



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Máster

Mecanizado láser de circuitos eléctricos de láminas  
delgadas de ITO sobre diferentes sustratos

Laser machining of circuits based on ITO thin films  
over different substrates

Autor

Marcos Royo Artal

Directores

Luis Alberto Angurel Lambán

Alejandro Frechilla Zabal

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2025

# ÍNDICE

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÍNDICE .....                                                                              | 1  |
| AGRADECIMIENTOS.....                                                                      | 2  |
| 1 INTRODUCCIÓN.....                                                                       | 3  |
| 1.1 APLICACIONES .....                                                                    | 3  |
| 1.2 MÉTODOS DE DEPOSICIÓN DE PELICULAS DELGADAS DE ITO .....                              | 5  |
| 1.3 MICROMECHANIZADO POR ABLACIÓN LASER .....                                             | 8  |
| 1.4 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....                                                          | 9  |
| 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....                                                               | 11 |
| 2.1 CAPAS DE ÓXIDO DE INDIO Y ESTAÑO (ITO) SOBRE DIFERENTES SUSTRATOS                     | 11 |
| 2.2 PROCESO DE MICROMECHANIZADO CON LÁSER .....                                           | 12 |
| 2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN .....                                                     | 14 |
| 2.3.1 Microscopio Confocal Plu 2300 .....                                                 | 15 |
| 2.3.2 Micrófono ultramic 384 .....                                                        | 16 |
| 2.3.3 Medidas eléctricas .....                                                            | 16 |
| 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES .....                                                         | 18 |
| 3.1 FENOMENOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE MICROMECHANIZADO .....                               | 18 |
| 3.2 EFECTO DEL TRATAMIENTO LÁSER SOBRE RECUBRIMIENTOS DE ITO SOBRE VIDRIO .....           | 19 |
| 3.3 EFECTO DEL TRATAMIENTO LÁSER SOBRE RECUBRIMIENTOS DE ITO SOBRE $\text{LiNbO}_3$ ..... | 24 |
| 3.4 EFECTO DEL TRATAMIENTO LÁSER SOBRE RECUBRIMIENTOS DE ITO SOBRE $\text{ZnO}$ .....     | 28 |
| 3.5 ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FRECUENCIA.....                                             | 32 |
| 3.6 EJEMPLO DE CIRCUITO ELÉCTRICO .....                                                   | 36 |
| 4 CONCLUSIONES .....                                                                      | 38 |
| 5 BIBLIOGRAFÍA .....                                                                      | 40 |
| 6 ANEXO I TABLAS .....                                                                    | 43 |
| 6.1 ITO SOBRE VIDRIO .....                                                                | 43 |
| 6.2 ITO SOBRE $\text{LiNbO}_3$ .....                                                      | 43 |
| 6.3 ITO SOBRE $\text{ZnO}$ .....                                                          | 44 |
| 6.4 TRATAMIENTOS A DIFERENTES FRECUENCIAS.....                                            | 45 |
| 7 ANEXO II.....                                                                           | 48 |
| 7.1 PERFILES Y TOPOGRAFÍAS DE LAS ZONAS MECANIZADAS.....                                  | 48 |

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer de corazón a mis tutores, Alejandro Frechilla Zabal y Luis Alberto Angurel Lambán. Siempre estuvieron dispuestos a guiarme con su dedicación y esfuerzo a lo largo de este trabajo. Gracias a su interés por enseñarme, mi visión de la investigación se amplió y ahora la encuentro un campo aún más apasionante y enriquecedor.

Asimismo, deseo agradecer sinceramente a la Unión Europea y al programa Horizonte 2020 por la financiación que ha hecho posible la realización de los experimentos incluidos en este trabajo, a través del proyecto SOUNDofICE (grant agreement nº 899352, FETOPEN-01-2018-2019-2020).

Finalmente, agradezco a todos los que me acompañaron en este camino. En especial a mi familia por su cariño y apoyo incondicional durante esta etapa.

# 1 INTRODUCCIÓN

El óxido de indio y estaño (ITO, *Indium Tin Oxide*) es un óxido conductor transparente, compuesto principalmente por óxido de indio ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) dopado con estaño, ampliamente utilizado en numerosas aplicaciones. En esencia, los átomos de estaño sustituyen a algunos átomos de indio dentro de la estructura cristalina del  $\text{In}_2\text{O}_3$ , que, de forma pura, adopta una estructura cúbica. Al introducir Sn, la estructura general se mantiene, aunque la red cristalina experimenta modificaciones debido al reemplazo de los iones de indio por los de estaño. El estaño actúa como un dopante "n", aportando electrones adicionales a la estructura, que son los responsables de la conductividad eléctrica del ITO.

La concentración de este dopante, es decir, la cantidad de Sn añadida, es un factor crítico, ya que influye tanto en la conductividad eléctrica como en la transparencia óptica del material. Un dopaje óptimo busca equilibrar la necesidad de una alta conductividad con la de una elevada transparencia. Típicamente se emplea un nivel de dopaje del 10%.

En resumen, la estructura del ITO es una red compleja donde la adición de estaño altera las propiedades del óxido de indio, dando lugar a un material con una combinación única de propiedades.

- Posee una baja resistividad eléctrica debido a que con el dopaje se introducen electrones libres en la estructura del material. La resistividad eléctrica del ITO suele oscilar entre  $10^{-4}$ - $10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$ , un valor elevado si se compara con otros conductores transparentes. Además de su estructura, las propiedades eléctricas de las películas ITO dependen también del proceso de deposición y de los diferentes tratamientos térmicos que se realicen [1].
- El ITO es altamente transparente en el espectro de luz visible, lo que permite su uso en aplicaciones donde se requieren materiales que dejen pasar la luz visible. Particularmente, esta transparencia es relevante en dispositivos como pantallas táctiles, pantallas planas y celdas solares [2].
- Presenta una excelente estabilidad térmica manteniendo sus propiedades estructurales a temperaturas cercanas a  $400^\circ\text{C}$ . Esto hecho incrementa su interés ya que muchos procesos de fabricación requieren procesos en donde se aplica calor. Además, su utilización es fundamental en la fabricación de dispositivos electrónicos donde existe sobrecalentamiento debido a los procesos de calentamiento inherentes a los mismos [3].

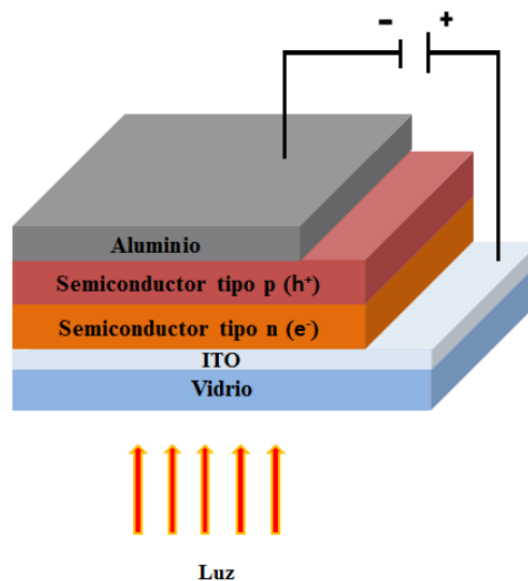
## 1.1 APLICACIONES

Como se acaba de indicar, el ITO es un material muy versátil con una amplia gama de aplicaciones, principalmente debido a su combinación única de transparencia óptica y conductividad eléctrica. Los sectores en donde más se utiliza son:

- En la fabricación de electrodos transparentes para dispositivos optoelectrónicos, en particular para pantallas táctiles y pantallas planas.

Su elevada transmitancia en el rango visible, combinada con una buena conductividad eléctrica, permite la integración de funciones electrónicas sin comprometer la visibilidad del dispositivo. En el caso de las pantallas táctiles, el ITO permite la detección precisa del contacto mediante la generación de campos eléctricos que se ven alterados por la presencia de un dedo u objeto conductor. Esta capacidad lo convierte en un material clave para la interfaz usuario-dispositivo. Sin embargo, todavía quedan nuevas posibilidades para ajustar sus propiedades ópticas y eléctricas, y mejorar la eficiencia de dispositivos o incluso introducir funcionalidades adicionales, como el control de la humedad o la reducción del reflejo mediante el empleo de nuevas técnicas como podría ser el procesado láser [4].

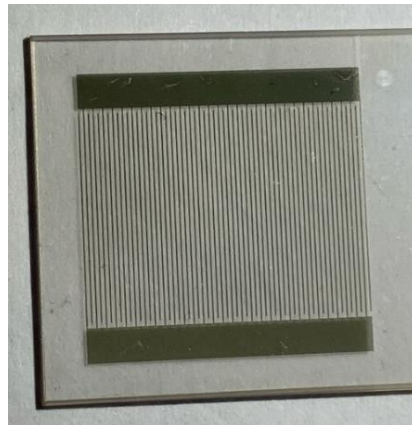
- El ITO es un material que abre nuevas oportunidades en las placas fotovoltaicas por su exclusiva combinación de alta transparencia óptica y excelente conductividad eléctrica. Actúa como electrodo frontal que permite el paso de la luz solar mientras recolecta eficientemente la electricidad generada. Este equilibrio lo diferencia de otros materiales, que suelen ser conductores opacos o transparentes aislantes. Además, la fina capa de ITO funciona como una capa antirreflectante, minimizando la pérdida de luz por reflexión y optimizando la absorción. También se integra como capa conductora transparente en celdas solares, facilitando la generación de corriente eléctrica por la luz solar [5].



*Figura 1 Estructura típica de una celda solar [5].*

- Es un material esencial en las ventanas inteligentes debido a que permite el paso de luz mientras conduce la electricidad necesaria para activar el cambio de estado de la ventana. Intercalado con materiales como cristales líquidos o electrocrómicos, el ITO posibilita el control dinámico de la opacidad o el color. Esto permite ajustar la entrada de luz y calor, mejorando la eficiencia energética y la privacidad en edificios y vehículos.

- En ciertas aplicaciones, especialmente para aplicaciones en las que se trabaje a bajas temperaturas ( $<0^{\circ}\text{C}$ ), y precisen de una alta transparencia, como, por ejemplo, en sensores o dispositivos aeronáuticos, se requieren nuevas soluciones funcionales. Este tema ha despertado recientemente el interés de la comunidad académica e industrial, dadas las implicaciones que los procesos de generación de hielo tienen en el transporte, en los generadores eólicos, en la energía fotovoltaica o en las telecomunicaciones. Algunas de las nuevas soluciones antihielo propuestas recientemente, que implican la propagación de ondas acústicas (AW) en sustratos adecuados, pueden abrir la vía a una alternativa sostenible a los procedimientos estándar de deshielo o anticongelación [6]. El ITO surge en este campo como un material muy interesante, ya que permite preparar circuitos transparentes de generación de ondas acústicas como el mostrado en la Figura 2.



*Figura 2. Circuito de ITO para aplicaciones antihielo. El circuito se puede observar porque el ITO se recubrió inicialmente con una capa de oro.*

- También tiene aplicación en dispositivos médicos como detectores de rayos X, y biosensores. La detección de biomoléculas liberadas por células vivas ha sido de gran interés en las ciencias biológicas y médicas durante las últimas décadas. Se utilizan diferentes tipos de microelectrodos como sensores amperométricos o potenciométricos para la detección de moléculas. La modificación de la superficie de los electrodos de ITO es una de las maneras más eficientes de aumentar su actividad electroanalítica y así avanzar hacia el desarrollo de biosensores para la detección de transmisores liberados por células [2].

## 1.2 MÉTODOS DE DEPOSICIÓN DE PELICULAS DELGADAS DE ITO

Según se ha visto en apartados anteriores, las películas conductoras transparentes de ITO se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones electrónicas y

optoelectrónicas debido a su alta transmisión en el rango visible, alta reflexión infrarroja y baja resistividad eléctrica.

La preparación de películas delgadas de este material requiere el uso de técnicas de deposición avanzadas como la pulverización catódica con magnetrón de DC y RF (*DC and RF magnetron sputtering*) [7], [8], [9] la evaporación por haz de electrones (*electron beam evaporation*)[10] o la pirólisis por pulverización (*spray pyrolysis*) [11]. En este apartado nos centraremos principalmente en la pulverización catódica por magnetrón o más conocido como *magnetron sputtering*, que es el proceso de deposición que se ha empleado para preparar las películas delgadas con las que se ha trabajado en este Trabajo Fin de Máster.

La pulverización catódica por magnetrón presenta muchas ventajas en la deposición de películas delgadas de ITO con respecto a otras tecnologías. En primer lugar, permite depositar películas sobre grandes áreas a velocidades comparables a las de la evaporación por haz de electrones, sin alcanzar las altas temperaturas por radiación típicas de las fuentes térmicas. Las velocidades de deposición del *magnetron sputtering* son superiores a las de la pulverización catódica por radiofrecuencia convencional y es una técnica que permite depositar una amplia gama de materiales. La pulverización catódica por magnetrón se considera uno de los mejores métodos para la preparación de películas de ITO [12].

