo trazado de línea que a 32 puntos/mm y la mitad de potencia.

Por último, para el mismo barrido en velocidad, se decidió aumentar la **potencia al 40%**.

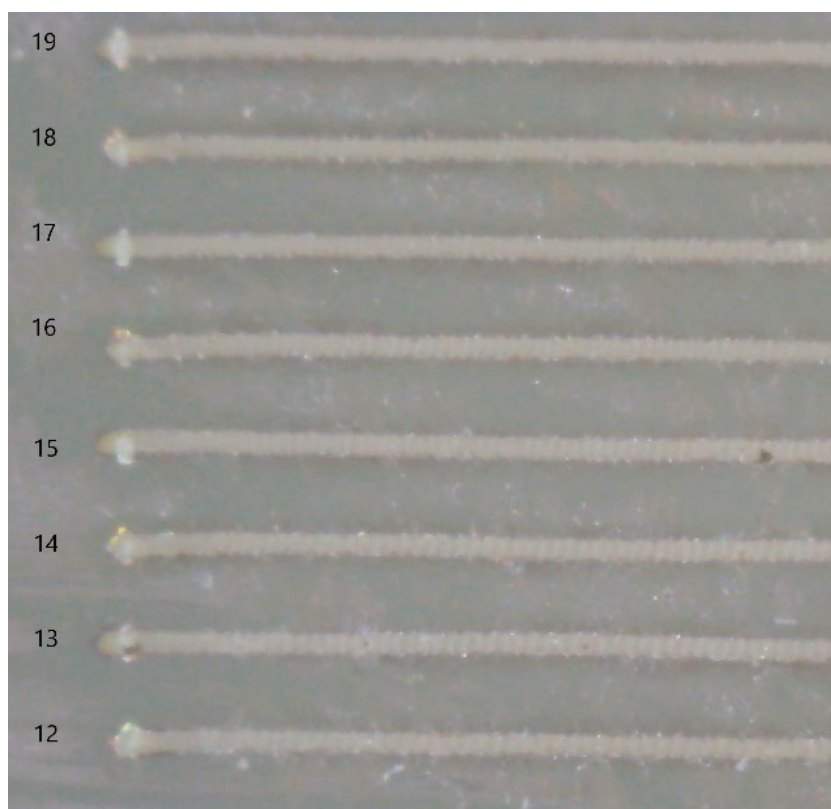


Figura 4. 8. Imagen del barrido en velocidad desde 12 a 27 puntos/mm

Se comprueba en la Figura 4. 8 de nuevo como el aumentar la potencia no influye tanto en el trazado de las líneas porque el 20% de potencia ya era suficiente. Lo que más afecta es la velocidad a la que se graban.

Tiempo de grabado

Se va a estudiar el tiempo de grabado de mil líneas de 100 mm en cada caso. Para ello se va a ir incrementando el número de puntos por milímetro y se irá mirando en cuánto tiempo se realiza cada línea, así obtendremos la velocidad en mm/s.

Las pruebas realizadas se hicieron con líneas horizontales y verticales y las siguientes características de grabado:

Prueba	Puntos/mm	Potencia	Frecuencia
1	1 a 32	0% (no se realiza grabado)	50kHz

Tabla 5. Resumen de las pruebas de tiempo de grabado

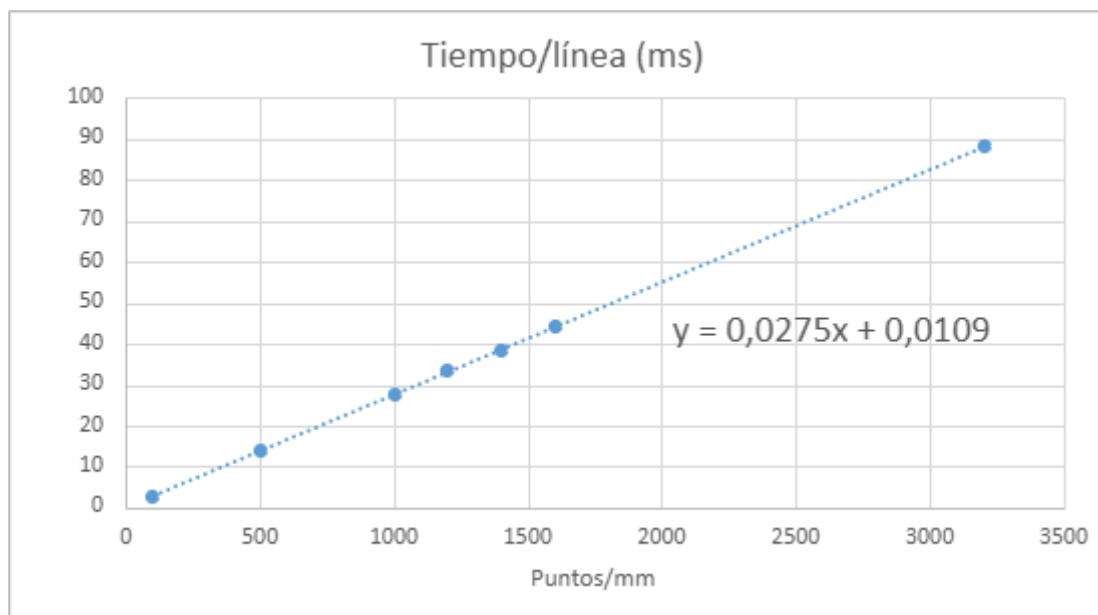


Figura 4. 9. Tiempo de barrido en función de la densidad de niveles

A medida que aumentamos el número de puntos en que se divide cada línea, el tiempo de trazado crece linealmente como se observa en la Figura 4. 9 (se tarda 27.5 μ s en trazar cada punto).

Por ejemplo, una medida que se pudo comprobar en apartados previos fue que con 16 puntos por milímetro (1600 puntos/línea) ya se obtenía un trazo correcto de la línea. Para este valor se realiza una línea en 44 ms. Esto corresponde a una velocidad de 2273 mm/s (Figura 4. 10).

Estas medidas demuestran que, en el rango de densidades de niveles utilizado para el grabado, el Arduino y el conversor digital-analógico SPI tienen una velocidad suficiente para acompañar el movimiento del galvanómetro a las velocidades requeridas. Sí que se ha observado que la inercia mecánica del galvanómetro provoca que su movimiento lleve cierto retraso con respecto a la rampa de tensión que se le suministra.

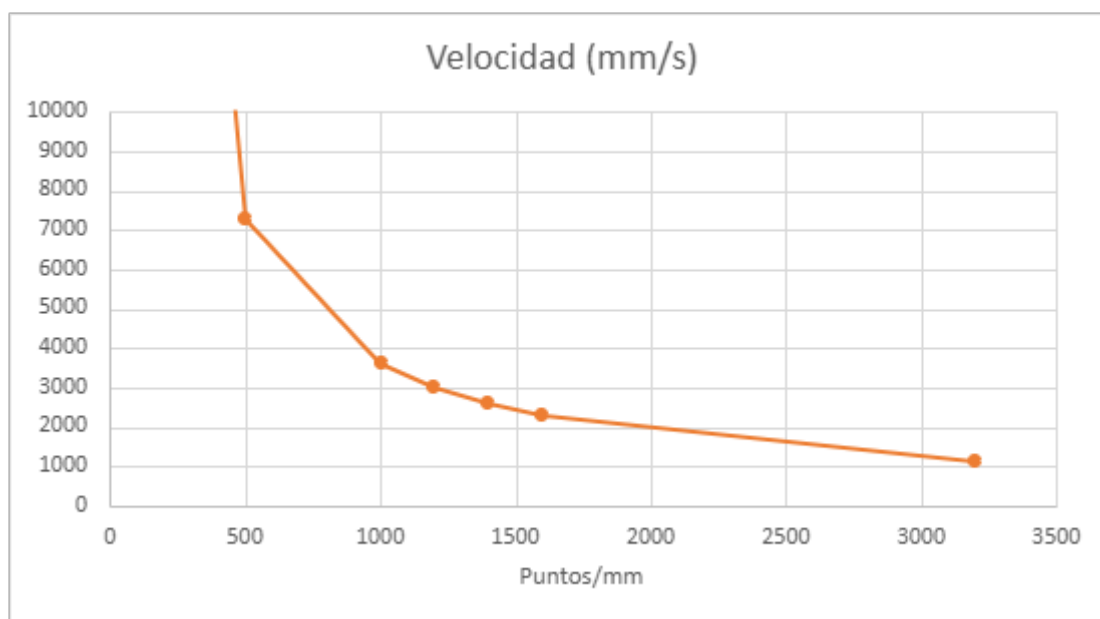


Figura 4. 10. Velocidad en función de la densidad de niveles

Frecuencia

En el apartado de cambio de densidad de puntos ya se pudieron ver los resultados obtenidos a una frecuencia de 100kHz (Figura 4. 11).

Prueba	Puntos/mm	Potencia	Frecuencia
1	12 a 27	40%	100kHz
2	12 a 27	40%	150kHz

Tabla 6. Resumen de las pruebas de frecuencia

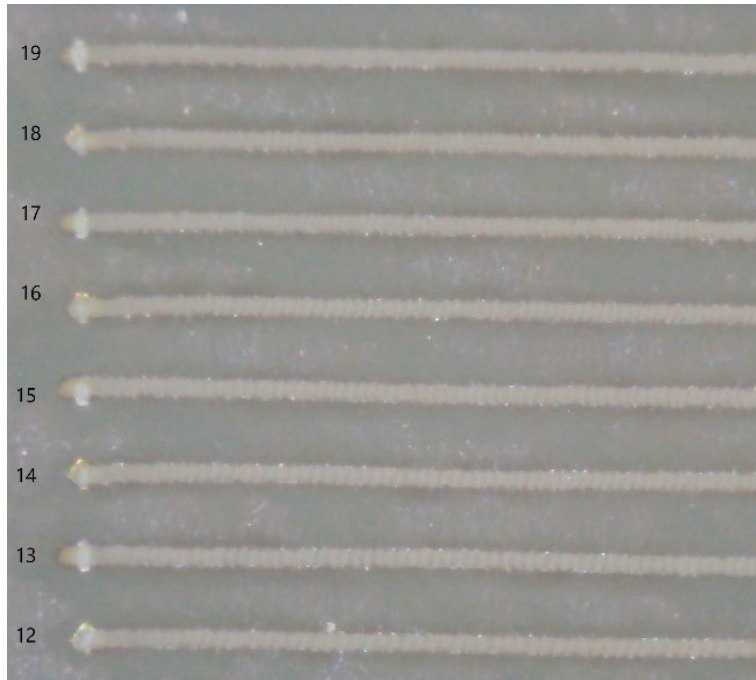


Figura 4. 11. Imagen del barrido en densidad (12-27 puntos/mm) a 100kHz

Posteriormente, se incrementó la frecuencia del láser a 150KHz, ya que es la utilizada en la máquina de planta con velocidades de unos 2000 mm/s. A esta frecuencia se obtuvieron los siguientes resultados:

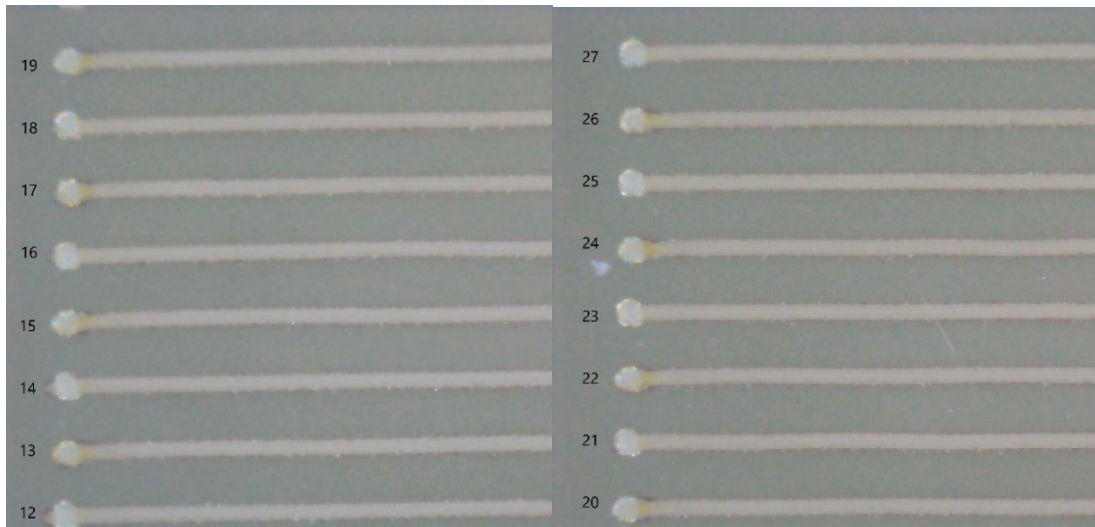


Figura 4. 12. Imagen del barrido en velocidad desde 12 a 27 niveles/mm

Se puede observar como con estos parámetros se consigue grabar correctamente. Además, es posible obtener un buen grabado para velocidades superiores a las de la máquina de planta (de 12 a 16 puntos/mm, que equivalen a velocidades de 3000 a 2000 mm/s). Por esto, las siguientes pruebas ya fueron realizadas con los parámetros óptimos de grabado (Tabla 7).

Parámetros elegidos	Puntos/mm	Potencia	Frecuencia
1	16	30%	150kHz

Tabla 7. Parámetros de grabado

Al inicio de cada una de las líneas (Figura 4. 12) se crea un punto de mayor grosor, debido a que el movimiento real del galvanómetro lleva retraso con respecto a los cambios de nivel de tensión realizados por el Arduino. El láser se enciende al comenzar la rampa, pero el galvanómetro empieza a moverse más lentamente debido a su inercia mecánica. Esta inercia también provoca que se tracen líneas indeseadas cuando se quiere mover el galvanómetro antes de grabar la línea siguiente (Figura 4. 13).