El principio básico de la técnica de *sputtering* se puede entender cuando un electrón (en el gas enrarecido, por ejemplo, el argón) es acelerado por un campo eléctrico externo, originando así la ionización del argón y produciendo un electrón adicional. Estos dos electrones son acelerados nuevamente por el campo eléctrico produciendo así otros 4 electrones y así sucesivamente hasta producir una nube de electrones y de iones de Ar.

La evaporación ocurre en condiciones de vacío típicamente entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$  mbar. A continuación, la corriente de iones de Ar es dirigida hacia el blanco ya que este se encuentra a un potencial negativo. Este blanco es un disco de un material conductor que provee de la materia prima (ITO) necesaria para la fabricación del recubrimiento o de la película delgada.

Mientras los iones de Ar impactan en la superficie del blanco, los átomos se arrancan. Para aumentar el número de colisiones, el blanco se coloca sobre un magnetrón con un determinado perfil de líneas de campo magnético diseñado para confinar los electrones y aumentar su trayectoria ionizando más átomos de Ar mejorando así las tasas de deposición en el sustrato debido a la energía cinética con la que salen expulsados los átomos (Figura 3). Debido al alto número de impactos de los iones de Ar contra el blanco, se produce un incremento de temperatura por lo que es necesario implementar un sistema de refrigeración [13].

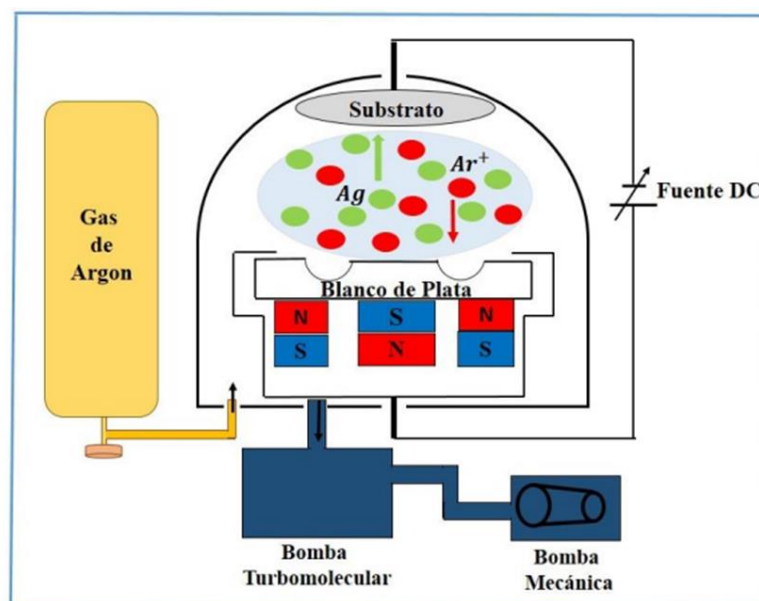


Figura 3. Esquema de un sistema de Magnetron Sputtering [13].

El espesor de la película de ITO es un parámetro que influye en las propiedades de este material. Por ejemplo, la transmitancia de una película de ITO disminuye al aumentar el espesor. Además, al incrementar el espesor de la película aumenta asimismo el tamaño del grano provocando dispersión de la luz. Sin embargo, los granos de gran tamaño también están relacionados con la baja resistividad de las películas. La Tabla 1 recoge los resultados de un estudio que muestra cómo cambia la resistividad con el espesor de la película de ITO [13], observándose los efectos comentados anteriormente.

| Espesor (nm) | Resistividad ( $\Omega$ cm) |
|--------------|-----------------------------|
| 200          | 17,4                        |
| 250          | 11,25                       |
| 300          | 6,6                         |
| 350          | 5,25                        |
| 400          | 4                           |

Tabla 1. Tabla de espesores de elaboración propia basado en [14].

Por otra parte, en la referencia [15] se realiza un estudio exhaustivo de diferentes películas de ITO con distintos espesores y sustratos, significativamente más delgadas que las presentadas en la referencia [13]. La Tabla 2 recoge estos resultados, junto con los valores de resistividad obtenidos para cada espesor, sustrato y técnica de deposición.

| ITO    | Sustrato | Técnica de deposición | Espesor (nm) | Resistividad( $\Omega$ cm) |
|--------|----------|-----------------------|--------------|----------------------------|
| ITO    | PET      | RTR                   | 25           | $3,1 \times 10^{-4}$       |
| ITO    | FEP      | DC sputter            | 10           |                            |
| ITO    | B270     | DC sputter            | 20           |                            |
| ITO    | Si       | RF sputter            | 40           | $6,68 \times 10^{-4}$      |
| ITO    | Glass    | RF sputter            | 22           | $1,62 \times 10^{-4}$      |
| ITO    | Glass    | DC sputter            | 28           | $2 \times 10^{-4}$         |
| Ni:ITO | Glass    | RF sputter            | 10           | $2,6 \times 10^{-4}$       |

|            |          |            |     |                       |
|------------|----------|------------|-----|-----------------------|
| <b>ITO</b> | Glass    | RF sputter | 10  | $7 \times 10^{-4}$    |
| <b>ITO</b> | Sustrato | 3DMS       | 20  | $1,25 \times 10^{-4}$ |
| <b>ITO</b> | LAO      | LMBE       | 10  | $1,16 \times 10^{-4}$ |
| <b>ITO</b> | YSZ      | RF sputter | 8,8 | $2,67 \times 10^{-4}$ |
| <b>ITO</b> | YSZ      | DC sputter | 30  | $3,1 \times 10^{-4}$  |
| <b>ITO</b> | Mica     | RF sputter | 100 | $6 \times 10^{-4}$    |
| <b>ITO</b> | Mica     | RF sputter | 10  | $1,32 \times 10^{-4}$ |

*Tabla 2. Tabla de espesores de elaboración propia basado [15].*

Estos estudios nos proporcionan una visión de la versatilidad que tiene este material, pudiendo prepararse sobre diferentes sustratos y técnicas de deposición. Además, existe un amplio rango de espesores que son interesante de estudiar según la aplicación objetivo.

### 1.3 MICROMECHANIZADO POR ABLACIÓN LASER

En muchos casos, las películas de ITO se emplean para la fabricación de circuitos debido a sus excelentes propiedades eléctricas y de transparencia. En este contexto, se han empleado diferentes tecnologías para la preparación de estos circuitos eléctricos.

El micromecanizado con láser surge como una tecnología muy interesante para la preparación de diferentes diseños de circuitos en películas delgadas, como, por ejemplo, en capas de ITO. En esta aplicación, el micromecanizado con láser se emplea para eliminar selectivamente el ITO dejando el patrón deseado. Algunos trabajos han estudiado el proceso de ablación del ITO con radiación láser empleando sistemas de nanosegundos [16], [17], picosegundos [18], [19] y femtosegundos [20], [21], [22], [23]. Sin embargo, este proceso de ablación requiere una densidad de energía láser suficiente para inducir este proceso de ablación y conseguir arrancar de forma controlada las películas delgadas.

En muchos casos, durante este proceso es común que se generen crestas elevadas en los bordes y queden residuos de ITO en el fondo ablacionado, lo que puede provocar cortocircuitos en la estructura o en los electrodos adyacentes. La calidad del micromecanizado es superior cuando se utiliza un láser de femtosegundos [24].

El micromecanizado con láser está sustituyendo a las técnicas tradicionales de fabricación de circuitos como el grabado húmedo o el grabado por plasma. Esto es debido a sus ventajas sobre los métodos anteriores, como la ausencia de disolventes peligrosos, gases corrosivos y un alto rendimiento [25], [26], [27].

Diversos estudios han utilizado láseres de nanosegundos [28], [29], [30], picosegundos [31], [32] y láseres de femtosegundos [20], [21], [22], [23] para el mecanizado de canales con anchuras comprendidas entre 10 y 200  $\mu\text{m}$  en películas ITO depositadas en sustratos de vidrio. Se consigue un buen aislamiento eléctrico de los elementos mediante la eliminación completa de la capa de ITO utilizando el micromecanizado con láser [33].

Las ventajas que presenta este proceso son las siguientes:

- Presenta una gran precisión ya que permite trabajar con detalles muy finos, ideal para aplicaciones como la fabricación de circuitos electrónicos de ITO [24].
- Minimiza el daño térmico gracias al control que se puede alcanzar en el proceso de deposición de la energía, minimizando la afección a las áreas circundantes.
- Gran versatilidad ya que se puede aplicar en una amplia gama de materiales, como metales, cerámicas, polímeros y materiales delicados como el ITO.

La tecnología láser se integra fácilmente en sistemas automatizados, asegurando alta repetibilidad y reducción de errores en la fabricación.

Las facilidades que presenta la fabricación por ablación son las siguientes:

- Permite realizar diseños a medida según las necesidades específicas del usuario o del proyecto. Se puede combinar con métodos como la fotolitografía o la impresión en 3D para ampliar sus aplicaciones.
- Hoy en día existen sistemas de ablación láser muy sofisticados y accesibles para diferentes industrias. Es un proceso con el que se puede conseguir una alta eficiencia en producción ahorrando tiempo y material, lo que se traduce en costos más bajos en procesos industriales.

## 1.4 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El desarrollo de procesos de fabricación a escala nanométrica o micrométrica se ha consolidado como un campo multidisciplinar con un tremendo potencial, influyendo prácticamente en todos los sectores de la ciencia y la industria. Como futuro ingeniero industrial hace que mi motivación aumente hacia el descubrimiento de nuevas técnicas vanguardistas y novedosas que están presentes en estos días como es la fabricación de circuitos eléctricos a escalas micrométricas.

El objetivo principal de este trabajo es avanzar en el diseño de un sistema de fabricación de microcircuitos basado en un proceso de ablación láser para películas delgadas de ITO depositadas sobre diferentes sustratos. Para la consecución de este objetivo principal, se trabajará desde unos objetivos más particular a otros más generales. Como objetivos particulares tendremos:

- Obtener los umbrales de daño de distintos recubrimientos de ITO y de diferentes sustratos.
- Emplear el sonido para una correcta monitorización del proceso de micromecanizado con láser de la capa de ITO.

Los objetivos más específicos se pueden agrupar en:

- Analizar la variación de los parámetros de procesado con el fin de reducir el tiempo de procesado y los costes de producción para determinadas configuraciones de circuitos.

- Analizar la posible correlación entre la calidad del acabado superficial y el tiempo de procesado.
- Diseñar circuitos funcionales con potencial aplicación en los distintos sectores industriales.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente capítulo se van a introducir los materiales, las técnicas de procesado y de caracterización utilizadas durante este Trabajo Fin de Máster.

### 2.1 CAPAS DE ÓXIDO DE INDIO Y ESTAÑO (ITO) SOBRE DIFERENTES SUSTRATOS

Las películas delgadas de ITO depositadas sobre diferentes sustratos fueron preparadas en el Instituto de Ciencia de los Materiales de Sevilla (ICMSE) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Estas películas de ITO se han depositado empleando un proceso de *magnetron sputtering* con las condiciones adecuadas para preparar unas películas homogéneas y con el espesor controlado.

Las diferentes muestras con las que se ha trabajado tenían las siguientes combinaciones de ITO y sustrato (Figura 4):

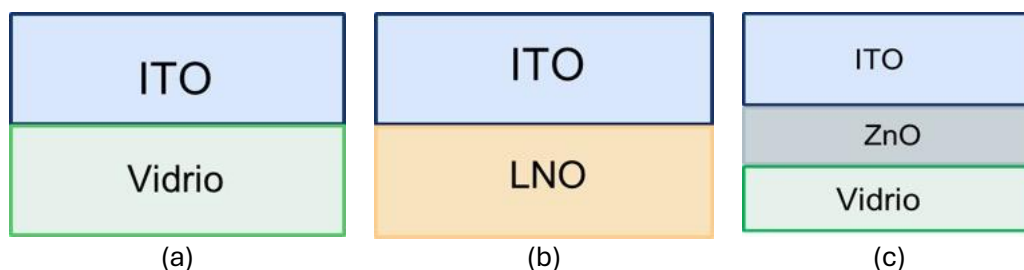


Figura 4. Esquema de las diferentes configuraciones de muestras estudiadas en este trabajo.

- La primera configuración es la de una capa de 150 nm de ITO depositada sobre vidrio (Figura 4 (a)). Esta configuración se utiliza en aplicaciones optoelectrónicas como pantallas táctiles, células solares o ventanas inteligentes. Se trata de un material económico y ampliamente disponible, [34].
- En segundo lugar, se ha trabajado con capas de 600 nm de ITO depositadas sobre niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ , LNO) (Figura 4 (b)). El LNO presenta propiedades electro-ópticas, piezoeléctricas no lineales, lo que lo hace ideal para aplicaciones avanzadas en fotónica y optoelectrónica. Su estructura cristalina permite alcanzar una alta eficiencia en moduladores ópticos y dispositivos de alta velocidad. Es un material versátil para tecnologías modernas debido a su capacidad de generar nuevas frecuencias ópticas mediante procesos no lineales [35]. Todas estas características hacen que sea ideal para sensores piezoeléctricos transparentes, dispositivos optoelectrónicos transparentes, interruptores ópticos, etc.
- La última configuración presenta tres capas. La primera de ellas es una capa de 320 nm de ITO, depositada sobre una capa de 5  $\mu\text{m}$  de ZnO, la cual a su vez está depositada sobre un sustrato de vidrio (Figura 4 (c)). El uso de muestras que combinan películas delgadas de ITO depositadas sobre ZnO y

sobre vidrio ofrece ventajas significativas tanto en términos de propiedades ópticas como electrónicas. El sustrato de ZnO, con su elevada movilidad electrónica y buena transparencia en el rango visible, puede mejorar la conductividad de la capa de ITO, al tiempo que mantiene una alta transmitancia óptica. Esto es especialmente beneficioso en aplicaciones optoelectrónicas como celdas solares, pantallas o dispositivos emisores de luz. Por otro lado, el empleo de vidrio como sustrato aporta estabilidad mecánica y térmica, además de ser un material económico y ampliamente disponible [36]. Esta combinación permite explorar sinergias entre los distintos materiales para optimizar el rendimiento del sistema final en función de los requisitos específicos del dispositivo. Además, nos permite estudiar el proceso de ablación láser en dispositivos más complejos de multicapas, más cercanos a la configuración

## 2.2 PROCESO DE MICROMECHANIZADO CON LÁSER

Los tratamientos láser se han realizado con un láser de femtosegundos modelo Carbide (CB3-40W+CBM03-2H-3H, Light Conversion, Vilnius, Lituania) emitiendo a una longitud de onda de 515 nm, en su segundo armónico. La radiación emitida está linealmente polarizada y el movimiento del haz láser se realiza con un sistema de espejos galvanométricos controlados por software Direct Machining Control.

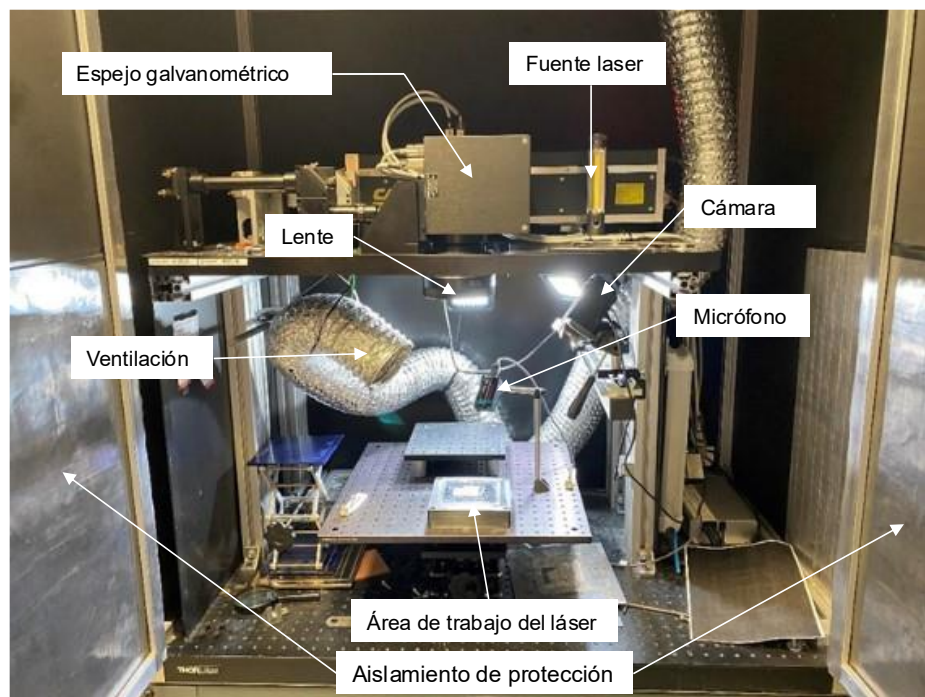


Figura 5. Sistema láser.

El sistema láser empleado se muestra en la Figura 5, en la que se pueden apreciar los diferentes elementos que lo componen. El sistema láser se encuentra ubicado en una cabina perfectamente aislada y que se cierra una vez se pone en funcionamiento por precaución. El haz es generado por la fuente láser y se refleja en

el sistema de espejos galvanométricos, para posteriormente atravesar la lente de focalización. Para una correcta monitorización del procesado de ablación con láser se ha instalado una cámara de video conectada a un monitor colocado en el exterior de la cabina. Debajo de la cámara se puede apreciar el micrófono que se utiliza en los procesos de monitorización acústica. Por último, también se puede observar el sistema de extracción que favorece la eliminación de gases y residuos que se hayan podido generar durante el proceso de ablación.

Tras haber descrito los elementos que componen el sistema láser se van a describir cómo se realiza el proceso de micromecanizado. En primer lugar, se fija la distancia de trabajo. En este trabajo se ha trabajado a la distancia en la que el haz láser está focalizado, formando un haz gaussiano de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro, utilizando el criterio  $1/e^2$ , [37]. Se ha utilizado un láser que emite a 515 nm, con pulsos de 249 fs. El sistema trabaja con una frecuencia de oscilador de 200 kHz o 1 MHz. La frecuencia de salida del láser se selecciona con un sistema llamado PPD, siendo este valor el cociente entre la frecuencia del oscilador y el PPD.

La energía de un pulso se puede calcular como:

$$E_{\text{pulso}} = \frac{\text{Potencia del laser}}{\text{frecuencia}}$$

Una vez que se ha obtenido la energía de un pulso se puede calcular la fluencia de un pulso, la cual usaremos más adelante para calcular la energía en una dimensión y en dos dimensiones, como:

$$F_{\text{pulso}} = \frac{E_{\text{pulso}}}{\pi \cdot (d_{\text{pulso}})^2}$$

Se ha seleccionado una geometría de barrido bidireccional, con una distancia entre líneas que vamos a llamar,  $d_{\text{líneas}}$ . En cada línea, la distancia entre dos pulsos,  $d_{\text{pulso}}$ , se controla seleccionando la velocidad de barrido,  $v_{\text{laser}}$ , y la frecuencia,  $f$ .

$$d_{\text{pulso}} = \frac{v_{\text{laser}}}{f}$$

Para conseguir que la distribución de energía a lo largo de una línea sea uniforme es necesario un mínimo de solape. Trabajos previos [ref] mostraron que era necesario alcanzar un solape tal que  $d_{\text{pulso}}/r_0 < 0,9$ . Cuando se cumple esta condición la energía en el centro de la línea escaneada por el haz puede considerarse constante y se puede estimar como:

$$F_{\text{centro}} = 1.588 \frac{\pi r_0}{2 d_{\text{pulso}}} F_{\text{pulso}}$$

La energía total depositada en un área dada durante el barrido a lo largo de una línea,  $F_{1D}$ , se puede calcular como:

$$F_{1D} = \frac{\pi r_0}{2 d_{\text{pulso}}} F_{\text{pulso}} = N_{1D} F_{\text{pulso}}$$

definiendo  $N_{1D}$ , como el cociente entre  $F_{1D}$  y  $F_{\text{pulso}}$ . Puede considerarse como el número efectivo de pulsos en una posición determinada [38].

$$N_{1D} = \frac{\pi \cdot \frac{d_0}{2}}{2 \cdot \delta_{pulso}}$$

De igual manera se puede calcular la energía depositada en el material durante el barrido en 2D:

$$N_{2D} = \frac{\pi \cdot \frac{d^2}{4}}{d_{lineas} \cdot d_{pulso}}, \quad F_{2D} = F_{pulso} \cdot N_{2D}$$

La potencia del láser es uno de los parámetros más importantes a seleccionar a la hora de realizar estos tratamientos. En el software que controla el láser, dicho parámetro se introduce mediante un valor porcentual denominado como *Attenuation*, en un rango de 0 – 100%. Es necesario, en un primer momento, calibrar el láser para conocer qué valor de potencia real corresponde a cada valor de atenuación. La curva de calibración del láser para esta longitud de onda se muestra en la Figura 6. Se observa que, la relación entre estas dos variables no es lineal, sino que se puede ajustar de una forma adecuada con un polinomio de segundo grado,  $y = 0,0005x^2 + 0,0879x - 0,9349$ , que nos permitirá calcular el valor real de potencia que emite el láser.

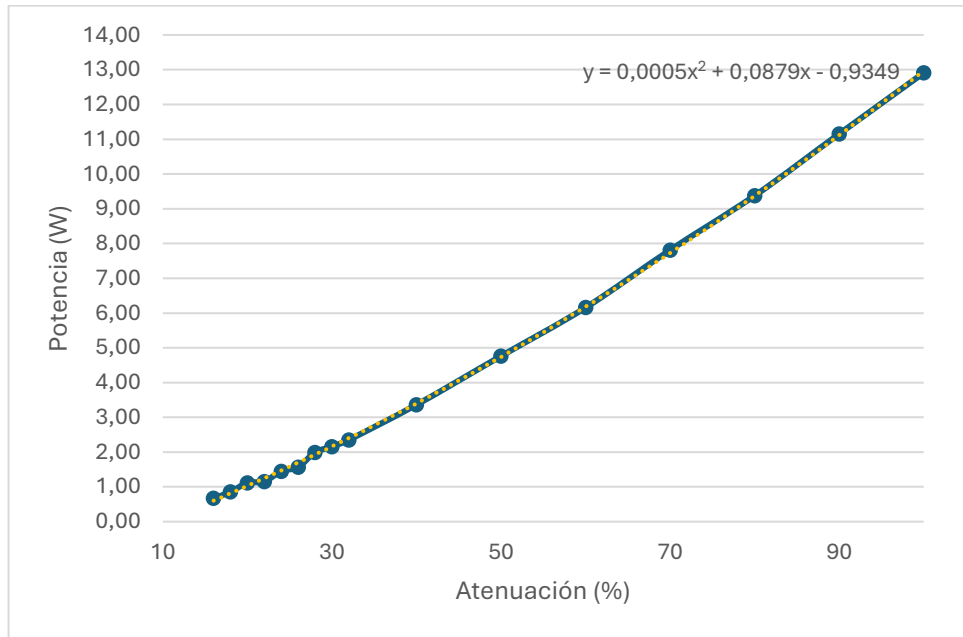


Figura 6: Curva de calibración de la potencia del láser.

## 2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

En esta sección se describen las técnicas de caracterización empleadas durante este TFM para caracterizar el resultado de los tratamientos de micromecanizado realizados.

### 2.3.1 Microscopio Confocal Plu 2300

La herramienta utilizada para medir tanto la anchura como la profundidad del volumen ablacionado por el láser ha sido el microscopio confocal Plu 2300 (Figura 7). El microscopio confocal Plu 2300 es un sistema de medición topográfica de una alta flexibilidad. El sistema permite obtener medidas e imágenes alternando entre varios modos: microscopio óptico estándar, perfilador topográfico confocal y microscopio de interferencia.

El tamaño del campo de medición depende del objetivo que se seleccione. Dispone de cuatro objetivos confocales (10X, 20X, 50X, y 100X) y dos objetivos interferométricos (10X y 20X). Es posible aumentar el área que se mide utilizando la opción de topografías extendidas.

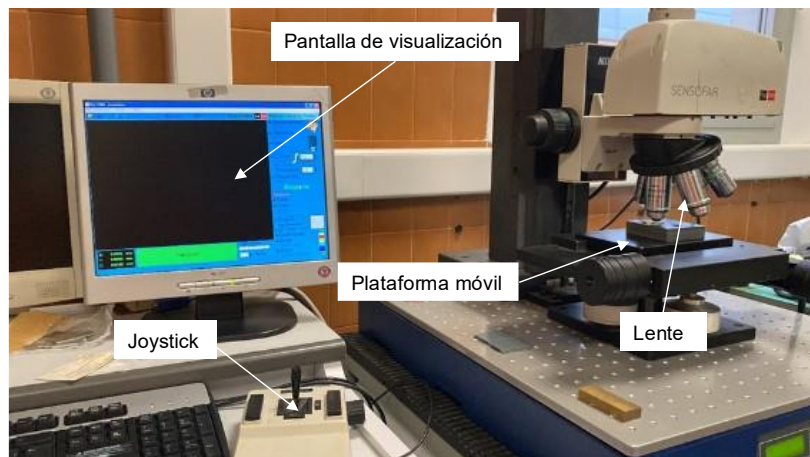


Figura 7. Microscopio confocal Plu y software de control.