De la misma forma, al acabar las líneas el láser se apaga antes de que el galvanómetro haya terminado su movimiento, provocando que las líneas se interrumpgan antes de tiempo (línea roja en la Figura 4. 13).

Esto puede corregirse haciendo que el Arduino controle el láser mediante una salida digital (conectada al puerto DB-25) en lugar de hacerlo desde el PC por puerto serie consiguiendo así encender y apagar la modulación del láser al instante y posibilitando su sincronización con el movimiento.

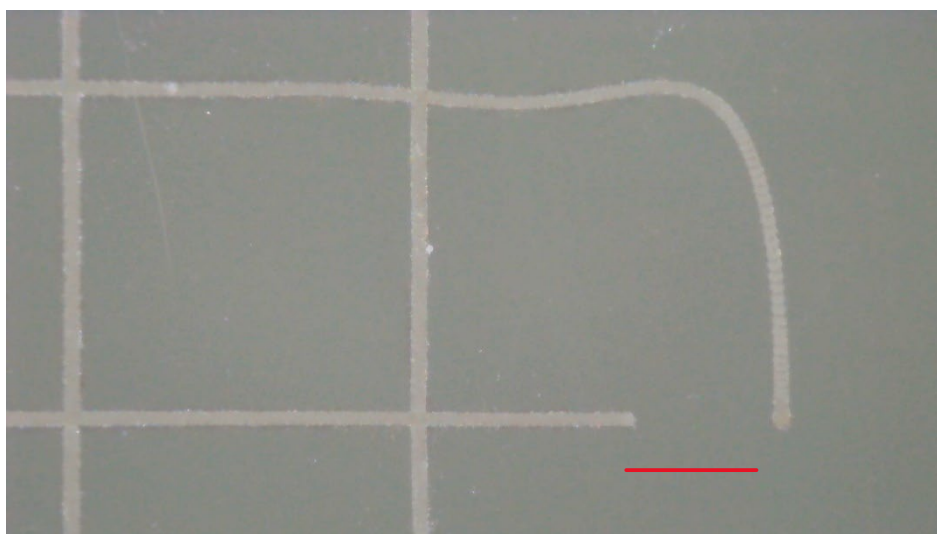


Figura 4. 13. Retraso entre rampa de voltaje y movimiento real

Además de apagar y encender la modulación mediante una salida digital hará falta introducir tiempos de espera antes de encender o apagar el láser, para asegurarse de que acaba de trazar la línea completa. Al encender y apagar mediante la salida digital no habrá retrasos de tiempo y el grabado se podrá realizar correctamente. En nuestro caso se introdujo un tiempo de espera adecuado midiendo los tiempos con el osciloscopio, utilizando las salidas del galvanómetro que indican su posición real.

En la Figura 4. 14 se observa en verde la rampa generada por la DAC, que corresponde con la señal enviada al galvanómetro cada vez que realiza una línea de izquierda a derecha y viceversa. Por otro lado, la línea amarilla muestra la diferencia entre la posición real del galvanómetro y la que debería tener según la tensión que recibe (línea verde).

En la primera gráfica, se comprueba que al finalizar o iniciar el trazo de cada línea ocurre un adelanto o retraso. Esto se evidencia al analizar la rampa generada por la DAC (línea verde): durante las subidas o bajadas de la rampa, la diferencia con respecto a la señal del galvanómetro (línea amarilla) permanece prácticamente constante pero cuando cambia de una a otra no. Por lo tanto, no se acumulan retrasos mientras se realiza el trazado de una línea, sino únicamente al iniciar una nueva.

En la segunda figura, se puede apreciar como el galvanómetro va con retraso, lo que hará que el láser se apague demasiado pronto (línea recta amarilla por debajo de 0). Luego tardará 300 μs en ponerse en la posición correcta, está un tiempo corto en esta posición (línea recta por 0) y finalmente, se retrasará otros 300 μs al comenzar la línea en la dirección contraria, lo que hará que el láser grabe un punto más grueso al inicio (línea recta por encima del 0).

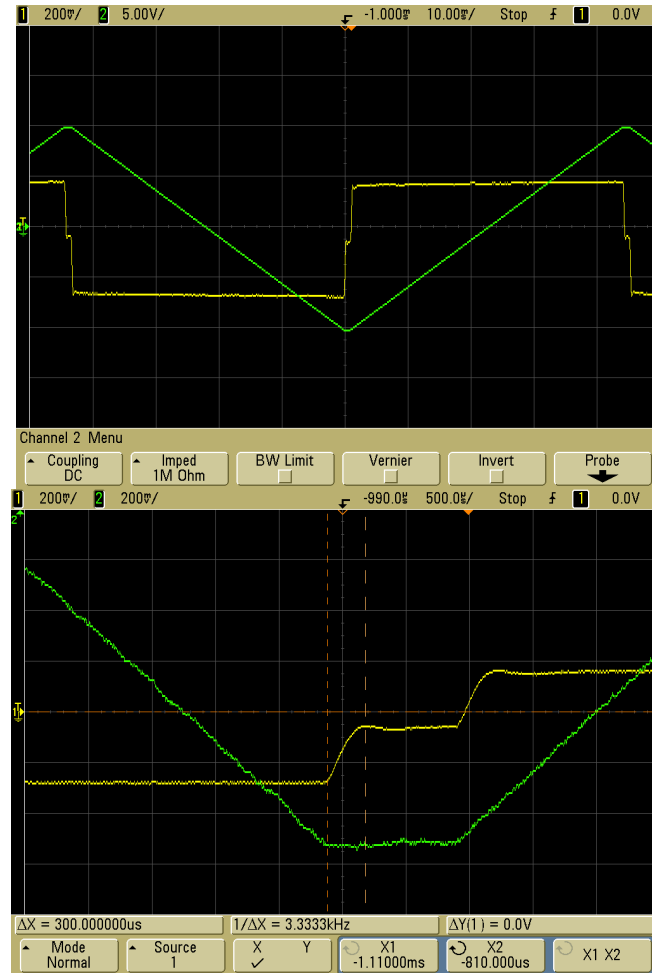


Figura 4. 14. Retraso medido con el osciloscopio

Área de marcado y uniformidad

Con las características seleccionadas, se van a trazar líneas de 65535 niveles de longitud para evaluar la uniformidad del grabado en toda la superficie útil (10x10 cm)



Figura 4. 14. Grabado en toda la superficie útil

Se ha grabado en toda la superficie útil a una frecuencia de 150kHz, con la potencia al 30% del máximo(15W) y una densidad de 16 puntos/mm. Se puede apreciar un grabado uniforme, exceptuando los bordes debido a que la lente limita el grabado en estas zonas, por lo que el área de grabado útil real será de 8cm x 8 cm.

El grabado se realiza en 65535 niveles y se ha obtenido un grabado total de 110,55 mm en horizontal y 93mm en vertical, por lo que aproximadamente cada milímetro corresponde a 562 niveles de tensión (previamente se había utilizado una estimación de 650 niveles/mm) que se habían configurado en el programa de trazado, obteniéndose un error del 10%.

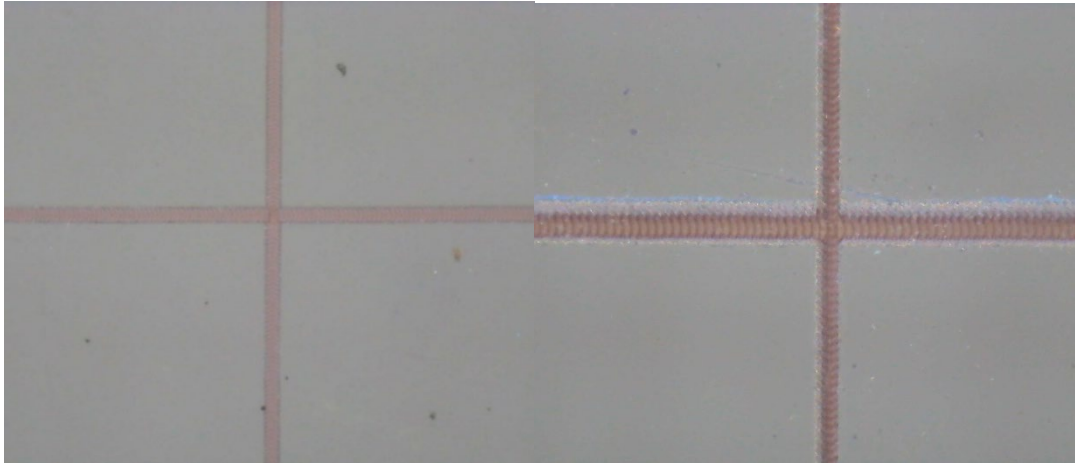


Figura 4. 15. Comparación con el grabado de la máquina de planta de Ariño (derecha)

Con estos parámetros de grabado se ha conseguido trazar líneas sin puntos distinguibles. Además, como se aprecia en la imagen, se obtiene un trazado similar o mejor al de la máquina de planta de Ariño.



Figura 4. 16. Comparación grabado líneas

En la imagen anterior se observan tres líneas grabadas en la misma capa metálica y con los mismos parámetros: una frecuencia de 150 kHz y una velocidad cercana a 2000 mm/s. La primera línea se ha grabado con nuestro láser desde la cara vidrio de la muestra, la segunda fue realizada en la máquina de planta, y la tercera línea fue grabada incidiendo con nuestro láser desde la cara capa. En la tercera línea se aprecian depósitos de metal quemado, que resultan en un tono más oscuro en comparación con las otras líneas.

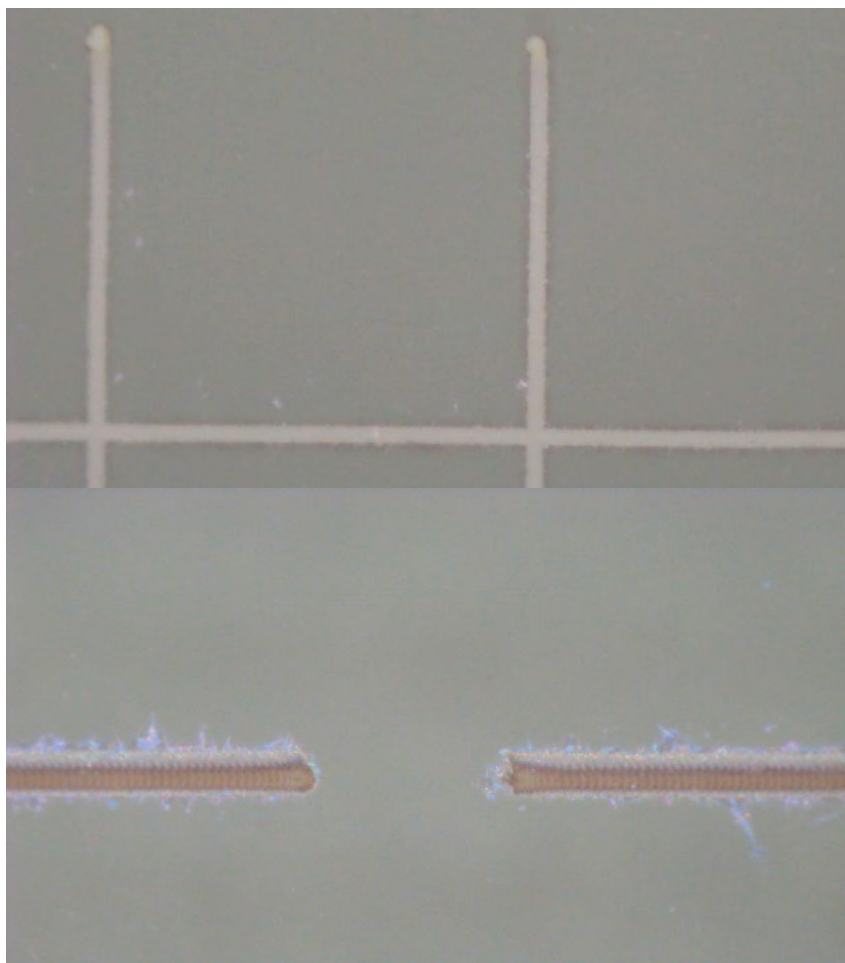


Figura 4. 17. Punto final de línea con nuestro sistema (imagen superior) y el de planta (inferior)

También se consiguió corregir el punto que se formaba al inicio y al final de cada una de las líneas debido al retraso del movimiento del galvanómetro (utilizando la solución de introducir un pequeño tiempo de espera antes del encendido y apagado). El resultado es comparable al obtenido con la máquina de planta.

Por tanto, con estas pruebas de potencia, frecuencia y tiempos se han podido ajustar los parámetros para conseguir grabar uniformemente varias líneas sin observar puntos a lo largo de ella. En los siguientes apartados se comprobará si se puede trazar ya una malla entera sobre la capa metálica depositada en un vidrio y qué problemas han surgido al hacerlo.

4.3. Grabado de una cuadrícula

Distorsión en forma de barril y almohada

Además de realizar el grabado sobre vidrios monolíticos, también se llevaron a cabo trazados sobre Dibond®, un material compuesto que combina dos capas de aluminio con un núcleo sólido de polietileno, lo que facilita su visualización. Al realizar el trazado de la malla sobre un vidrio o Dibond® se observaron distorsiones en forma de barril (en dirección vertical) y almohada (en horizontal) hacia el límite del campo de la imagen, lo que afectaba negativamente a la calidad de la marca, como se puede observar en la Figura 4. 18.