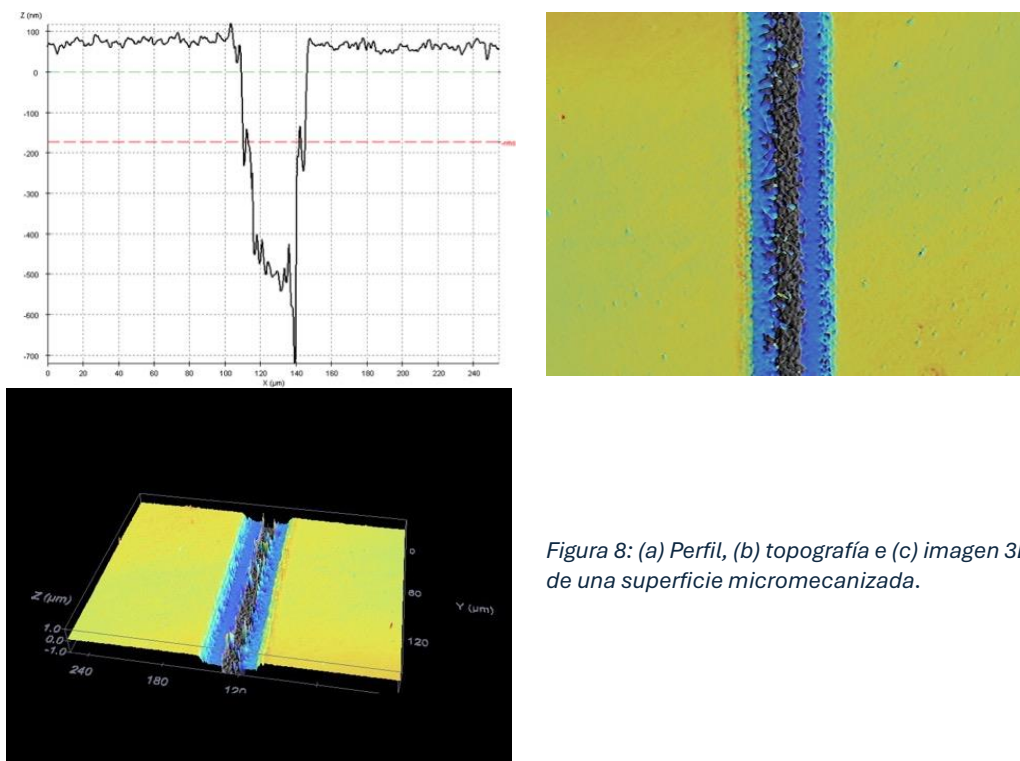


Figura 8: (a) Perfil, (b) topografía e (c) imagen 3D de una superficie micromecanizada.

Esta tecnología permite medir topografías con pendientes pronunciadas y superficies rugosas. La Figura 8 muestra un ejemplo del tipo de información que se puede obtener al medir la topografía de una superficie. Se puede obtener perfiles en 1D, topografías en 2D y en 3D. Con estas medidas es posible obtener información de cómo cambia la topografía de las muestras, su rugosidad e incluso medir de forma cuantitativa tanto la profundidad como anchura de las zonas mecanizadas por el láser.

### 2.3.2 Micrófono ultramic 384

Los procesos de ablación láser pueden llegar a monitorizarse escuchando el sonido que emite el material mientras está siendo ablacionado por el láser [39] debido a las ondas de choque que se generan durante el tratamiento.

El micrófono empleado para este TFM es un micrófono ultramic 384 (Figura 9) digital de sonido audible y ultrasonidos de alta calidad, conectado a un ordenador de control. Es un micrófono dual (acústico y ultrasónico) omnidireccional de altas prestaciones. Permite la amplificación de la ganancia con un interruptor de 4 posiciones fácilmente accesible. Tiene un convertidor analógico-digital integrado capaz de alcanzar una frecuencia de muestreo de 384 kHz, lo que significa que posee un ancho de banda de 190 kHz.

La señal acústica grabada por el dispositivo se puede visualizar y analizar empleando un programa de tratamiento de sonido. En la realización de este trabajo se ha utilizado el programa Audacity.



Figura 9. MICRÓFONO ULTRAMIC 384.

### 2.3.3 Medidas eléctricas

Por último, se ha empleado un multímetro para medir la resistencia de los circuitos. El equipo de medida es una Pinza Amperimétrica 400ª CA Auto-Rango HT4012 HT INSTRUMENTS. Este equipo permite realizar las mediciones de la resistencia de los circuitos de forma precisa.

En primer lugar, se repite 5 veces la medida de la resistencia del circuito empleando el multímetro para después calcular un valor de resistencia promedio ( $R_m$ ) y una desviación estándar ( $\sigma$ ). Con dichos valores obtenemos la resistencia máxima y mínima con la siguiente fórmula:

$$R_{\min}^{max} = R_m \pm 3\sigma$$

Una vez se ha obtenido la resistencia máxima y mínima mediante la siguiente formula se obtiene la resistividad ( $\rho_m$ ) máxima y mínima. La resistividad ( $\rho_m$ ) es una propiedad intrínseca de un material que cuantifica su oposición al flujo de corriente eléctrica. La, longitud, L, hace referencia a la longitud del material por donde fluye la corriente. El área, A, es la sección transversal del material por la que atraviesa la corriente y se calculará cómo:  $A = \text{espesor} \cdot \text{anchura}$ .

$$R_m = \rho_m \frac{L}{A}$$

Además, se calculará la incertidumbre de la resistividad con la siguiente fórmula:

$$u_\rho = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{2}$$

Y finalmente expresar la resistividad final como:

$$\rho_{min}^{max} \pm u_\rho$$

Estas medidas nos van a servir para caracterizar los diferentes circuitos fabricados durante este TFM, además, se podrá usar este equipo como medida rápida para comprobar que la ablación se desarrolla de forma efectiva.

### 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1 FENOMENOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE MICROMECHANIZADO

La ablación láser de películas delgadas es un proceso de gran relevancia en la industria. Comprender la interacción compleja entre el láser y el material es fundamental para optimizar la eficiencia y la precisión del mecanizado. Para controlar estos procesos, es necesario determinar los niveles de energía que se necesitan para eliminar la capa de ITO y los umbrales de ablación de los sustratos. En las estructuras mostradas en la Figura 4 es necesario eliminar la capa de ITO sin dañar al sustrato sobre el que está depositado. Por ello es relevante conocer la diferencia entre la energía necesaria para eliminar la capa de ITO y el nivel de energía con el que se empieza a dañar el sustrato. Conociendo estas energías, se podrá seleccionar las condiciones óptimas que sean capaces de eliminar la película minimizando la posibilidad de causar daño al sustrato sobre el que se deposita.

Es importante tener en cuenta que estos valores de los umbrales de daño dependen del protocolo que se utilice para escanear la superficie. Tal y como se muestra en la Figura 10, para cubrir una superficie, el haz láser barre inicialmente una línea que incide sobre material original. La línea siguiente se desplaza una cantidad que hemos llamado,  $d_{\text{líneas}}$ . Como se indica en la Tabla 3, en este trabajo se ha utilizado  $d_{\text{líneas}}=5\text{ }\mu\text{m}$ , mucho menos que el diámetro del haz. En consecuencia, durante este segundo barrido el láser incide mayoritariamente sobre material que ya ha sido afectado por el láser en la línea anterior. Algo similar ocurre al escanear las líneas siguientes. Para evaluar los umbrales de daño se ha decidido trabajar con cinco líneas que cubren una distancia entre centros de las líneas de  $25\text{ }\mu\text{m}$ , el radio del haz. Después de cada tratamiento de micromechanizado con el microscopio confocal se mide la profundidad y anchura de la zona afectada por el tratamiento láser.

| Parámetros del tratamiento láser |    |
|----------------------------------|----|
| Frecuencia (kHz)                 | 2  |
| v(mm/s)                          | 10 |
| $d_{\text{pulso}}(\mu\text{m})$  | 5  |
| $d_{\text{línea}}(\mu\text{m})$  | 5  |
| Número de líneas                 | 5  |

Tabla 3. Parámetros láser utilizados en los ensayos de determinación de los umbrales de ablación.

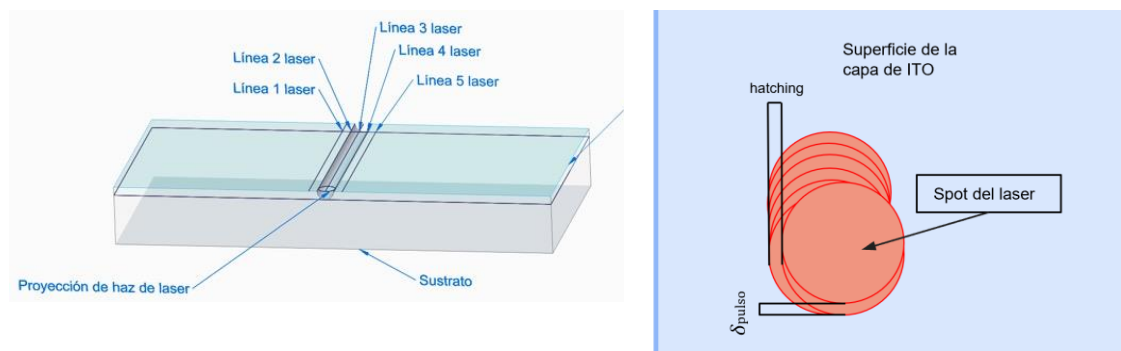


Figura 10. Esquema de la geometría utilizada en el barrido del haz láser.

Se ha decidido trabajar con una baja velocidad de procesamiento y una baja frecuencia ya que ello nos asegura un alto grado de control del proceso, minimizando el efecto térmico del tratamiento al maximizar el tiempo entre pulsos. Los parámetros de procesamiento se han elegido de forma que la distancia entre pulsos en una línea sea la misma que la distancia entre líneas. Al repetir los experimentos aumentando la potencia, con valores entre 1.12 y 12.91 W, se puede determinar en qué condiciones se ha eliminado completamente la capa de ITO y cuándo se empieza a dañar el sustrato. En la Figura 11 se muestran dos ejemplos de perfiles típicos. En el primero de ellos se ha ablacionado la capa de ITO sin dañar al sustrato, generando un perfil en forma de U. En este ejemplo se observa un ligero daño en el sustrato en la zona derecha del mecanizado. Por el contrario, en el de la derecha, con una doble estructura, la energía es suficiente para eliminar el ITO y ablacionar el sustrato de forma considerable.

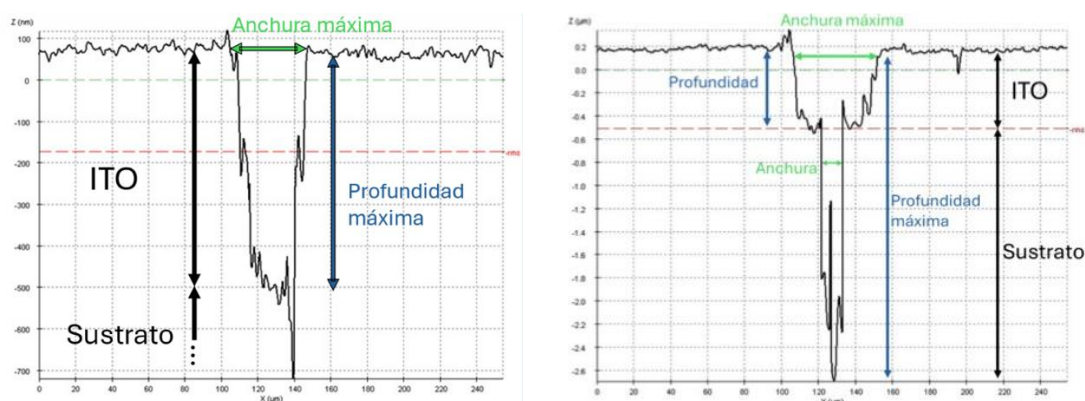


Figura 11. Perfiles de zonas micromecanizadas con unas condiciones de procesamiento (a) que eliminan la capa de ITO sin dañar el sustrato o (b) eliminando la capa de ITO y dañando el sustrato.

En el ANEXO I se han recogido todos los datos obtenidos con microscopía confocal de las dimensiones de las zonas mecanizadas. Se han seleccionado cuatro parámetros: la anchura en la superficie o anchura máxima, la anchura de la marca realizada en el sustrato cuando después de mecanizar el ITO se daña el sustrato, la profundidad máxima, la profundidad en la región de la capa superior, que obviamente debe estar relacionada con el espesor de la capa de ITO. Estos cuatro parámetros se han definido en los dos ejemplos mostrados en la Figura 11.

### 3.2 EFECTO DEL TRATAMIENTO LÁSER EN RECUBRIMIENTOS DE ITO SOBRE VIDRIO

En este apartado se va a realizar un análisis exhaustivo del mecanizado láser de una muestra de ITO sobre vidrio. Se van a utilizar los parámetros de procesamiento indicados en la tabla 3 y se va a ir incrementando el valor de la potencia láser aplicada, que ha variado entre 1.12 W y 12.91 W. En la Figura 12 se muestra cómo ha ido variando la profundidad máxima de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada, tanto cuando el tratamiento se realiza sobre la cara en la que está depositado el ITO como sobre la cara posterior, directamente sobre el vidrio.

Cuando el tratamiento se aplica sobre la cara con ITO, hasta potencias de 1.45 W no se observa ningún tipo de daño en la superficie del ITO. Este hecho también se refleja en la

evolución de la señal acústica mostrada en la Figura 13, en donde claramente se observa que los tratamientos realizados con 1.12 W, 1.15 W y 1.45 W no generan ninguna señal acústica.

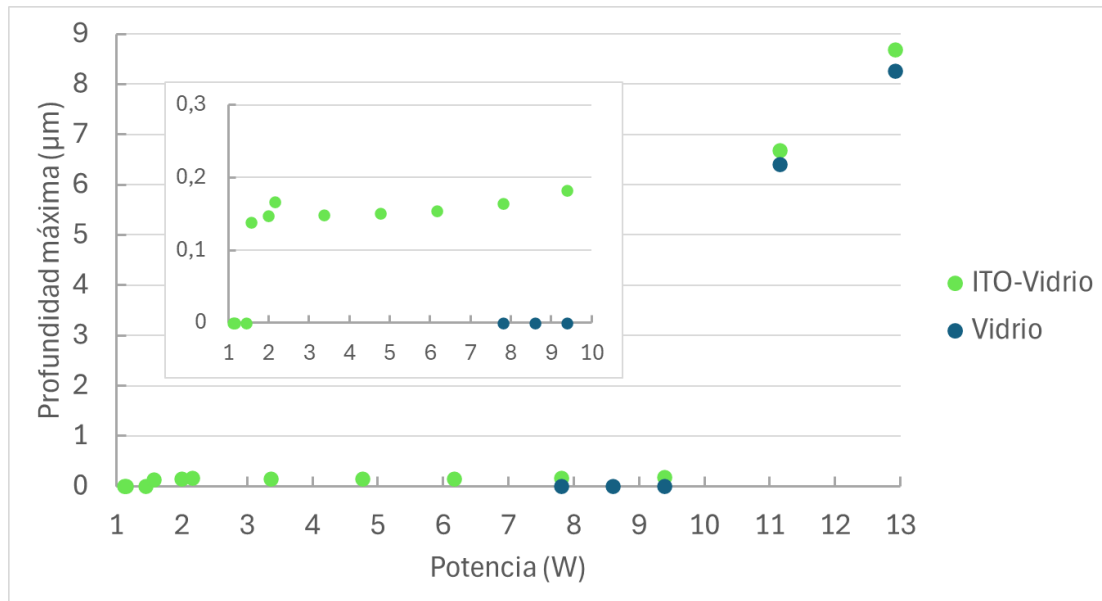


Figura 12. Evolución de la profundidad de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada cuando el tratamiento se aplica sobre la cara en la que está depositado el ITO o sobre directamente sobre el vidrio.



Figura 13. Señales acústicas registradas durante tratamientos sobre ITO depositado en vidrio con bajos valores de potencia.

El siguiente nivel de potencia aplicado es de 1.57 W y tal y como se observa en las medidas con microscopía confocal, este tratamiento es capaz de ablacionar casi en su totalidad toda la capa de ITO, en este caso de 150 nm. En la Figura 14 se muestra un detalle de la señal acústica registra durante este proceso de micromecanizado.

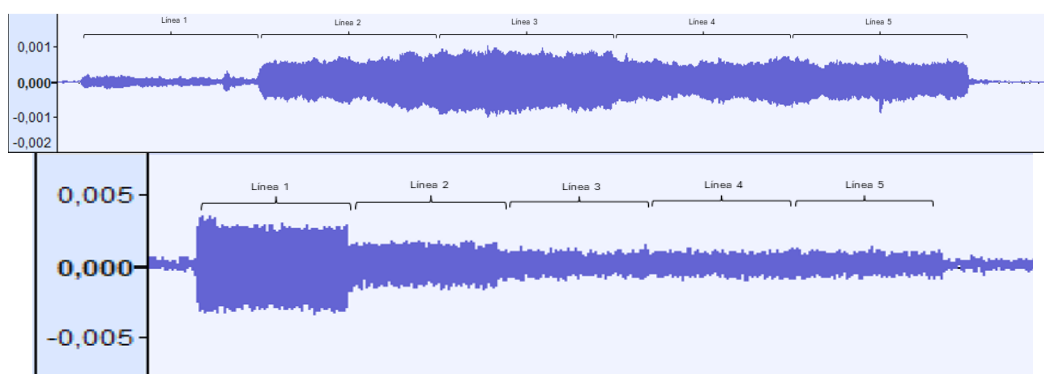


Figura 14. Comparación de las señales acústicas registradas durante el tratamiento realizado con 1.57 W (arriba) y el realizado con 2.16 W (abajo).

Cuando se ha realizado el tratamiento con 1.57 W se observa que durante el barrido de la primera línea la intensidad sonora es muy pequeña, indicando que cuando el láser incide sobre material original, lo afecta muy ligeramente. Por el contrario, cuando el láser mecaniza la segunda línea, como el solapamiento entre líneas es tan alto, está incidiendo sobre una región que ya había sido modificada en el tratamiento de la línea anterior aumentando el nivel de absorción produciendo mayor intensidad sonora, lo que se traduce en un mayor volumen de material ablacionado. En cambio, al trabajar con 2.16 W, el proceso cambia completamente. Este nivel de potencia es capaz de eliminar una parte importante del ITO sin dañar al vidrio. La segunda línea incidirá principalmente sobre un área que ya ha limpiado la línea anterior y solamente tendrá que limpiar el volumen correspondiente a las 5 micras que se ha desplazado y pequeños restos que habrán quedado después de la primera línea. Una situación similar se plateará con el resto de las líneas, en donde la combinación de las dos líneas anteriores ha eliminado completamente la capa de ITO y solamente tienen que actuar sobre el ITO asociado a las 5 micras que se han desplazado. Por ello el sonido muestra que la intensidad sonora es mayor durante la primera línea, decae fuertemente al barrer la segunda línea y después se observa una ligera reducción en el resto, mostrando todas ellas niveles similares de intensidad acústica.

Las medidas acústicas nos están indicando que para la potencia 1.57 W el procesado laser no termina de limpiar todo el ITO del recubrimiento. Sin embargo, para la potencia de 2.16 W si que parece que no quedan restos de ITO. Esto se observa en la Figura 15 que en la superficie de procesada con menor potencia quedan ciertos restos de ITO.

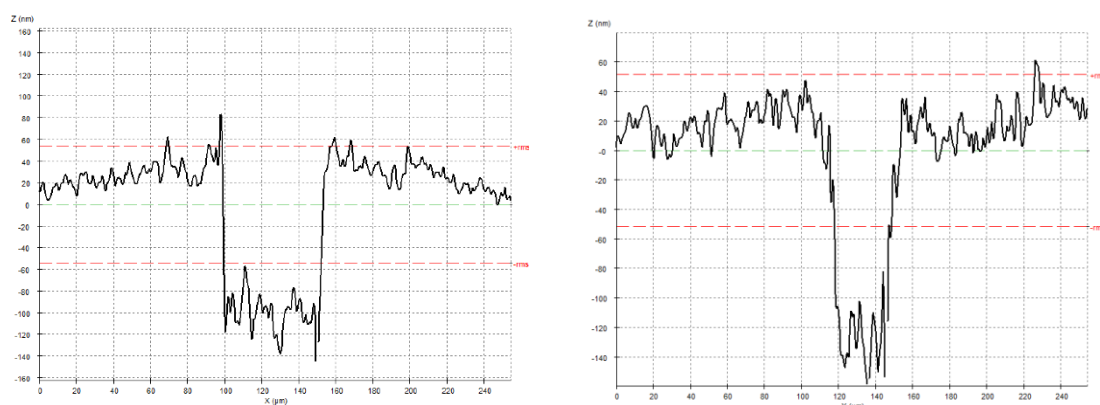


Figura 15. Perfiles de zonas micromecanizadas (a) potencia 1.99 W (b) potencia 1.57 W.

Tal y como se observa en la Figura 16, a partir de este momento el sonido muestra un patrón similar hasta que se alcanzan los 9.38 W, con un aumento de la intensidad de la señal. Un análisis de los datos mostrados en la Figura 12 pone de manifiesto que en este rango de potencias el láser está eliminando la capa de ITO sin dañar al sustrato de ITO. Por este motivo, dado que el espesor de la capa ablacionada no aumenta, este aumento de la intensidad acústica, que supone un aumento del volumen ablacionado, se debe traducir en un aumento de la anchura de la zona ablacionada, tal y como se aprecia en la Figura 17.

Al subir de 9.38 W a 11.15 W se observa otro cambio de fenomenología, tal y como se observa en la Figura 17 en donde se muestran las ondas acústicas generadas en estos tratamientos y los perfiles de las regiones micromecanizadas. La curva de 9.38 W muestra el mismo tipo de comportamiento que en los casos anteriores, La capa de ITO es

mayoritariamente eliminada en la primera línea, sin dañar al sustrato, y las siguientes solamente eliminan el volumen correspondiente a las 5 micras que se desplazan. Por el contrario, la señal registrada durante el tratamiento con 11.15 W es totalmente diferente. La capa de ITO se elimina durante la primera línea, pero debe empezar a dañarse el sustrato de vidrio. Este nivel de daño se incrementa durante el barrido de la segunda y tercera línea, después de la cual se alcanza un nivel uniforme de señal acústica. Estos hechos se confirman al observar los perfiles de las zonas mecanizadas con estos dos tratamientos. En el primero solamente se observa el mecanizado del ITO, mientras que en el segundo se observan las dos regiones.



Figura 16. Señales acústicas registradas durante tratamientos sobre ITO depositado en vidrio con valores de potencia por encima de 2.16 W.

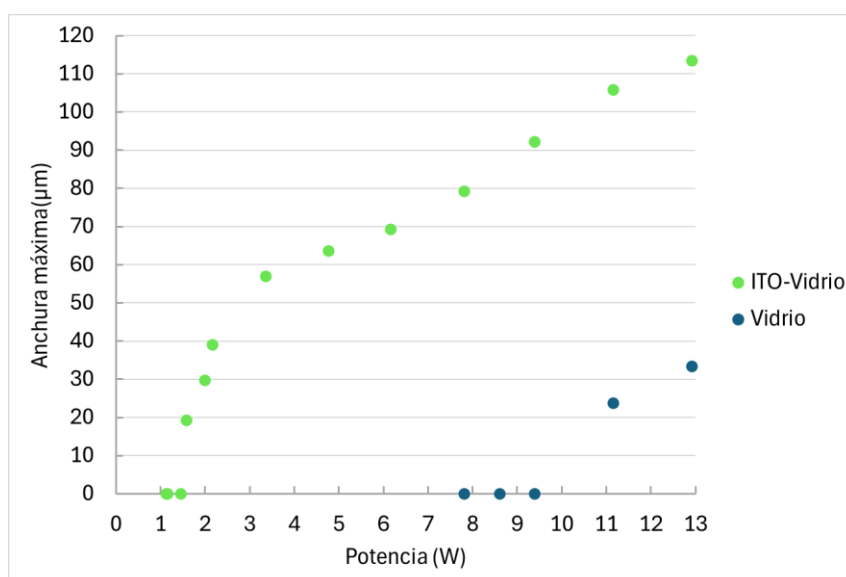


Figura 17. Evolución de la profundidad de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada cuando el tratamiento se aplica sobre la cara en la que está depositado el ITO o sobre directamente sobre el vidrio.

También cuando se incide directamente sobre el vidrio, este nivel de 11.15 W es capaz de generar ablación en el vidrio, tal y como se ha mostrado en las Figuras 12 y 17 y se aprecia en las señales acústicas mostradas en la Figura 19.