Se verificó que estas distorsiones eran debidas no a desalineamientos del sistema óptico ni a un funcionamiento incorrecto de la lente f-Theta sino al propio galvanómetro, que produce una distorsión inevitable, debida a su diseño, al proyectar líneas sobre un plano.[5]

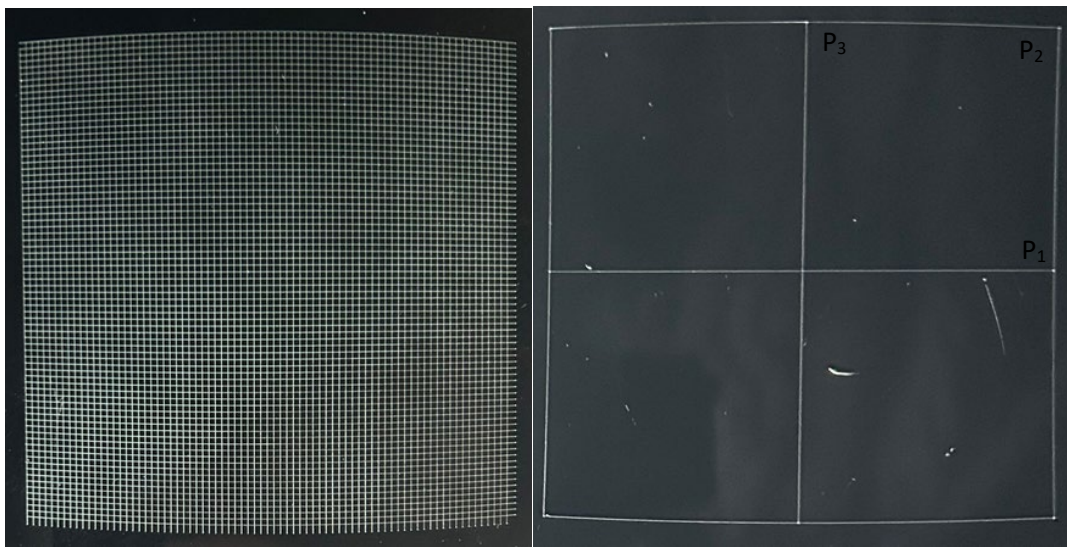


Figura 4. 18. Malla sin corregir

Para corregir este efecto, se ha utilizado el procedimiento descrito en [5], que consiste en la corrección de esta distorsión (supuesta simétrica) mediante un ajuste polinómico de segundo grado. El proceso implica marcar el cuadrado original y medir la posición de tres puntos no alineados con la mayor precisión posible (Figura 4. 18). Con estas medidas se establece una función de compensación para el sistema, que corrige la distorsión para obtener una cuadrícula recta (Figura 4. 19).

Aun así, la primera corrección resultó insuficiente, dado que la distorsión introducida por el galvanómetro no era exactamente simétrica. Por ello, se optó por calcular los coeficientes de distorsión de manera independiente para cada uno de los cuatro cuadrantes de la imagen midiendo la posición de 9 puntos, lo que proporcionó mejores resultados.

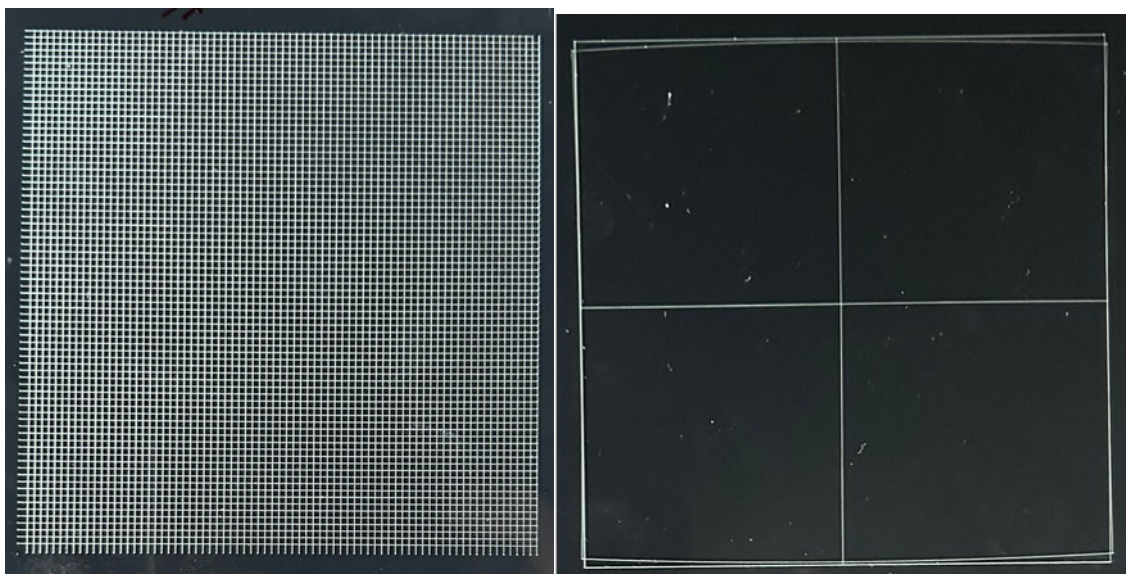


Figura 4. 19. Malla corregida y comparación

En este método es crítico conseguir una medida lo más exacta posible de las posiciones de los puntos utilizados en la corrección. Para lograrlo, la opción más fiable fue tomar imágenes de microscopio de una regla de precisión pegada junto a las líneas a medir.

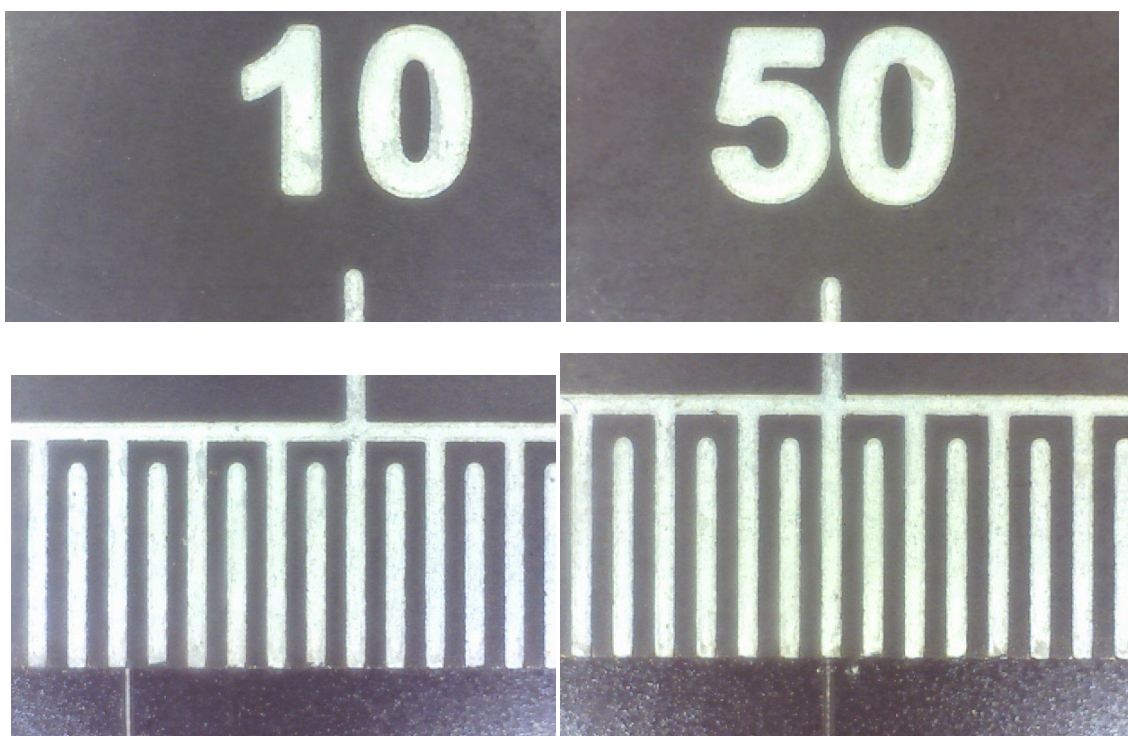


Figura 4. 20. Medida de las posiciones de los puntos para la calibración del galvanómetro

Está previsto también implementar esta calibración de forma automática, utilizando un sistema de marcas y cámara similar al descrito en el apartado posterior para medir las posiciones de los puntos y calcular los polinomios de corrección. Esta calibración necesita el sistema de movimiento en dos ejes, por lo que en este proyecto no se han realizado pruebas de este tipo.

4.4. Grabado de varias cuadrículas

Distorsión debida al alineamiento del motor

Una vez corregida la deformación de la cuadrícula, se procedió a unir varias entre sí utilizando solamente el motor del eje X, el único disponible de momento



Figura 4. 21. Error por la unión entre cuadrículas

Al unir varias cuadrículas seguidas, como en la Figura 4. 21, se observaba que no encajaban perfectamente unas con otras, debido a pequeños desalineamientos del motor con los ejes de trazado, lo que provoca desplazamientos verticales y que la distancia horizontal recorrida por el motor no coincida con la anchura de la malla trazada.

Para evitar esto se diseñó un proceso consistente en trazar marcas de señalización en posiciones conocidas y localizarlas con ayuda de una cámara, para posteriormente corregir la posición del motor mediante dichas marcas (Figura 4. 22).

Primera fila

1. El primer paso consiste en trazar una pequeña marca en forma de **cruz** o de un cuarto de cruz en la esquina superior izquierda del trazado de la cuadrícula y encontrar en la imagen de la cámara en qué píxel (x_0 , y_0) está el vértice o el centro de la marca.
2. Se **traza** la cuadrícula tomando como referencia dicho punto y se acaba la cuadrícula trazando la nueva referencia para la fila inferior, antes de mover el motor.
3. Se mueve el **motor** la distancia necesaria para trazar una nueva cuadrícula. La esquina superior derecha, que será la referencia, puede no estar en la posición de referencia de la cámara.
4. Se busca la esquina y se mueve el motor hasta que la posición en la cámara de esa esquina coincida con la posición en cámara que tenía la marca inicial.
5. En este momento ya se puede volver a trazar la segunda malla.

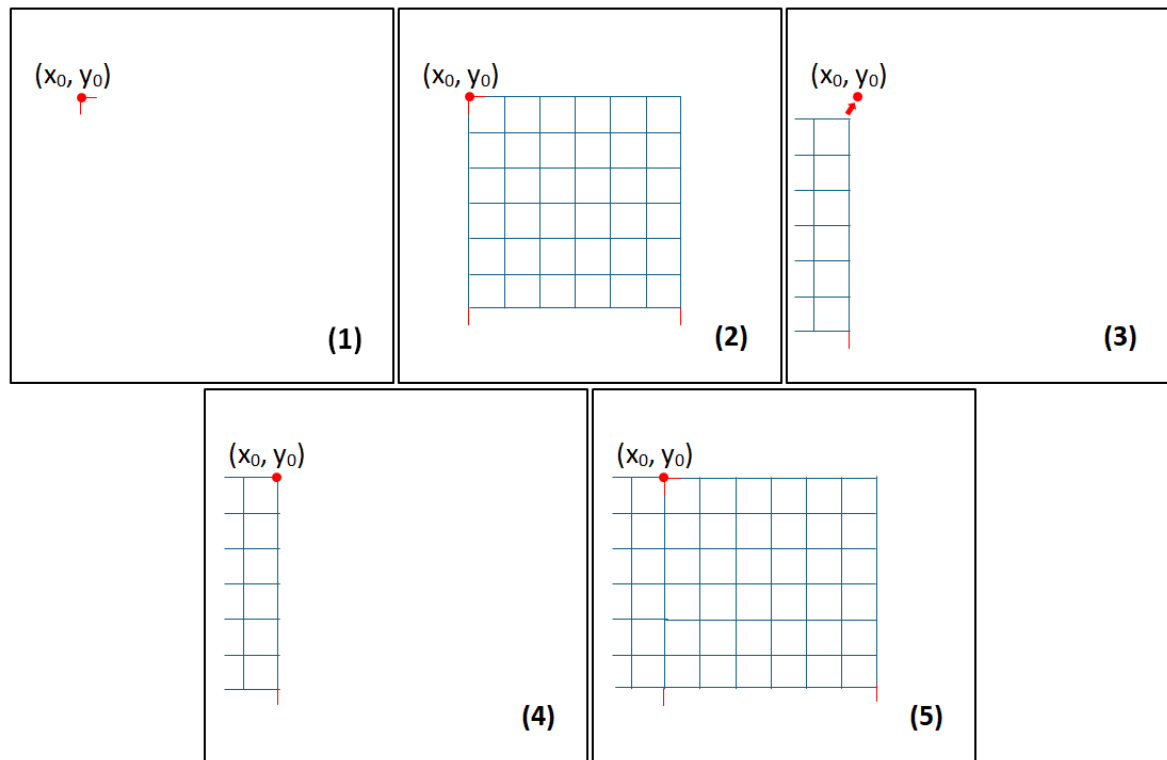


Figura 4. 22. Pasos del grabado

Los pasos 3-5 se repiten hasta trazar toda la primera fila de la ventana. Con una marca en la parte inferior derecha de la malla puede alinearse la segunda fila de cuadrículas.