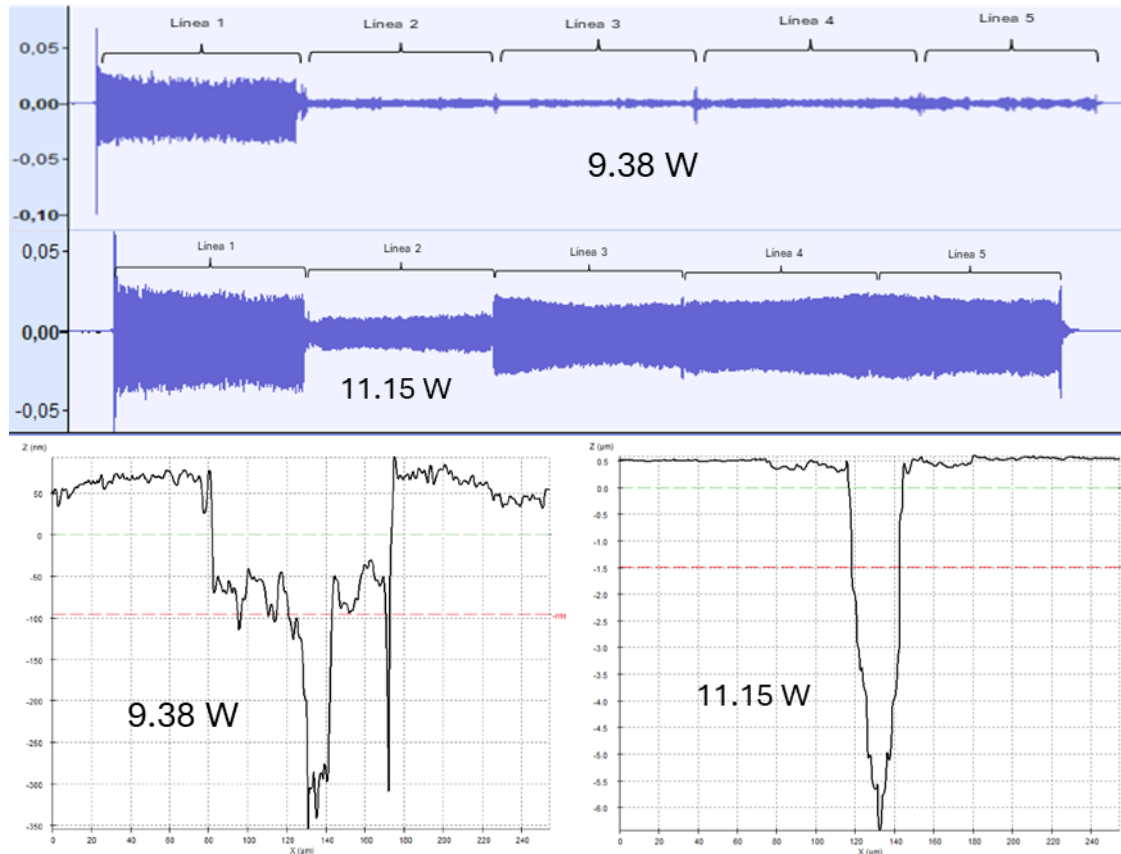
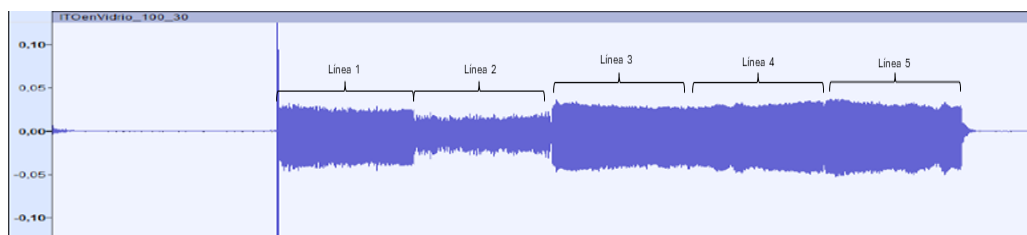


Figura 18. Señal acústica y perfiles de las zonas mecanizadas con 9.38 W y con 11.15 W.



Figura 19. Señales acústicas registradas durante tratamientos sobre vidrio.

En la Figura 20 se comparan los perfiles acústicos medidos en los tratamientos realizados con la máxima potencia, 12.91 W sobre las dos caras, una con el recubrimiento de ITO y la segunda vidrio. En el tratamiento sobre la cara en la que está depositado el ITO, la primera línea de ablación arranca completamente la capa de ITO. Por otro lado, en la muestra de vidrio, la primera línea apenas induce daño sin embargo provoca una modificación térmica en la superficie. Esta alteración estructural o química a nivel molecular, aunque sutil, reduce la energía de cohesión del material, facilitando así la ablación en las pasadas siguientes.



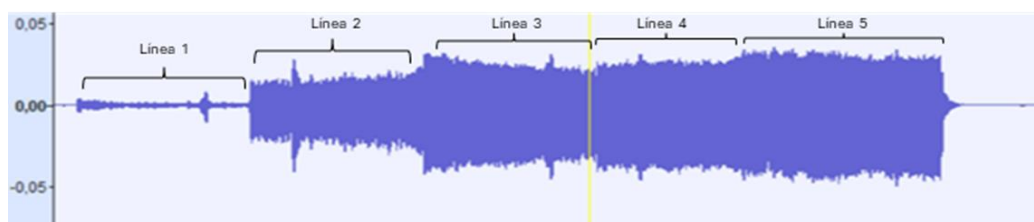


Figura 20. Comparación de las señales acústicas registradas durante el tratamiento realizado con 12.91 W en la cara con ITO (arriba) o directamente sobre el vidrio (abajo).

Al observar las ondas acústicas de ambos casos, cara con recubrimiento de ITO y cara de solo vidrio, se aprecian similitudes notables tanto en su forma como en la intensidad de la señal.

Específicamente, en el caso de la cara con el recubrimiento de ITO, las líneas 2, 3, 4 y 5 de la onda acústica coinciden en forma y amplitud con las líneas 2, 3, 4 y 5 de la onda correspondiente a la cara de solo vidrio. Esto significa que estas secciones de las ondas podrían superponerse perfectamente, corroborando que en el mecanizado de esas líneas se está dañando el sustrato.

En la incesante búsqueda por optimizar el procesado láser, resulta muy tentador operar dentro del rango de potencias comprendido entre 1.99 y 9.38 watios. Este intervalo permite la ablación completa de la capa de ITO sin dañar el sustrato de vidrio subyacente. Inicialmente, una estrategia atractiva sería aplicar potencias situadas en la parte superior de este rango, específicamente entre 3.36 y 9.38 watios. Esta aproximación promete una reducción significativa en el consumo energético y una optimización del tiempo de procesado, al lograr la ablación total del ITO en una única pasada o "primera línea". Sin embargo, un análisis detallado de la física de la interacción láser-material revela que esta aparente ventaja esconde una complejidad considerable que supone el reto de ajustar la potencia lo suficientemente alta para eliminar el ITO perfectamente en una sola pasada sin comprometer la integridad del sustrato. La proximidad a este umbral crítico, donde coexisten la ablación completa del ITO y el inicio del daño al sustrato, introduce riesgos que pueden comprometer el acabado superficial y la integridad del material base. Para sortear estos desafíos y comprender a fondo los fenómenos durante el micromecanizado láser de recubrimientos de ITO sobre vidrio, los análisis realizados demuestran que el monitoreo acústico y el uso de elementos de medida como el confocal son herramientas cruciales, permitiendo un entendimiento detallado de lo que ocurre en cada fase del proceso.

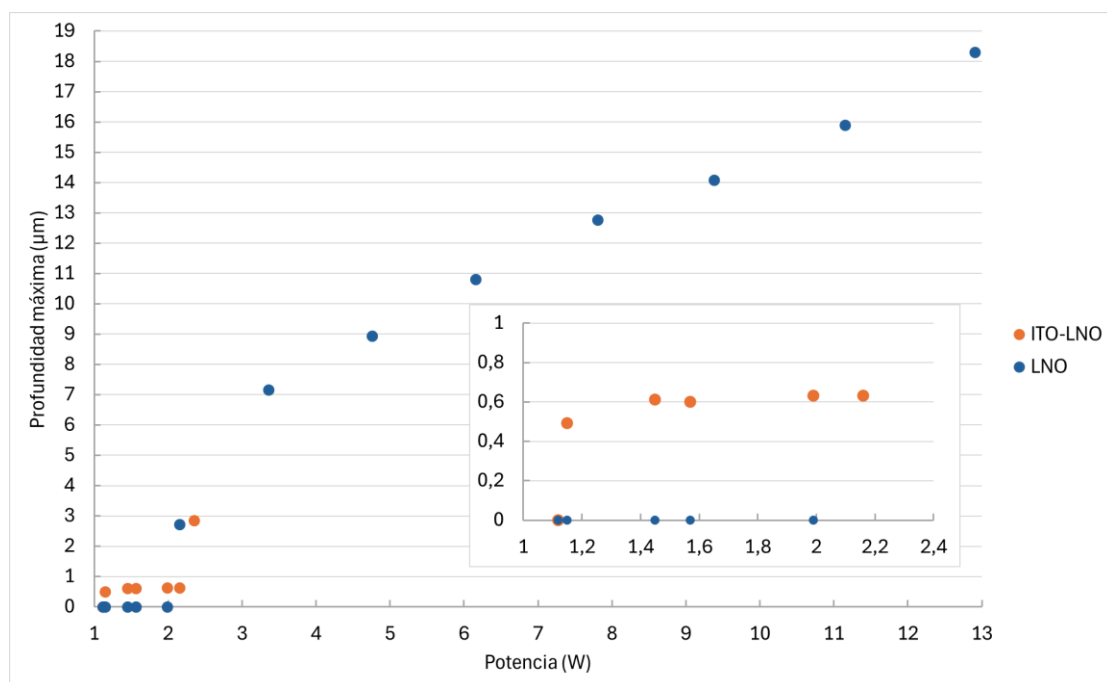
### 3.3 EFECTO DEL TRATAMIENTO LÁSER EN RECUBRIMIENTOS DE ITO SOBRE $\text{LiNbO}_3$

Una vez se ha estudiado el mecanizado láser de la muestra de ITO sobre vidrio se procede a realizar el mismo análisis cuando el ITO está depositado sobre un sustrato de  $\text{LiNbO}_3$  (LNO). En este caso, se ha aplicado un rango de potencias entre 1.12 W y 3.36 W cuando se trabaja sobre la cara del ITO depositado sobre el LNO y entre 1.12 W y 12.91 W cuando se incide directamente sobre el LNO. Como se ha indicado en la sección 2.1, en este caso el espesor de la capa de ITO es de 600 nm.

En la Figura 21 se muestra cómo ha ido variando la profundidad máxima de la zona mecanizada en función de la potencia del láser, tanto cuando el tratamiento se realiza

sobre la cara en la que está depositado el ITO como cuando se trabaja sobre la cara posterior, directamente sobre el LNO.

Cuando el láser incide sobre el recubrimiento de ITO, con el primer valor de potencia seleccionado, 1.12 W, no se observa ningún tipo de daño en la superficie del ITO. Con el siguiente nivel de potencia, 1.15 W, se ha eliminado parcialmente la capa, llegando a profundizar aproximadamente 490 nm (Figura 22a), pudiendo eliminar el espesor total de la capa de ITO con 1.57 W. Esta situación se mantiene hasta que se alcanzan 2.16 W, obteniendo unos perfiles en forma de U (Figura 22b). A partir de 2.35 W se comienza a dañar el sustrato de LNO.



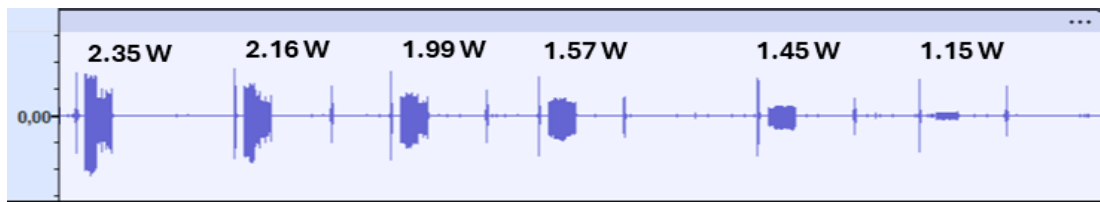


Figura 23. Señales acústicas registradas durante tratamientos sobre ITO depositado en niobato de litio con bajos valores de potencia.

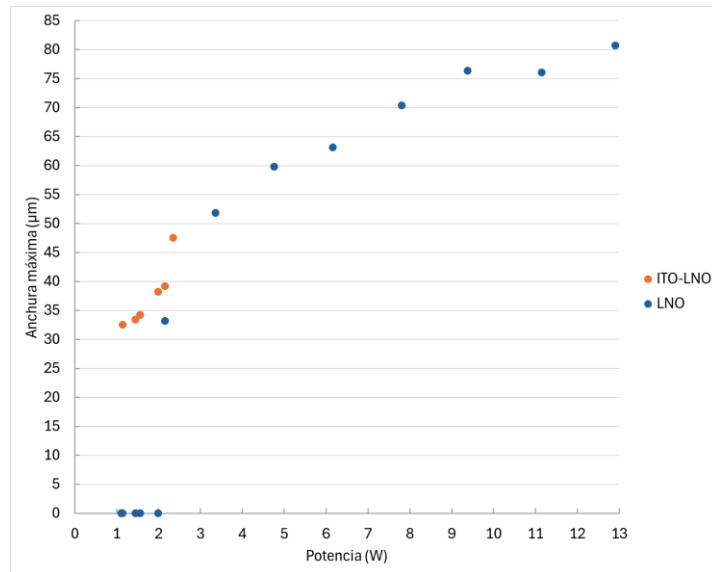


Figura 24. Evolución de la profundidad de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada cuando el tratamiento se aplica sobre la cara en la que está depositado el ITO o sobre directamente sobre el niobato de litio.