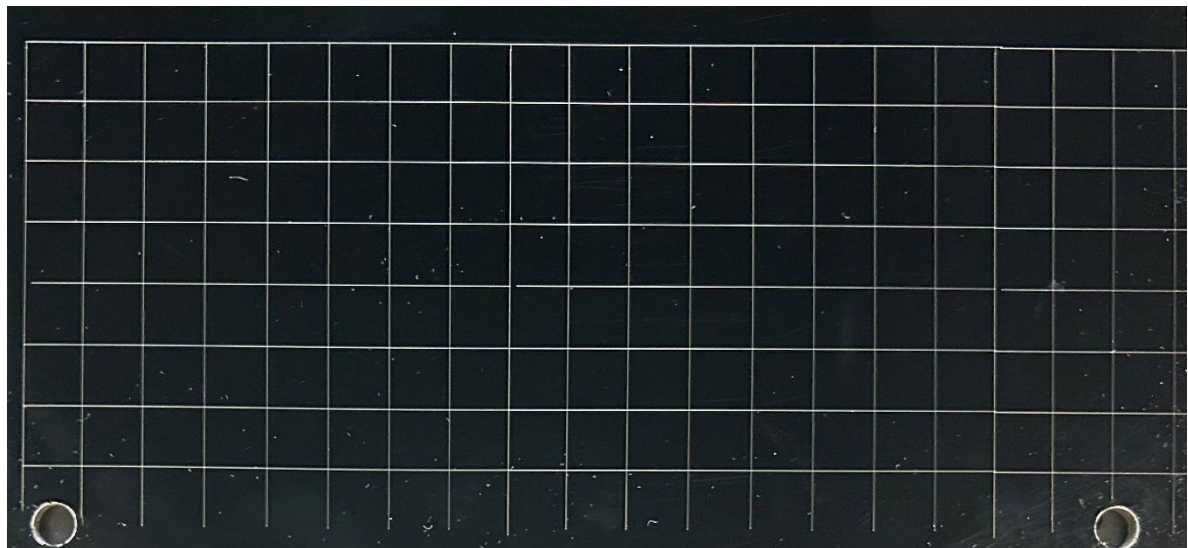
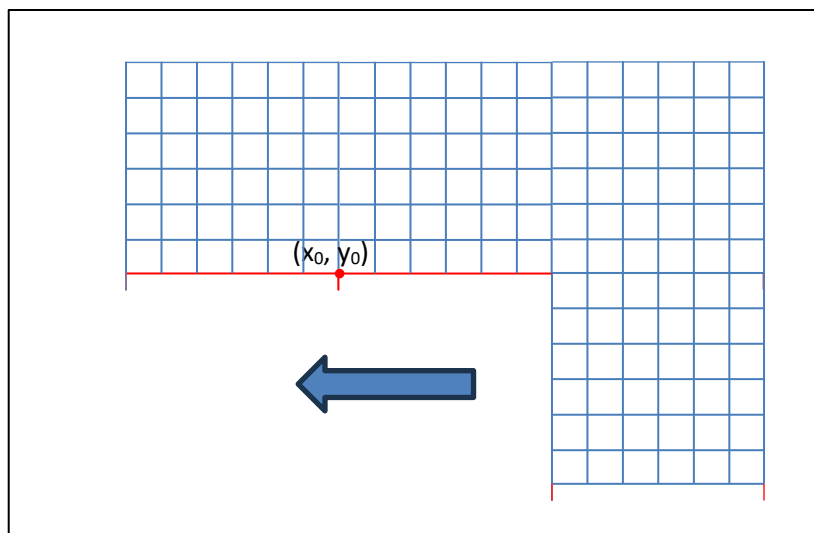


Figura 4. 23. Corrección de la unión de tres mallas

En la Figura 4. 23 se muestra un ejemplo del trazado de tres mallas utilizando este proceso (con el alineamiento realizado solamente en el eje X).

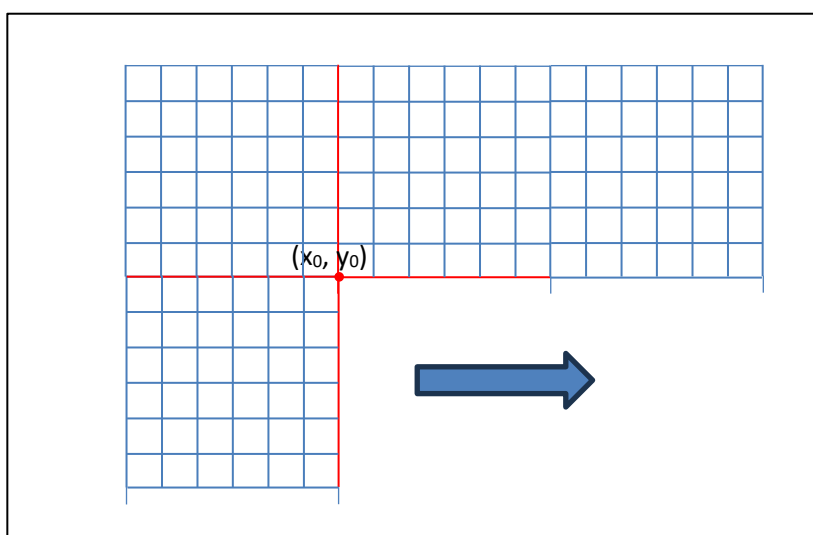
Fila grabada hacia la izquierda

En este caso se utilizarán como referencia la última línea horizontal y la marca vertical grabadas en la fila previa.



Fila grabada hacia la derecha

En este caso se utilizarán como referencia la última línea horizontal de la fila previa y la última línea vertical de la cuadrícula anterior.



Procesado de la imagen

Para encontrar las distintas marcas en forma de 'L' creadas, se utilizará una cámara realizando un procesamiento de las imágenes capturadas.

Para ello, se utilizará la transformada de Hough que servirá para detectar líneas, utilizando la representación paramétrica de una línea: $\rho = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)$

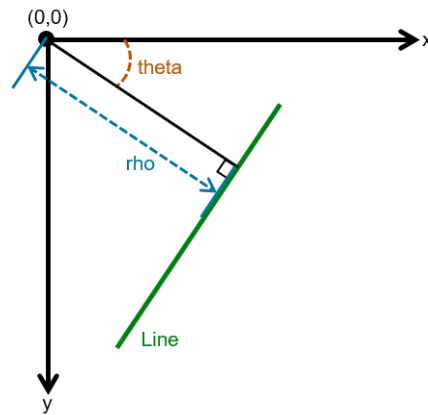


Figura 4. 24. Transformada de Hough

La variable rho es la distancia desde el origen hasta la recta a lo largo de un vector perpendicular a la recta. Theta es el ángulo entre el eje x y este vector. Cada punto (x,y) se transformará en el espacio de hough en (ρ, θ) . La función Hough genera una matriz del espacio de parámetros cuyas filas y columnas se corresponden con estos valores rho y theta, respectivamente. Una vez realizada esta transformación de la imagen, las coordenadas rho y theta donde más puntos coincidan corresponderán con rectas presentes en la imagen.

En la Figura 4. 25 (1) se observa la imagen de la unión entre varias cuadrículas y qué líneas han sido detectadas con la transformada de Hough en color verde. En rojo se observa la línea más larga detectada.

En la Figura 4. 25 (2) se encuentra la transformada de Hough, en la que se marcan con cuadrados las líneas más relevantes de la imagen original. En el eje x se representa θ y, en el caso de esta cuadrícula, los picos más detectados están en $\theta = -80, -10, 80$.

Normalmente estarán en 0° y 90° ya que corresponderá con líneas verticales y horizontales, pero ahora como están inclinadas salen esos valores.

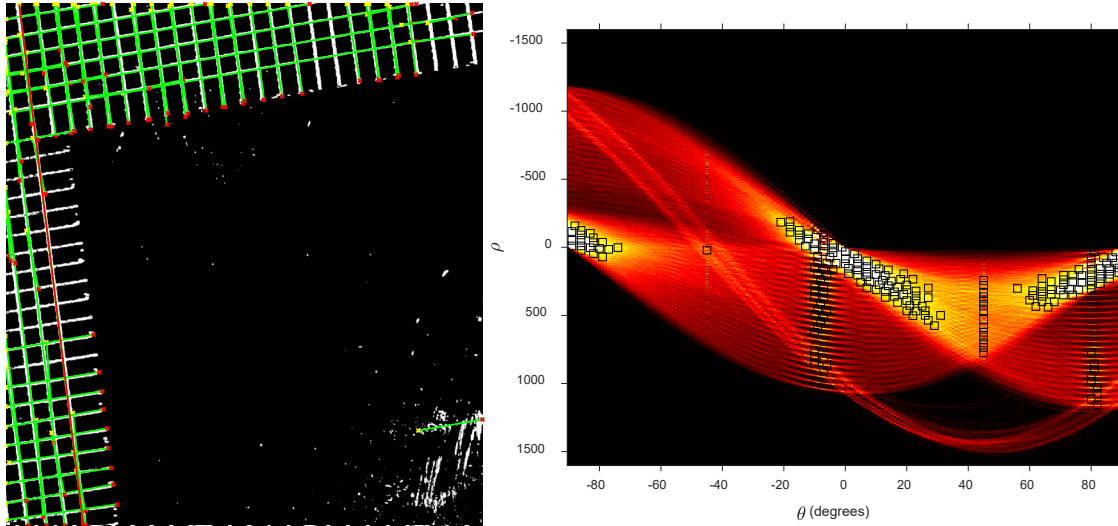


Figura 4. 25.(1) Líneas encontradas con hough, (2) Transformada de hough

Una vez entendido el funcionamiento de la transformada, se realizó el procesamiento de una imagen de una cámara con el sistema en funcionamiento.

Antes de comenzar el grabado de la ventana, se traza una primera 'L' que se localizará utilizando este algoritmo. Hay que tener en cuenta que prácticamente siempre se va a encontrar en los mismos píxeles de la cámara (parte superior izquierda de la imagen) por lo que será más fácil encontrar estas marcas. Para detectar las líneas correctamente será también necesaria una buena iluminación.

Cada posición del galvanómetro siempre va a corresponder al mismo pixel de la cámara aproximadamente, teniendo la suficiente precisión para conseguir empalmar varias mallas seguidas como se ha podido comprobar en las pruebas reales.

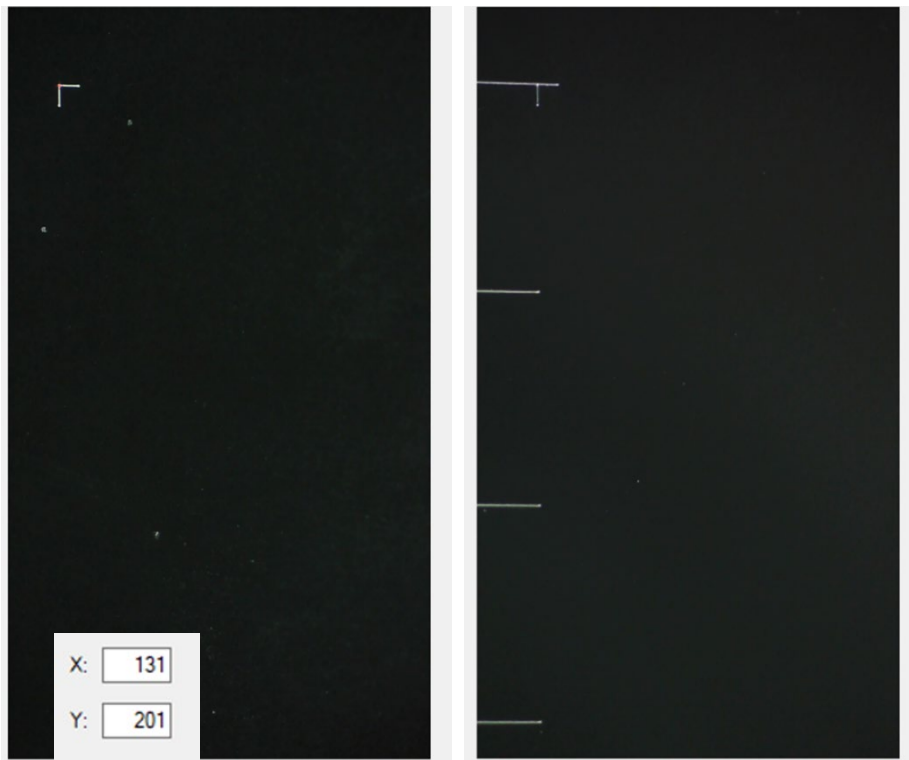


Figura 4. 26. (1) Marca de referencia y (2) empalme de varias cuadrículas

Lo más importante del procesado de la imagen será el inicio. Primero, se trazará una marca en forma de 'L'. Seguidamente, se buscará el punto en el que cortan las dos rectas y se realizará una marca en forma de cruz, en rojo, que corresponderá con la referencia de los píxeles donde se va a encontrar casi siempre el comienzo de la malla. Esta referencia será válida salvo que se produzca un movimiento inesperado de la cámara u otro tipo de error.

Después del trazado de la primera malla, se moverá el motor de ambos ejes hasta que la marca en forma de 'L' realiza al trazar la primera malla coincida con los píxeles obtenidos anteriormente al realizar la cruz roja (la referencia). Ahí podrá trazarse la siguiente malla. Cuando se complete la primera fila, se utilizará el motor del eje Y y se volverá a realizar el mismo procedimiento.

CAPÍTULO 5. ESTUDIOS ADICIONALES

5.1. Máquina de grabado láser final

Finalmente, una vez se han realizado los experimentos necesarios para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, se llevó el prototipo realizado por el Grupo de Tecnologías Fotónicas a Zepren. Allí es donde colocaron los motores en ambos ejes para poder realizar las pruebas finales. También se puede ver en la Figura 5. 1 como el cabezal está tapado para una mayor seguridad y el sistema del marco con ventosas del que no se disponía en el laboratorio todavía. Esta máquina portátil, en comparación con la desarrollada por Boraident mencionada en la introducción, se distingue por ser un prototipo de menor tamaño y peso, por lo que será más cómodo de utilizar y podrá tener un mayor alcance operativo.



Figura 5. 1. Sistema de ventosas y cabezal de la máquina láser



Figura 5. 2. Máquina láser portátil completa

Se empezaron a realizar las primeras pruebas de grabado en ventanas completas con todo el sistema unificado, como se puede observar en la Figura 5. 2.

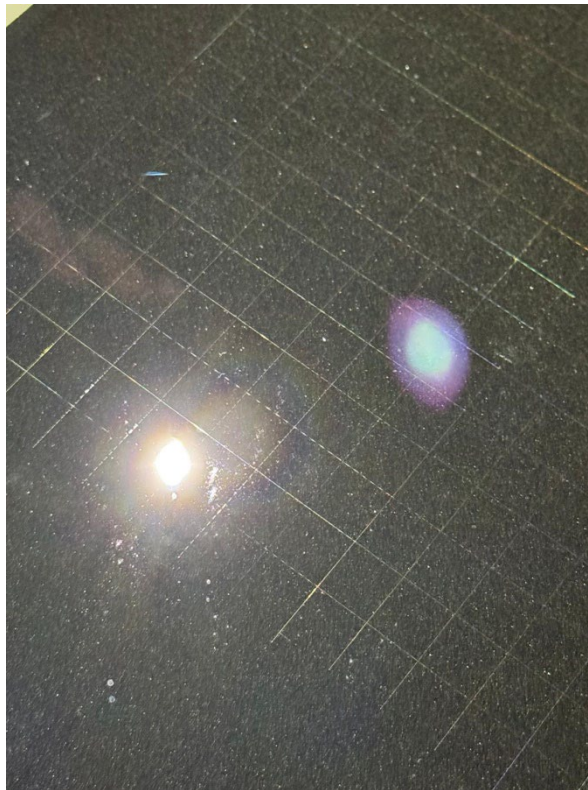


Figura 5. 3. Grabado de una FSS mediante la máquina portátil

El tiempo de grabado de una cuadrícula de 100 mmx100 mm es de unos 2.31 segundos, pero con el procesado de la imagen y el movimiento del motor se eleva a 10 segundos, por lo que una ventana entera de dimensiones 1300x900 mm tardará en grabarse unos 19.5 minutos, frente a los 13 minutos de la máquina de planta. Este tiempo, aunque ya es adecuado para las necesidades del sistema, puede mejorarse si fuera necesario aumentando la velocidad del motor y simplificando el procesado de la imagen.

Aunque el trabajo principal de este proyecto ya se ha desarrollado, porque consistía en realizar patrones de FSS en forma de cuadrícula sobre la capa metálica de ventanas ya montadas en trenes. Se realizaron algunas modificaciones del programa principal para lograr realizar otros patrones.

5.2. Patrón trébol

Para futuros usos de la máquina se han empezado a estudiar diferentes patrones de FSS, el primero de ellos en forma de trébol. En la Figura 5. 4. Observamos el patrón que se va a repetir periódicamente para dar lugar a la FSS. Para unir varios entre sí se hará de manera similar a la utilizada para las cuadrículas, pero esta vez en vez de detectar una marca en forma de 'L' se utilizará otro tipo de marca.

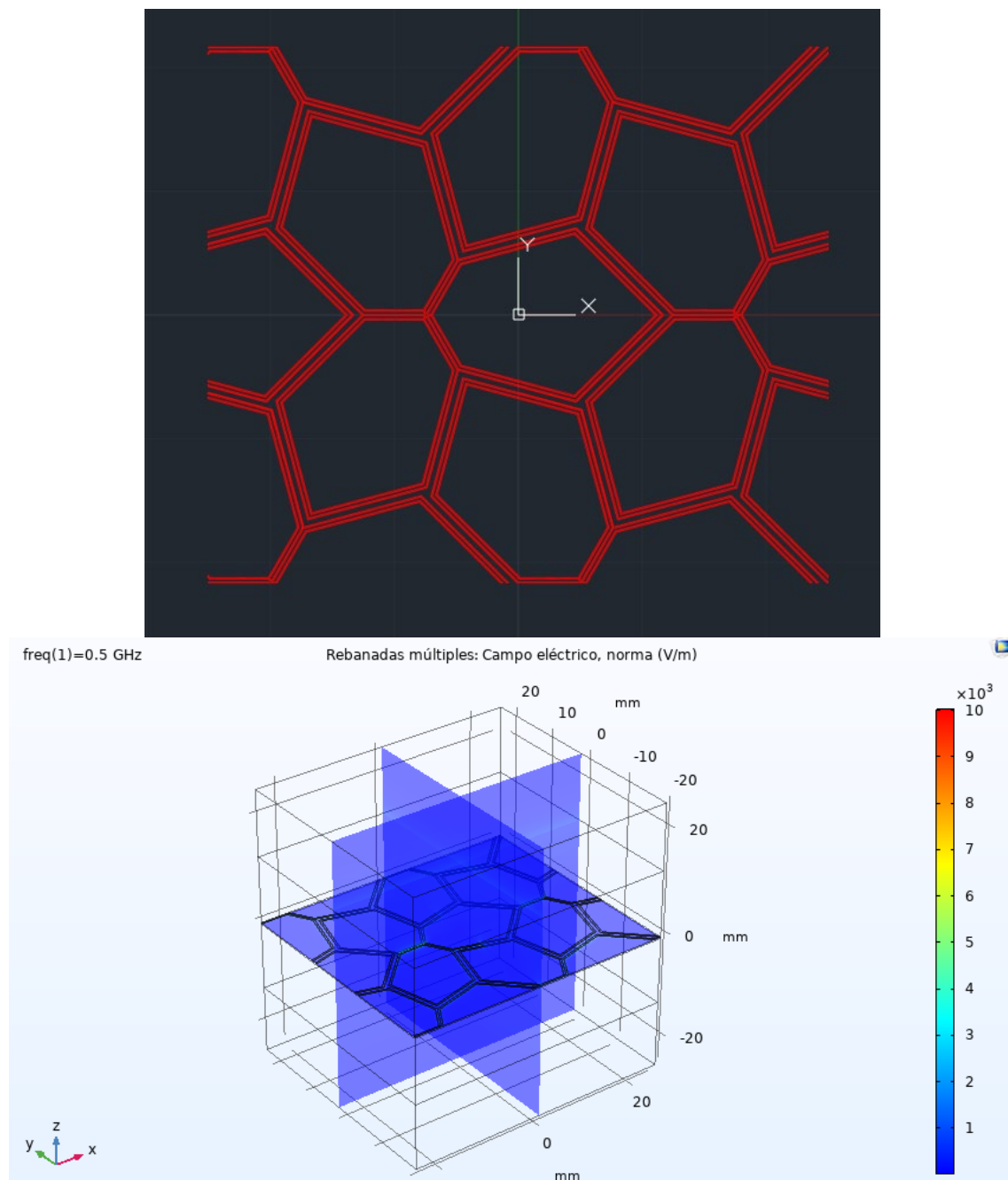


Figura 5. 4. Patrón trébol

Este prototipo está pensado para tener una baja atenuación entre 1-6 GHz de la señal para ángulos de incidencia altos (hasta 80° aproximadamente).

Para comprobarlo se ha realizado en una simulación del nuevo patrón utilizando el software de elementos finitos COMSOL Multiphysics. En las siguientes gráficas ha sido comparado el patrón del trébol con el de un parche de periodicidad 4mm y un grosor de línea de 100um.

Este fue elegido ya que, calculando el área total de capa retirada, se va a retirar un 5.2% de la capa al realizar el patrón de FSS de un trébol, quedándonos con un 94.8% de la capa. Esto es equivalente al caso de un parche de periodicidad 4mm, ya que se quita un 5% de capa.

Se obtuvieron los siguientes resultados comparando ambos patrones:

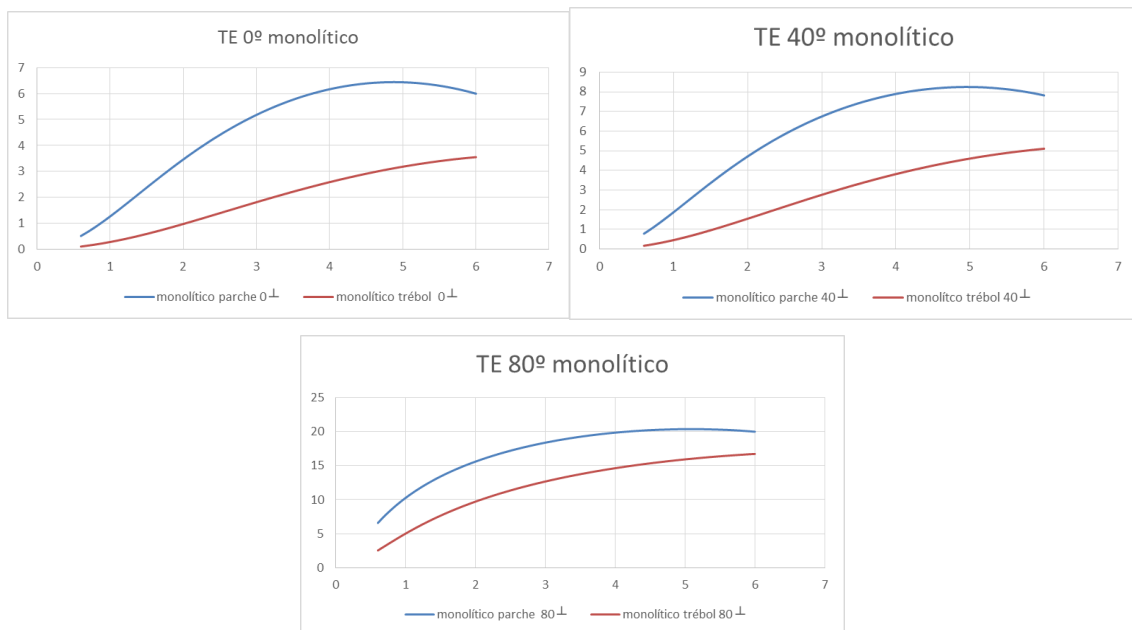


Figura 5. 5. Comparación trébol y parche sobre vidrio monolítico para polarización perpendicular

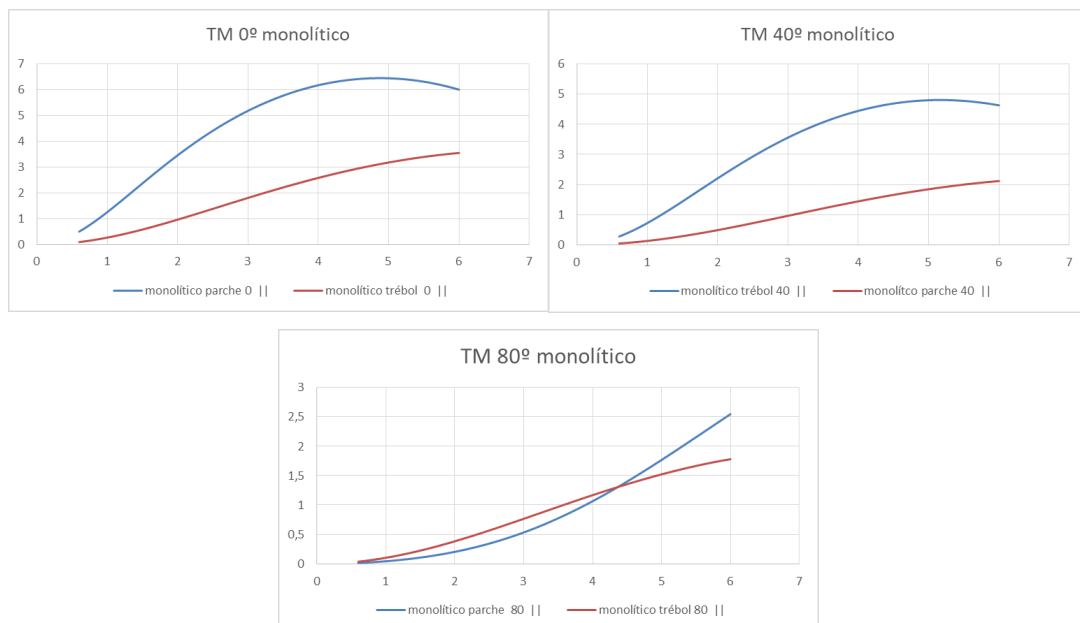


Figura 5. 6. Comparación trébol y parche sobre vidrio monolítico para polarización paralela

En la Figura 5. 6 se observa cómo hay menor atenuación de la señal para el caso del trébol, aunque a medida que va aumentando el ángulo de incidencia menos diferencia de atenuación hay entre ambas gráficas. Así hemos comprobado como para mayores ángulos de incidencia, las atenuaciones del el parche y el trébol se van pareciendo más

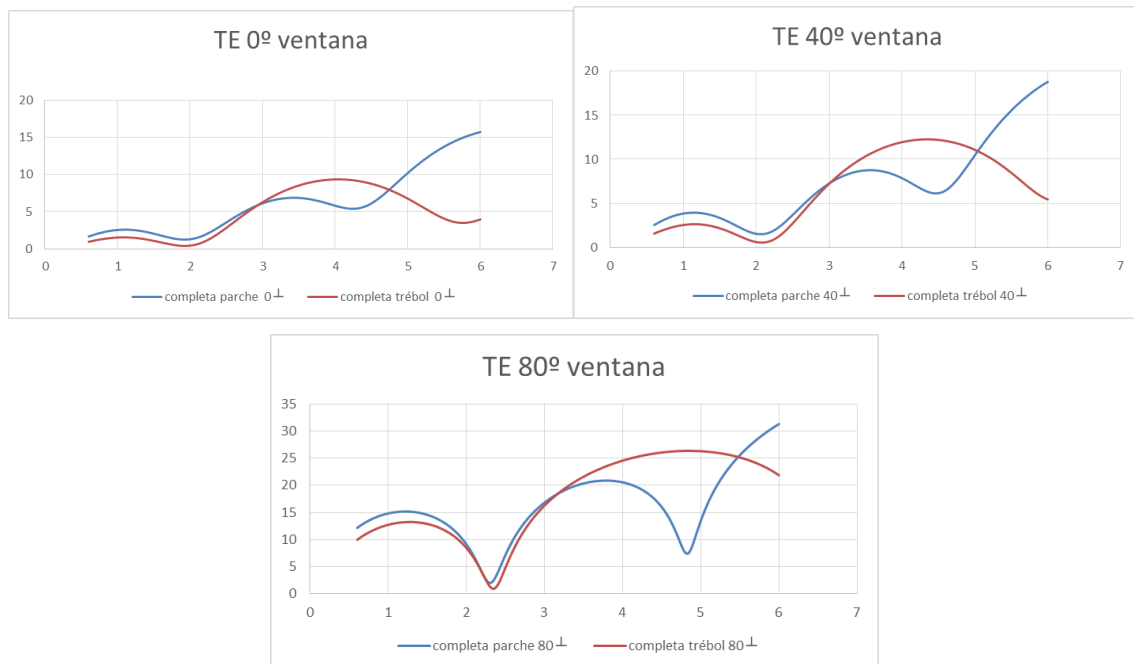


Figura 5. 7. Comparación trébol y parche sobre una ventana para polarización perpendicular