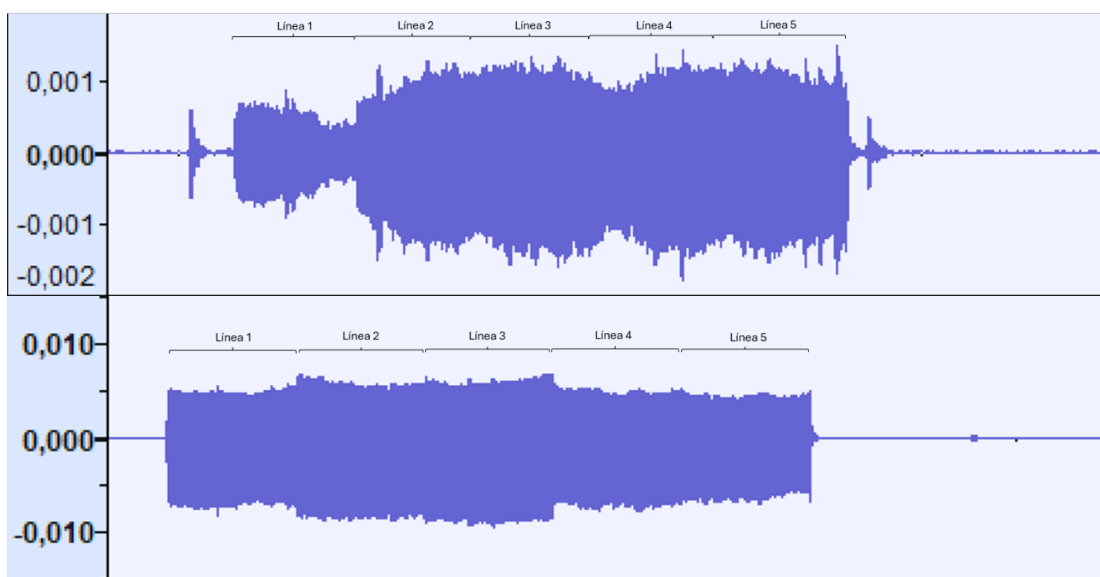


Figura 25. Señal acústica registrada durante los procesos de micromecanizado con 1.15 W y con 1.57 W. Conviene tener presente las diferencias de escala entre las dos señales.

En la Figura 25, se muestra en detalle la señal acústica registrada durante el proceso de micromecanizado al aplicar una potencia de 1.15 W y al utilizar 1.57 W. Con el primer nivel de potencia, y tal y como se apreciaba en el perfil mostrado en la Figura 22, el mecanizado no es uniforme, observando alta inhomogeneidad en la señal acústica. Se observa que la primera línea es la que genera un menor nivel de intensidad, aumentando en las siguientes líneas en donde el láser está incidiendo mayoritariamente sobre regiones que ya han sido afectadas por las líneas previas. Cuando el nivel de potencia se incrementa hasta 1.57 W, el nivel de intensidad acústica se incrementa un orden de magnitud.

Al incrementar el nivel de potencia de 2.16 W a 2.35 W se observa otro cambio de fenomenología, tal y como se observa en la Figura 26 en donde se muestran las ondas acústicas generadas en estos tratamientos y los perfiles de las regiones micromecanizadas. Con 2.16 W el perfil muestra de nuevo la típica forma en U asociada a la eliminación de la capa de ITO. Con 2.35 W, empiezan a generarse daños en el sustrato de LNO.

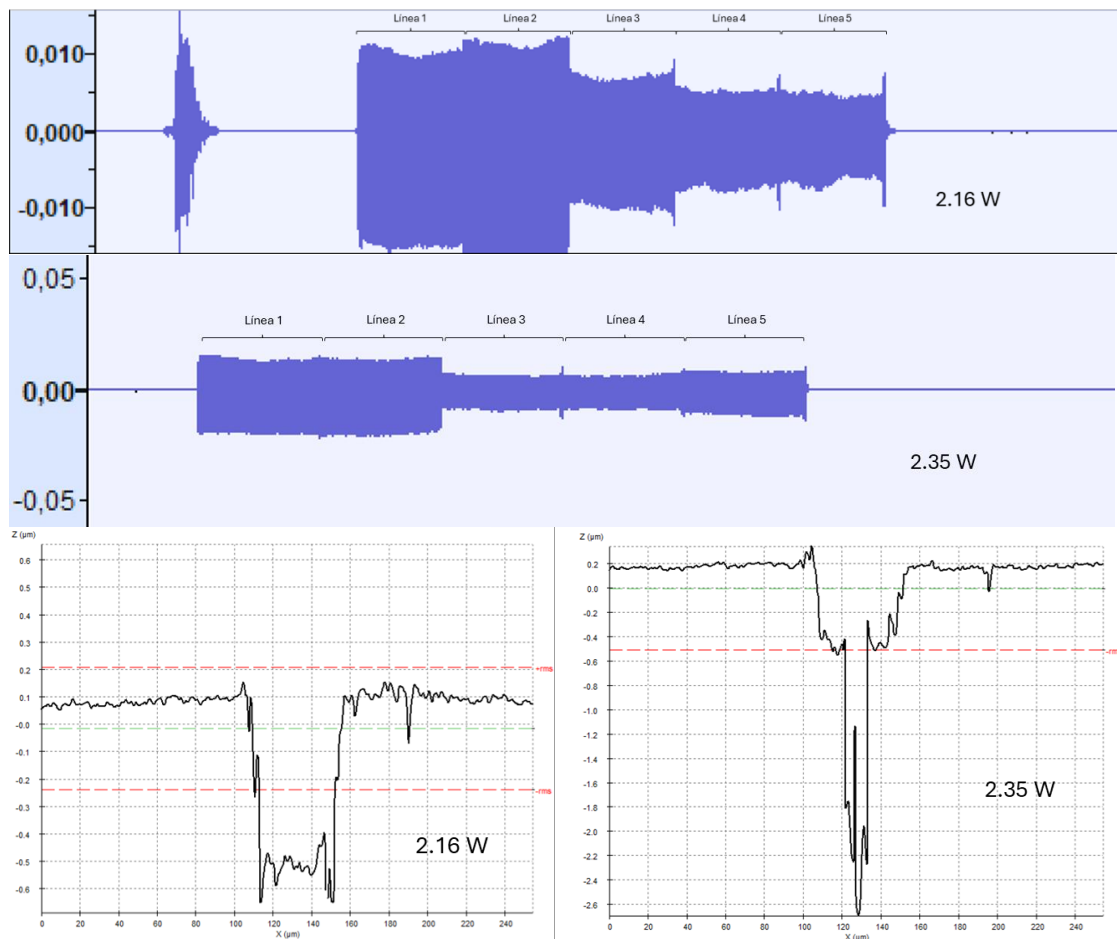


Figura 26. Señal acústica y perfiles de las zonas mecanizadas con 2.16 W y con 2.35 W.

Tal y como se observa en la Figura 27, al incidir sobre la superficie del LNO se observa que el nivel de umbral de daño es ligeramente inferior, ya con 2.16 W se comienza a dañar la superficie del LNO. Este valor es ligeramente inferior al que se observaba cuando se incidía

por la cara recubierta de ITO mostrando que parte de la energía del láser la absorbe el ITO y el nivel que incide sobre el sustrato es ligeramente inferior.

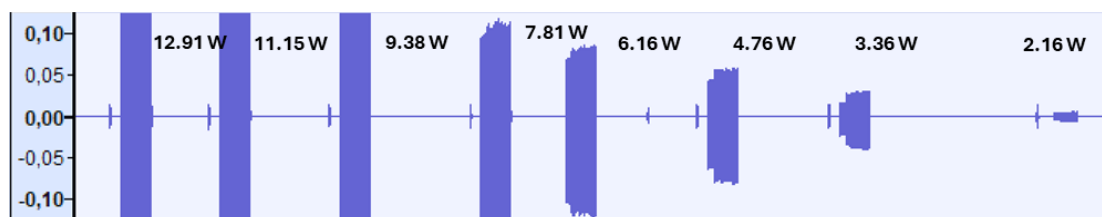


Figura 27. Señales acústicas registradas durante tratamientos sobre niobato.

En la Figura 28 se muestra el perfil acústico registrado cuando se ha hecho el tratamiento con 3.36 W. Comparando este perfil con los obtenidos al incidir sobre la capa recubierta de ITO (Figura 26) se observan grandes diferencias. Cuando se trabaja con 2.35 W sobre la cara con ITO, la intensidad de las dos primeras líneas es mayor que las siguientes. Durante las dos primeras líneas, el láser está eliminando mayoritariamente capa de ITO, comenzando a dañar el sustrato. En el caso del tratamiento con 3.36 W directamente sobre el sustrato, la intensidad de la primera línea es menor porque al incidir sobre LNO sin dañar la absorción es ligeramente más baja, una fenomenología similar a la que se observaba con tratamientos sobre vidrio, con niveles de potencia que eran capaces de ablacionar el sustrato.

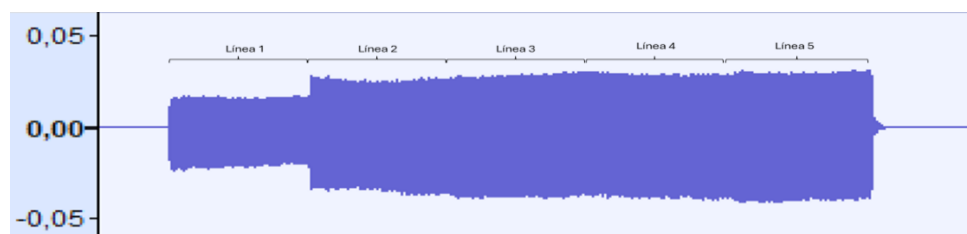


Figura 28. Señales acústicas registradas durante el tratamiento realizado con 3.36 W directamente sobre el niobato.

En consecuencia, cuando se trabaja con ITO depositado sobre LNO, el rango de potencias entre la necesaria para eliminar la capa de ITO y la que comienza a dar al sustrato se ha reducido a menos de 0.78 W, frente a los más de 8 W de diferencia que se han medido cuando el ITO está depositado sobre vidrio. Este hecho pone de manifiesto que en esta configuración es más conviene introducir sistemas de monitorización para definir un tratamiento que permita eliminar la capa de ITO minimizando el riesgo de dar al sustrato.

### 3.4 EFECTO DEL TRATAMIENTO LÁSER EN RECUBRIMIENTOS DE ITO SOBRE ZnO

Por último, en este apartado se realizará un análisis del mecanizado laser a un recubrimiento de ITO, de 320 nm de espesor, sobre un sustrato de ZnO. En este caso, se ha aplicado un rango de potencias entre 1.12 W y 2.35 W cuando el tratamiento se realiza

sobre la cara en la que está depositado el ITO y entre 1.12 W y 12.91 W cuando se incide directamente sobre el óxido de zinc.

En la Figura 29 se muestra cómo ha ido variando la profundidad máxima de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada, tanto cuando el tratamiento se realiza sobre la cara en la que está depositado el ITO como sobre la cara posterior, directamente sobre el ZnO.

Cuando el tratamiento se aplica sobre la cara con ITO, hasta potencias de 1.45 W no se observa ningún tipo de daño en la superficie del ITO. Este hecho también se refleja en la evolución de la señal acústica mostrada en la Figura 30, en donde claramente se observa que los tratamientos realizados con 1.12 W y 1.15 W no generan ninguna señal acústica.

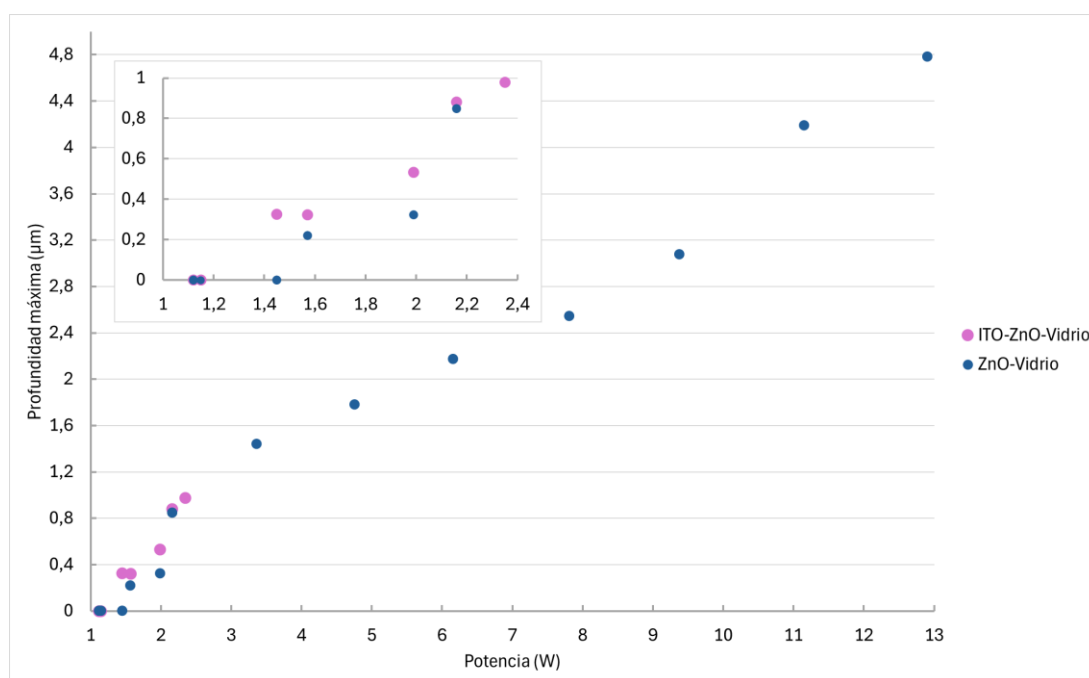


Figura 29. Evolución de la profundidad de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada cuando el tratamiento se aplica sobre la cara en la que está depositado el ITO o sobre directamente sobre el ZnO.