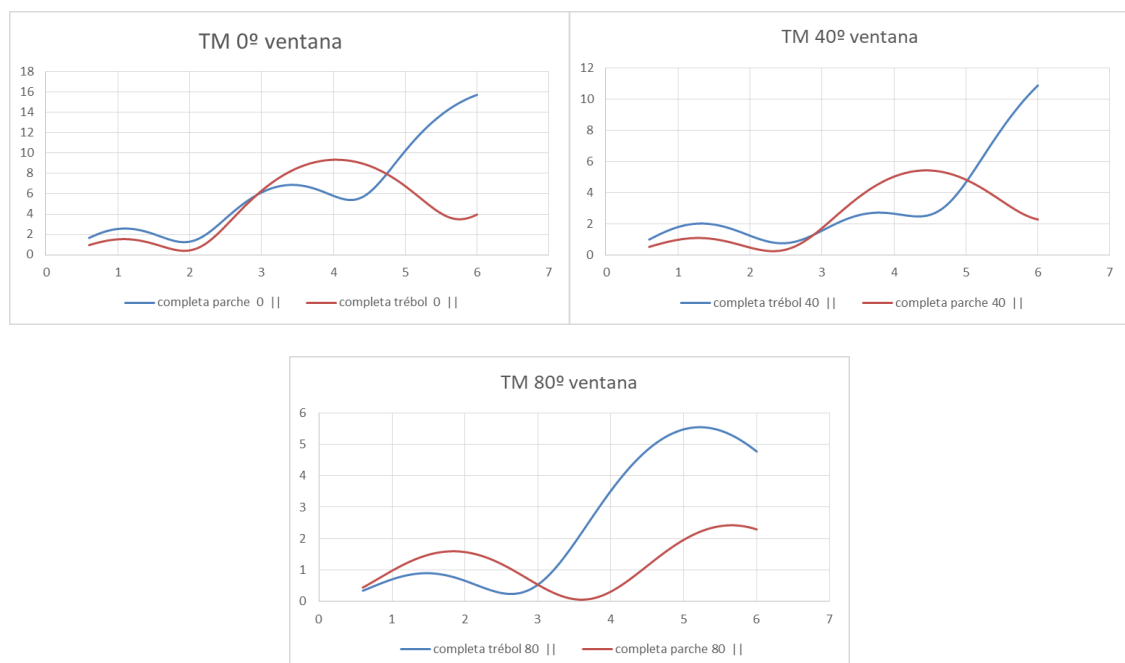


Figura 5. 8. Comparación trébol y parche sobre una ventana para polarización paralela

Para una ventana formada por dos vidrios de espesor de 4mm, una cámara de aire de 15mm y otro vidrio de espesor de 5 mm se puede observar cómo el patrón del trébol y el del parche tienen un comportamiento similar, siendo la atenuación del trébol ligeramente inferior en general, y que a 80° no se aprecia ninguna mejora con los tréboles.

5.3. Time Gating

A la par del desarrollo de este sistema surge el problema de verificar en campo las ventanas tratadas, ya que estarán colocadas en trenes y edificios y no podrán llevarse a un sistema de medida tipo cámara anecoica.

Si la medida se realiza en ese tipo de entornos, habrá abundantes reflexiones que pueden afectar gravemente a la medida de transmisión de radiofrecuencia. El método de Time Gating o enventanado temporal permite lograr que las medidas contengan solo la información que nos interesa, que en este caso es la señal del haz directo, filtrando las reflexiones secundarias. Para ello, sobre los parámetros S complejos medidos para el rango de frecuencias de interés se realiza la transformada inversa de Fourier, en el espacio temporal se realiza el enventanado eligiendo el pico mayor y más temprano y finalmente se vuelve al dominio frecuencial aplicando la transformada de Fourier.[6]

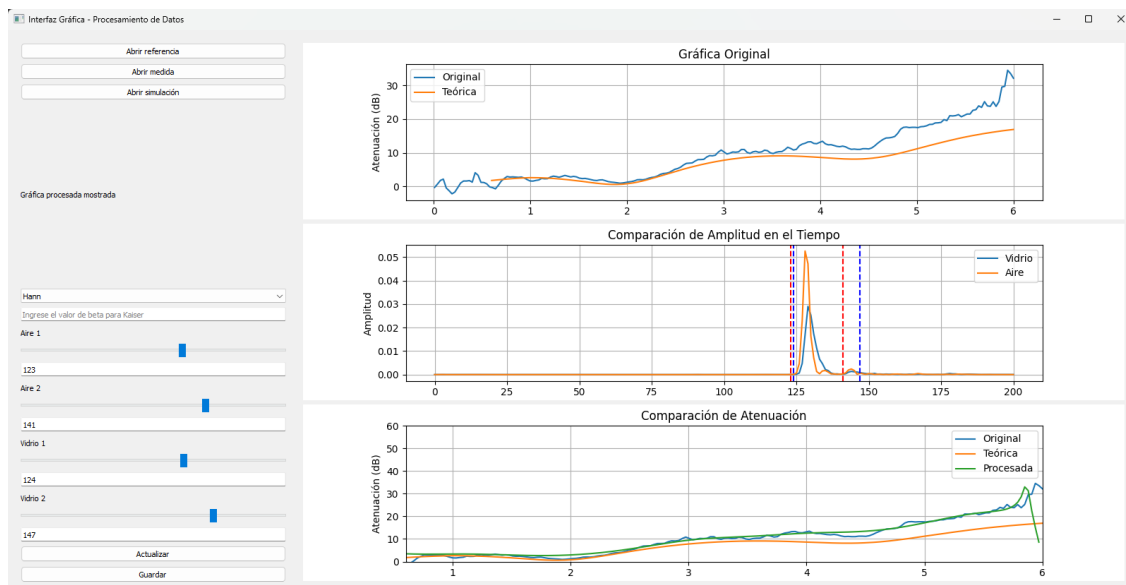


Figura 5. 9. Interfaz gráfica Time Gating

Este programa, originalmente diseñado en Matlab, ha sido trasladado a Python para incluir una interfaz gráfica que facilite su uso por parte del usuario (Anexo IV). La herramienta permite filtrar reflexiones secundarias mediante dos tipos de ventanas: Hann y Kaiser. En el caso de la ventana Kaiser, el usuario deberá introducir el valor del parámetro beta, que afecta directamente a su comportamiento. Además, los filtros aplicados al aire y al vidrio pueden ajustarse fácilmente utilizando barras deslizantes o cuadros de texto.

Finalmente, en la gráfica de 'Comparación de atenuación' se muestra en azul la señal original obtenida directamente mediante el sistema de medida, en verde esta señal tras ser procesada mediante enventanado y en naranja, la respuesta simulada de la venta.

El objetivo principal de desarrollar la interfaz gráfica es verificar la precisión del grabado realizado con la máquina portátil. Esto se logrará evaluando si la medida de atenuación de la señal procesada corresponde con la simulada. Si ambas se parecen será porque el grabado se ha realizado correctamente.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La principal conclusión de este proyecto es que se ha logrado diseñar un sistema portátil de grabado láser para su aplicación en ventanas de trenes y edificios. A pesar de los diversos desafíos surgidos durante su desarrollo, se han superado con éxito.

Además, se consiguió entender el funcionamiento de los componentes de hardware involucrados en un sistema de grabado de este tipo, así como la comunicación entre ellos mediante el software necesario. Una vez completados los ajustes para garantizar su operatividad, se llevaron a cabo pruebas experimentales que permitieron alcanzar la máxima precisión en el grabado de las FSS en los vidrios.

Por otro lado, se desarrolló un software específico para optimizar la medición de FSS en campo, teniendo en cuenta que las ventanas, al estar instaladas en trenes y edificios, no pueden evaluarse en una cámara anecoica.

En cuanto a los retos futuros, uno de los principales será adaptar este procedimiento para el grabado en vidrios curvados ya instalados en trenes o edificios. Esto implicará la necesidad de rediseñar la parte mecánica o introducir un brazo robótico, teniendo en cuenta los efectos derivados de la curvatura.

También puede estudiarse la posibilidad de introducir un sensor, basado por ejemplo en radar, para detectar automáticamente la posición de la capa metálica en la ventana, y adecuar la focal de la lente variable a esa posición.

Sería también muy útil poder disponer de un sistema de medida compacto que funcione en reflexión y permita verificar que se ha conseguido transmisión de RF en la ventana grabada sin tener que colocar elementos a los dos lados de la misma.

Finalmente, una posible línea de desarrollo para este proyecto consiste en utilizar esta máquina portátil para grabar otros tipos de patrones, como el diseño en forma de trébol, que ya se ha comenzado a explorar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Araque Aluminios, «Vidrio Bajo Emisivo: ¿Qué es y para qué sirve?», Araque Aluminios. Accedido: 23 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://araquealuminios.com/que-es-vidrio-bajo-emisivo/>
- [2] L. Burnier *et al.*, «Energy saving glazing with a wide band-pass FSS allowing mobile communication: up-scaling and characterisation», *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 11, n.º 10, pp. 1449-1455, ago. 2017, doi: 10.1049/iet-map.2016.0685.
- [3] «Frequency selective surface on low emissivity windows as a means of improving telecommunication signal transmission: A review», *J. Build. Eng.*, vol. 70, p. 106416, jul. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.106416.
- [4] «Laserbird - Laserbearbeitung von Glas». Accedido: 23 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hegla-boraident.com/de/produkte/laserbird-laserbearbeitung-von-glas/>
- [5] T. Zhang *et al.*, «Field distortion correction in galvanometric scanning system by interpolation with symmetric polynomials», *Precis. Eng.*, vol. 83, pp. 134-141, sep. 2023, doi: 10.1016/j.precisioneng.2023.06.001.
- [6] R. Chueca, M. Muñoz, A. Cueva, R. Alcain, C. D. Heras, y I. Salinas, «Improving Communication Signal Transmission in Multiple Low-e Windows Using Frequency Selective Surfaces», *IEEE Access*, vol. 12, pp. 179579-179587, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3498448.

ANEXOS

Anexo I. Especificaciones de los dispositivos seleccionados

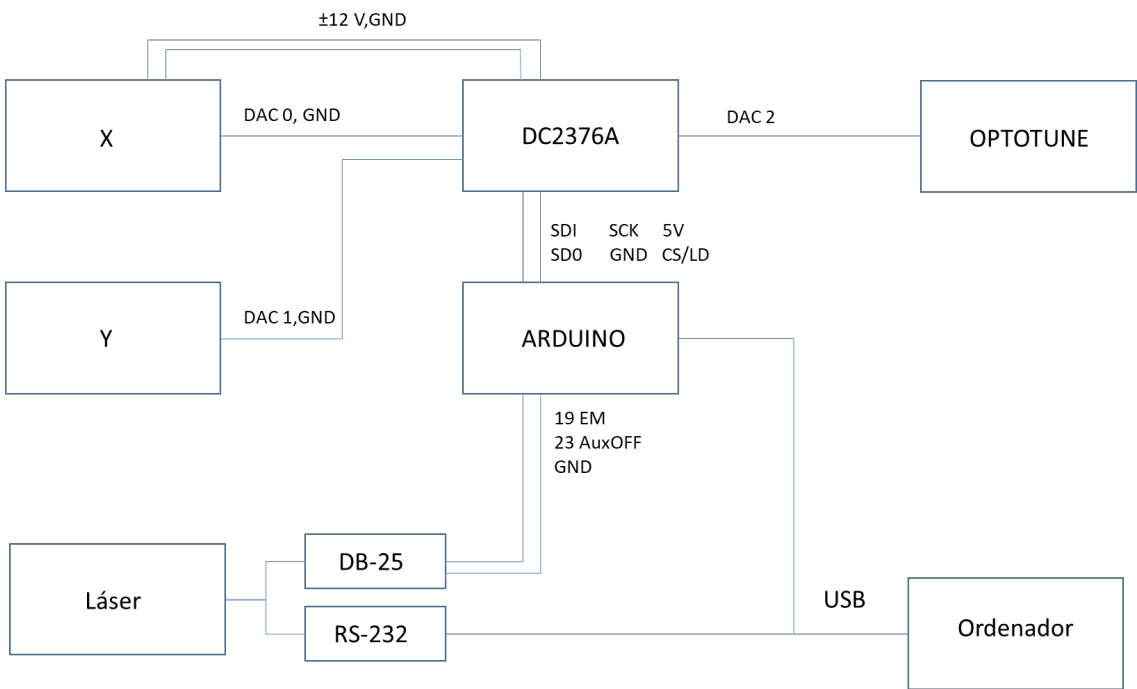


Figura 1. Montaje general con conexiones

En la Figura 1 se pueden observar las distintas conexiones entre los dispositivos que forman el montaje del proyecto y cuáles han sido seleccionados.

LÁSER YLP-V2-1-100-50-50

Product Model	Unit	Parameter			
		YLP-V2-1-100-20-20	YLP-V2-1-100-30-30	YLP-V2-1-100-50-50	YLP-V2-1-100-100-100
M ²		<2			
Armored Cable Length	m	3			
Nominal Average Output Power	W	> 20	> 30	> 50	> 100
Maximum Pulse Energy	mJ	1			
Pulse Repetition Rate Range	kHz	2~500			
Pulse Duration	ns	100			
Output Power Stability	%	<5			
Cooling Method		Air Cooled			
Supply DC Voltage (VDC)	V	24			
Maximum Power Consumption	W	< 90	< 115	< 175	< 340
Environmental Supply Current	A	> 5	> 7	> 11	> 9
Central Emission Wavelength	nm	1064			
Emission Bandwidth@3dB	nm	<10			
Output Beam Diameter	mm	7±0.5			
Output Power Tuning Range	%	10~100			
Operation Temperature	°C	0 ~ 40			
Storage Temperature	°C	-10 ~ 60			
Size(L×W×H)	mm	215*286*95		215*260*140	

LENTE DE FOCAL VARIABLE

EL-10-42-OF-NIR-4D50W

Main specifications

Product	EL-10-42-OF-NIR-4D	EL-10-42-OF-NIR-4D-S (SCAPS)	
Clear aperture	10		mm
Maximum operating laser power (average)	50		W
Focal power: tuning range	-2.0 to 0 to +2.0 (-500 mm to infinity to 500 mm)	-1.8 to 0 to +1.8 (-500 mm to infinity to 500 mm)	dpt
Focal power: repeatability	typical: < 0.02 max: < 0.04		dpt
Focal power: long term stab. 8h			
Wavefront error	< 0.15 @ 1064 nm		λ RMS
Transmission @ 1064 nm	> 95%		
Transmission NIR (950-1100 nm)	> 94%		
Long term radiation damage @ 1064 nm: 40 mJ/cm ² at 20 kHz	No effect after 2000 h		
Damage threshold ¹ @ 1064 nm: 125 ns-pulsed at 50 kHz 10 ps-pulsed at 50 kHz	2.6 2.05		J/cm ²
Response time Controlled with EL-E-OF-A analog board	80% step: 12 20% step: 6		ms
Response time Controlled with Optotune-DSD digital board		80% step: 8 20% step: 4.5	ms
Tracking delay Controlled with Optotune-DSD digital board		< 2	ms
Focal length resolution	Continuous (depends on control electronics)		
Lifecycles (10%-90% sinusoidal)	> 1'000'000'000		
Weight	90		g
Heater set temperature	47		°C
Operating temperature	10 to 40		°C
Storage Temperature	-20 to 80		°C

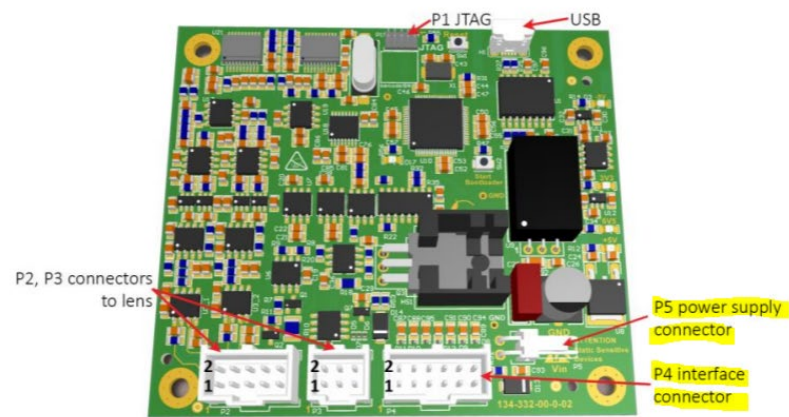
EL-E-OF-A-02

Electrical specifications

Supply voltage Vcc	24	V
Max power output for the lens	3	W
Max current output for the lens	350	mA
Max heater power consumption	22	W
Total max power consumption	30	W
Total max heat dissipation	1.5	W

En el conector P4 del Optotune, se va a introducir una tensión de entre 0 y 5V en el pin 8, para controlar la focal mediante dicho pin, además de la conexión a tierra en el pin.

Electrical connections



Connector P4			
Pin	Signal	Value	Function
6	AGND	-	Analog ground
8	Analog In	0..5 V (< 50 µA)	Analog set signal to control the focal length of EL-10-42-OF

Se alimentará la placa a 24 V mediante el P5 Power Supply Connector.

Electrical specifications

Supply voltage Vcc	24	V
--------------------	----	---

GALVANÓMETRO (GVS002)

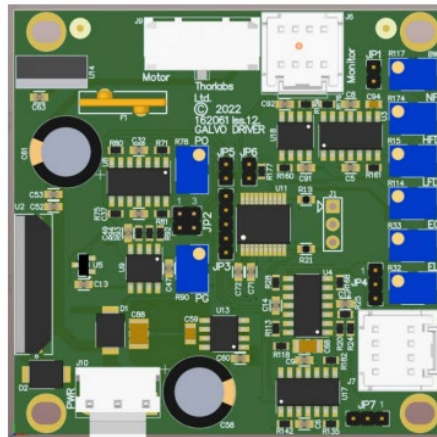
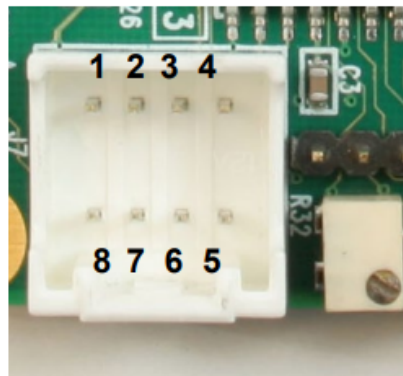
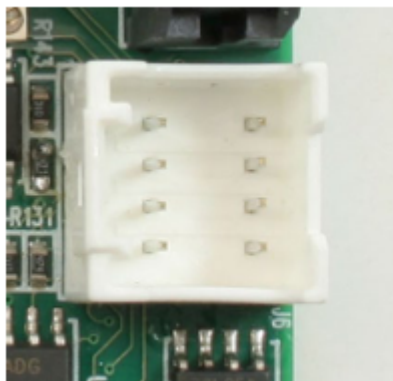


Figura 2. Conectores galvanómetro



- Pin 1 Command Input +positive
- Pin 2 Command Input -negative
- Pin 3 DRV OK (Active Low)
- Pin 4 External Enable
- Pin 5 -12 V output (Low Impedance O/P)
- Pin 6 +12 V output (Low Impedance O/P)
- Pin 7 Ground
- Pin 8 Ground

Figura 3. Conector J7



- Pin 1 Scanner Position
- Pin 2 Internal Command Signal
- Pin 3 Positioning Error X 5
- Pin 4 Motor Drive Current
- Pin 5 Not Connected
- Pin 6 Test Input (NC)
- Pin 7 Motor + Coil Voltage/2
- Pin 8 Ground

Figura 4. Conector J6

Item #	GVS001, GVS002, GVS101, GVS102, GVS201, GVS202
Mirror	
Maximum Beam Diameter	5 mm
Finish	GVS00x: Protected Silver Coated GVS10x: Protected Gold Coated GVS20x: Broadband, E02
Damage Threshold ^c	GVS00x: 3 J/cm ² at 1064 nm, 10 ns pulse GVS10x: 2 J/cm ² at 1064 nm, 10 ns pulse GVS20x: 0.25 J/cm ² at 532 nm, 10 ns pulse
Motor & Position Sensor	
Linearity	99.9%, range $\pm 20^\circ$
Scale Drift	40 ppm/ $^\circ\text{C}$ (Max)
Zero Drift	10 $\mu\text{Rad}/^\circ\text{C}$ (Max)
Repeatability	15 μRad
Resolution with GPS011 Linear PSU with Standard Switch Mode PSU	0.0008 $^\circ$ (15 μRad) 0.004 $^\circ$ (70 μRad)
Average Current	<1.25 A rms
Peak Current	5 A
Load Mirror Aperture	5 mm
Coil Resistance	2.2 $\Omega \pm 10\%$
Coil Inductance	150 $\mu\text{H} \pm 10\%$
Rotor Inertia	0.02 g per cm ²
Maximum Scale Angle (Mechanical Angle)	$\pm 12.5^\circ$ (with 0.8 V/ $^\circ$ scaling factor)
Motor Weight (Including Cables, Excluding Bracket)	50 g
Operating Temperature Range	0 – 40 $^\circ\text{C}$

Item #	Value
Full Scan Bandwidth ^d	100 Hz Square wave, 250 Hz Sine wave 175 Hz Sawtooth 175 Hz Triangular
Small Angle ($\pm 0.2^\circ$) Bandwidth ^e	Typically, 1 kHz with Sine wave
Small Angle Step Response	300 μs
Power Supply	$\pm 15\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V DC}$ (1.25 A rms, 5 A peak MAX)
Analog Signal Input Resistance	20 k $\Omega \pm 1\%$ (Differential Input)
Position Signal Output Resistance	1 k $\Omega \pm 1\%$
Analog Position Signal Input Range	$\pm 10\text{ V}$
Mechanical Position Signal Input Scale Factor	switchable: 0.5 V/ $^\circ$, 0.8 V/ $^\circ$ or 1.0 V/ $^\circ$
Mechanical Position Signal Output Scale Factor	0.5 V/ $^\circ$
Operating Temperature Range	0 - 40 $^\circ\text{C}$
Servo Board Size (L x W x H)	85 mm x 74 mm x 44 mm (3.35" x 2.9" x 1.73")

Figura 5. Especificaciones galvanómetro

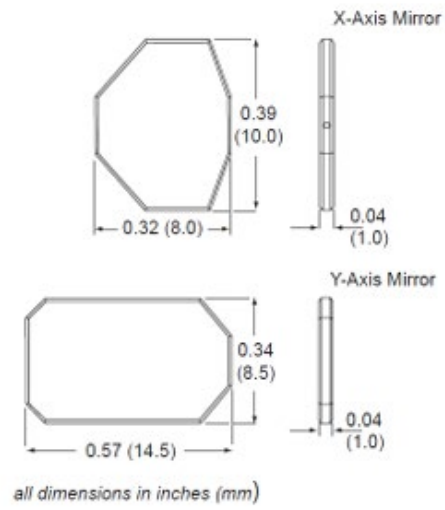


Figura 6. Dimensiones espejos

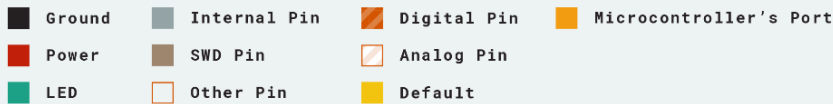
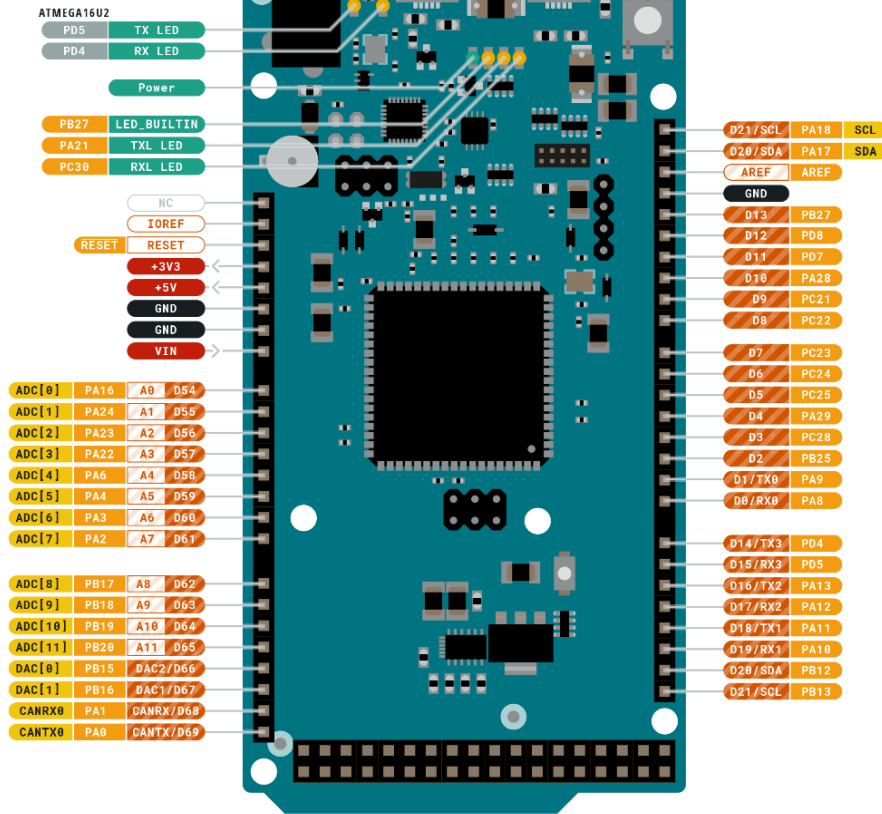
LENTE F-THETA

Artículo #	FTH160-1064
Foto - No está a escala (Haga clic para ampliar)	
Distancia focal efectiva (EFL)	160 milímetros
Ángulo de escaneo (máximo)	$\pm 28^\circ$
Longitud de escaneo (máx.)	156,4 milímetros
Campo de escaneo (máximo)	110,6 mm x 110,6 mm
Diámetro del haz ^a	12 milímetros
Tamaño del punto (limitado por difracción)	26 μm
Distorsión F-Theta (máxima)	0,1%
Gráficos de curvatura de campo y distorsión F-Theta (haga clic para verlos)	
Distancia de trabajo ^a	182,5 milímetros
Brida de longitud focal ^a	191,7 milímetros
A ₁ ^a (típico)	7,5 milímetros
A ₂ ^a (típico)	12,3 milímetros
ΔM ^a (típico)	20 milímetros
Número de elementos	Ventana protectora 3 Plus
Recubrimiento AR ^b	1020 nm - 1080 nm: R promedio < 0,3 % (por superficie) 450 nm - 700 nm: R promedio < 1,0 % (por superficie)
Umbral de daño	5 J/cm ² (1064 nm, diámetro 1 mm, 10 ns, 10 Hz)
Longitud de la lente	50,2 mm (1,98")
Diámetro de la carcasa de la lente en el punto más grande	Ø90 mm (Ø3,54")
Roscas de montaje	M85x1.0
Ventana protectora de repuesto Artículo n.º ^c	FTHW75-1064

ARDUINO DUE



ARDUINO DUE

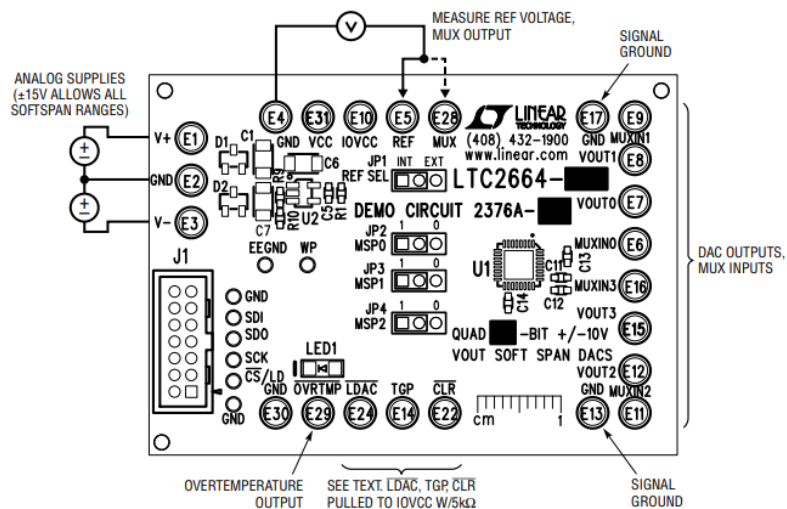


ARDUINO.CC



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1806, Mountain View, CA 94042, USA.

CONVERTOR D/A



Anexo II. Código C#

En este anexo se recogen las partes más importantes del Código de Visual Studio utilizado en varias partes de este trabajo fin de máster. Por un lado, se encuentra el código para trazar las mallas junto con su corrección. Por otro, se ha indicado también el código para unir varias mallas entre sí. El resto del código se puede encontrar en <https://github.com/mariamunozmolina/PortableLaser.git>

Función para dibujar una malla completa

```
private void DibujarMalla(double separacion, int puntosMM, bool
marcas)
{
    int nivelesSeparacion = (int)(separacion * nivelesMm);
    int nLineas = (int)Math.Floor((MAXIMO - MINIMO) /
(decimal)nivelesSeparacion);
    int minimo = -1*nLineas * nivelesSeparacion/2;
    int maximo = nLineas * nivelesSeparacion / 2; //el
máximo llega hasta el final del cuadrado, aunque allí no haya línea
transversal
    int nPuntos = Math.Max(1, (int)(separacion * nLineas *
puntosMM));

    //MALLA

    if (checkBoxHorizontales.Checked)
    {
        miGalva.Mover(minimo, minimo);
        Thread.Sleep(100);
        miGalva.HacerLinea(minimo + LONGITUD_MARCA, minimo,
maximo + LONGITUD_MARCA, minimo, nPuntos); //primera línea
desplazada
        for (int i = 1; i < nLineas; i++)
        {
            if (i % 2 == 0)
                miGalva.HacerLinea(minimo, minimo + i *
nivelesSeparacion, maximo, minimo + i * nivelesSeparacion, nPuntos);
            else
                miGalva.HacerLinea(maximo, minimo + i *
nivelesSeparacion, minimo, minimo + i * nivelesSeparacion, nPuntos);
        }
    }

    if (checkBoxVerticales.Checked)
    {
        miGalva.Mover(minimo, maximo + LONGITUD_MARCA);
        Thread.Sleep(100);
        miGalva.HacerLinea(minimo, maximo + LONGITUD_MARCA,
minimo, minimo + LONGITUD_MARCA, nPuntos);
        for (int i = 1; i < nLineas; i++)
        {
            if (i % 2 == 0)
                miGalva.HacerLinea(minimo + i *
nivelesSeparacion, maximo, minimo + i * nivelesSeparacion, minimo,
nPuntos);
            else
```

```

        miGalva.HacerLinea(minimo + i *
nivelesSeparacion, minimo, minimo + i * nivelesSeparacion, maximo,
nPuntos);
    }
}

if (marcas)
{
    DibujarMarca(maximo, minimo, LONGITUD_MARCA,
puntosMM, false, true); //línea vertical para unir con la siguiente
malla
    DibujarMarca(-1 * minimo, minimo, LONGITUD_MARCA,
puntosMM, true, false); //sólo la línea horizontal para unir con la
siguiente fila
}
}

```

Funciones para corregir la deformación del galvanómetro

```

private double[][] CalcularCorreccion(double[,] coordenadasX, double[,]
coordenadasY, int distanciaRef)
{
    double[][] correccion = new double[4][];
    double L = coordenadasX[2, 1]; //longitud de referencia en
x=max, y=0
    double[,] coordenadasXNiv = new double[3, 3];
    double[,] coordenadasYNiv = new double[3, 3];
    nivelesMm = distanciaRef / L;

    for (int i = 0; i < 3; i++)
        for (int j = 0; j < 3; j++)
        {
            coordenadasXNiv[i, j] = nivelesMm*coordenadasX[i, j];
//en niveles
            coordenadasYNiv[i, j] = nivelesMm * coordenadasY[i, j];
        }

    //primer cuadrante(++)
    correccion[0] = Polinomios(2, 0, coordenadasXNiv,
coordenadasYNiv);

    //segundo cuadrante(-- )
    correccion[1] = Polinomios(0, 0, coordenadasXNiv,
coordenadasYNiv);

    //tercer cuadrante(-+)
    correccion[2] = Polinomios(0, 2, coordenadasXNiv,
coordenadasYNiv);

    //cuarto cuadrante(++ )
    correccion[3] = Polinomios(2, 2, coordenadasXNiv,
coordenadasYNiv);

    return correccion;
}

```

```

private double[] Polinomios(int indiceX, int indiceY, double[],
coordenadasX, double[, ] coordenadasY)
{
    double L = coordenadasX[2, 1]; //longitud de referencia en
x=max, y=0
    double[, ] deltaX = new double[3, 3]; //diferencia con posiciones
teóricas
    double[, ] deltaY = new double[3, 3];

    for (int i = 0; i < 3; i++)
        for (int j = 0; j < 3; j++)
        {
            deltaX[i, j] = L * (i - 1) - coordenadasX[i, j];
            deltaY[i, j] = L * (j - 1) - coordenadasY[i, j];
        }

    double a0 = deltaX[indiceX,1] / coordenadasX[indiceX, 1];
//[indiceX,1] es el punto 1 (en el ejeX, y=0) [indiceX, indiceY] el punto 2
y [1, indiceY] el punto 3
    double a1 = -1* deltaX[indiceX, 1] / (coordenadasX[indiceX, 1] *
coordenadasY[indiceX, indiceY] * coordenadasY[indiceX, indiceY]) +
deltaX[indiceX, indiceY] / (coordenadasX[indiceX, indiceY] *
coordenadasY[indiceX, indiceY] * coordenadasY[indiceX, indiceY]);
    double b0 = deltaY[1, indiceY] / (coordenadasY[1, indiceY]);
    double b1 = -1* deltaY[1, indiceY] / (coordenadasY[1, indiceY] *
coordenadasX[indiceX, indiceY] * coordenadasX[indiceX, indiceY]) +
deltaY[indiceX, indiceY] / (coordenadasY[indiceX, indiceY] *
coordenadasX[indiceX, indiceY] * coordenadasX[indiceX, indiceY]);

    return new double[4] { a0, a1, b0, b1 };
}

```

Funciones para poder unir varias mallas seguidas entre sí

```

private void DibujarMarca(int x, int y, int L, int puntosMM, bool
horizontal=true, bool vertical=true)
{
    int nPuntos = (int) (LONGITUD_MARCA/nivelesMm *
puntosMM);
    miGalva.Mover(x, y);
    Thread.Sleep(100);
    if (vertical)
        miGalva.HacerLinea(x, y, x, y + L, nPuntos);
//marca vertical
    if (horizontal)
        miGalva.HacerLinea(x, y, x + L, y, nPuntos); //marca
horizontal
}

```

```

private void TomarReferencia(double separacion, int puntosMM)
{
    Mat miImagen = new Mat();
    //Hacer marca X
    int nivelesSeparacion = (int) (separacion * nivelesMm);
    int nLineas = (int) Math.Floor((MAXIMO - MINIMO) /
(decimal)nivelesSeparacion);
    int minimo = -1 * nLineas * nivelesSeparacion / 2;
}

```

```

        DibujarMarca(minimo, minimo, LONGITUD_MARCA, puntosMM);

        //Buscar posición inicial X
        miLaser.Encendido = false;
        Thread.Sleep(1000);
        for (int i = 0; i < 10; i++)//para quitar imágenes del
buffer
            miCamara.Read(miImagen);

        puntoRef = miProcesador.BuscarMarca(miImagen, true, new
OpenCvSharp.Point(820, 725));
        miImagen.DrawMarker(puntoRef, Scalar.Red);
        pictureBoxCamara.Image =
BitmapConverter.ToBitmap(miImagen);
        textBoxXCruz.Text = puntoRef.X.ToString();
        textBoxYCruz.Text = puntoRef.Y.ToString();
        miLaser.Encendido = checkBoxLaser.Checked;
    }

```

```

private void MoverACruz()
{
    OpenCvSharp.Point posicion = new OpenCvSharp.Point();
    //Buscar posición inicial
    Mat miImagen = new Mat();
    while (posicion.X != puntoRef.X)//luego en los dos ejes
    {
        miCamara.Read(miImagen);
        posicion = miProcesador.BuscarMarca(miImagen, false,
new OpenCvSharp.Point(820, 725));
        miImagen.DrawMarker(posicion, Scalar.Red);
        pictureBoxCamara.Image =
BitmapConverter.ToBitmap(miImagen);
        textBoxXCruz.Text = posicion.X.ToString();
        textBoxYCruz.Text = posicion.Y.ToString();
        int distanciaX = -1*(posicion.X - puntoRef.X);

    }
}

```

Funciones para el procesamiento de la imagen y así conseguir unir varias mallas.

```

internal class ProcesadorImagen
{
    const int RADIO = 200;//radio de análisis en torno al centro
    public ProcesadorImagen()
    {
    }

    internal Point BuscarMarca(Mat miImagen, bool marcaInicial,
Point centro)
    {
        Mat grayImage = new Mat();
        Cv2.CvtColor(miImagen, grayImage,
ColorConversionCodes.BGR2GRAY);
    }
}

```

```

Mat BW = new Mat();
Cv2.AdaptiveThreshold(grayImage, BW, 255,
AdaptiveThresholdTypes.GaussianC, ThresholdTypes.Binary, 73, -30);

LineSegmentPoint[] lines = Cv2.HoughLinesP(BW, 1, Math.PI/2,
20, 20, 5);
int maxX=0, maxY = 0, minX = 10000, minY=10000;
bool procesar = true;
double angulo;
for (int i = 0; i < lines.Length; i++)
{
    angulo = Math.Atan2(Math.Abs((lines[i].P1 -
lines[i].P2).Y) , Math.Abs((lines[i].P1 - lines[i].P2).X));
    if (marcaInicial)
    {
        procesar = lines[i].Length() < 50; //sólo tiene en
cuenta las líneas cortas de la marca
    }
    procesar = (lines[i].P1.DistanceTo(centro) < RADIO) ||
(lines[i].P2.DistanceTo(centro) < RADIO); //sólo procesa si están
cerca del punto inicial objetivo
    if (procesar)
    {
        if (angulo>1.5) //(lines[i].P1.X ==
lines[i].P2.X)//es una línea vertical
        {
            if (lines[i].P1.X > maxX)
                maxX = lines[i].P1.X;
            if (lines[i].P1.X < minX)
                minX = lines[i].P1.X;
            //// Draws result lines
            miImagen.Line(lines[i].P1, lines[i].P2,
Scalar.Red, 1, LineTypes.AntiAlias, 0);
        }
        if (angulo<0.1)//(lines[i].P1.Y ==
lines[i].P2.Y)//es una línea horizontal
        {
            if (lines[i].P1.Y > maxY)
                maxY = lines[i].P1.Y;
            if (lines[i].P1.Y < minY)
                minY = lines[i].P1.Y;
            //// Draws result lines
            miImagen.Line(lines[i].P1, lines[i].P2,
Scalar.Red, 1, LineTypes.AntiAlias, 0);
        }
    }
}
Point resultado=new Point((maxX + minX) / 2, (maxY + minY) /
2);
System.Windows.Forms.Application.DoEvents();
return resultado;
}
}

```

Anexo III. Código Arduino

En este anexo, se va a presentar el código realizado en Arduino. También se subirá al GitHub con el nombre LaserDAC_SPI.ino.

Anexo IV. Código Python

Por último, en <https://github.com/mariamunozmolina/PortableLaser.git> se dispondrá del código realizado para la Interfaz del inventariado temporal (Time Gating.py).