Figura 30. Señales acústicas registradas durante los tratamientos realizados sobre ITO depositado en ZnO.

El caso del tratamiento con 1.45 W y tal y como se observa en las medidas realizadas con microscopía confocal y en la señal acústica, mostradas en la Figura 31, se comienza a ablacionar el recubrimiento del ITO, pero sin llegar a ablacionar toda la superficie. Este hecho se ha traducido en que la señal acústica es muy inhomogénea y similar en las cinco líneas. Este tratamiento parece ser capaz de ablacionar en su totalidad toda la capa de ITO, en este caso de 320 nm. Pero si se analiza el perfil de las zonas mecanizadas para dicha potencia se observa que apenas está comenzando a dañar la capa de ITO. En la Figura 31

se muestra un detalle de la señal acústica y perfil de las zonas mecanizadas con 1.45 W registrada durante este proceso de micromecanizado.

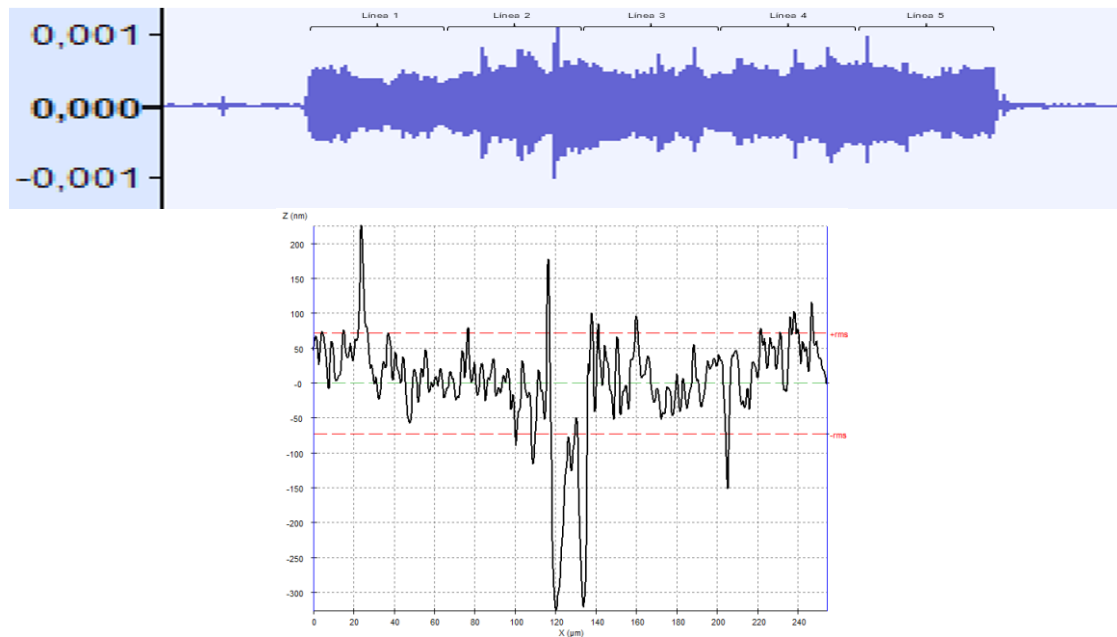
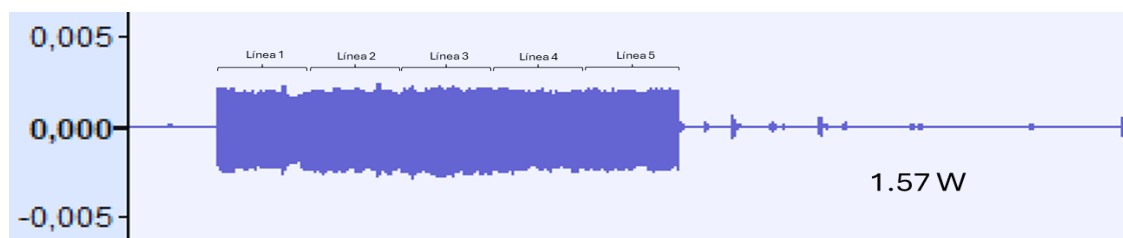


Figura 31. Señal acústica y perfil de las zonas mecanizadas con 1.45 W.

En la Figura 32 se observa que cuando se ha realizado el tratamiento con 1.57 W no se observan grandes diferencias entre la señal acústica de las cinco líneas mecanizadas, mostrando altos niveles de regularidad. Esto indica que cuando el láser incide sobre ITO con este nivel de potencia, el tratamiento láser está eliminando cantidades similares de ITO para cada una de las líneas trazadas por el láser.

Al subir de 1.57 W a 1.99 W se observa como la intensidad acústica aumenta, sin mostrar grandes diferencias entre la primera línea y las posteriores. Este hecho está indicando que el umbral de ablación del ZnO es muy cercano al del ITO. En la Figura 32 se muestran los detalles de las señales acústicas y de los perfiles medidos con microscopía confocal del tratamiento con 1.57 y 1.99 W. No se observa ninguno de los perfiles típicos en forma de U que se han observado en recubrimientos de ITO en vidrio y en LNO cuando se eliminaba la capa de ITO. En este caso, en cuanto el láser logra eliminar los 320 nm de ITO, comienza a dañar el sustrato. Estas diferencias se observan con gran claridad en los perfiles mostrados en la Figura 32.



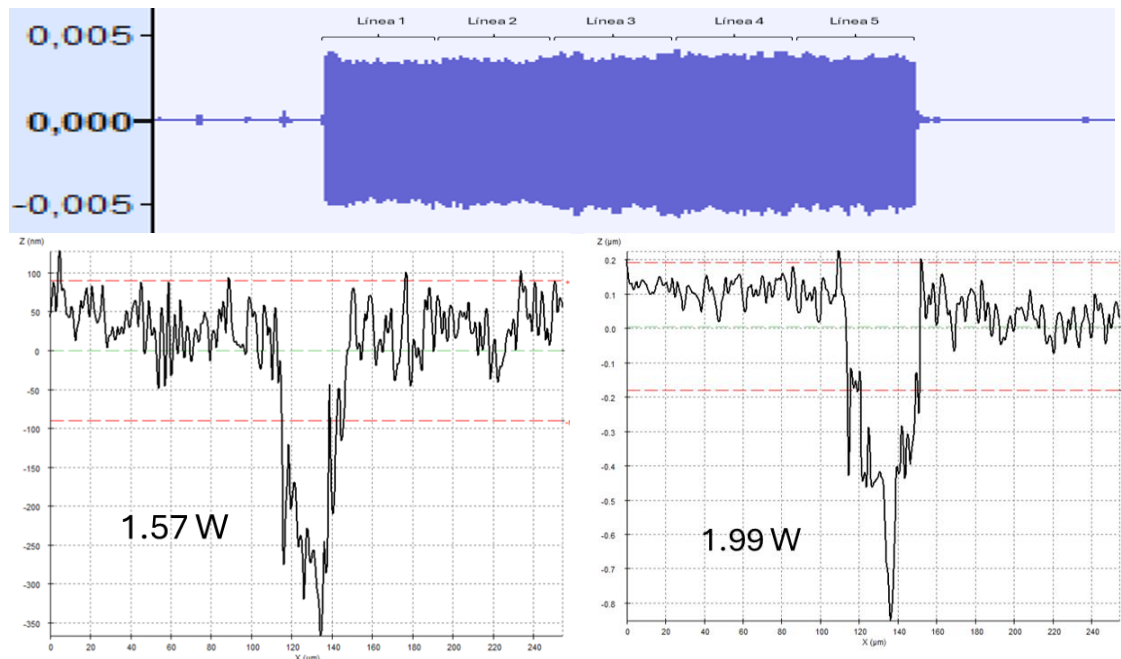


Figura 32. Señal acústica y perfiles de las zonas mecanizadas con 1.57 W y con 1.99 W.

Si se sigue incrementando la potencia hasta 2.35 W se observa como el láser ha ablacionado por completo la capa de ITO y está dañando de forma considerable el sustrato ZnO, mostrando una fenomenología similar a la morfología nombrada en la Figura 11 b). La señal acústica revela que en la primera línea se elimina la capa de ITO y en las restantes el sustrato con volumen de ITO correspondiente a las 5 micras que se desplazan, que viene marcado por un aumento en la intensidad que poco a poco ira decreciendo debido a que parte del sustrato se está ablacionando por las pasadas anteriores.

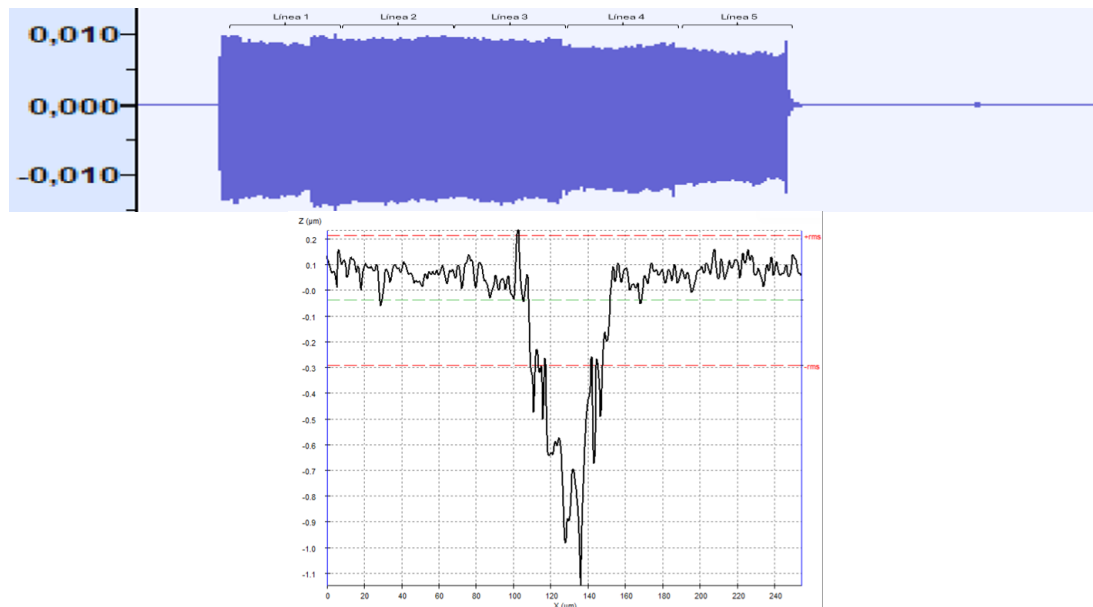


Figura 33. Señal acústica y perfil de las zonas mecanizadas con 2.35 W.

Tal y como se observa en la Figura 34, al incidir directamente sobre la superficie del ZnO, el nivel de umbral de daño es ligeramente inferior, ya con 1.57 W se comienza a dañar la

superficie del ZnO. Este comportamiento era similar al que se observaba en el caso de los recubrimientos sobre LNO, poniendo de manifiesto que parte de la energía del láser la absorbe el ITO y el nivel de energía que incide sobre el sustrato es ligeramente inferior.

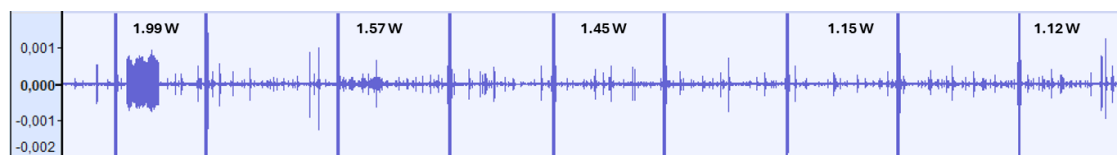


Figura 34. Señales acústicas registradas durante tratamientos sobre ZnO.

Estos resultados han puesto de manifiesto que el umbral de daño del ITO es muy similar al del ZnO. Ello ocasiona que no sea posible eliminar la capa de ITO con una única pasada láser sin dañar el sustrato. En consecuencia, para poder mecanizar circuitos de ITO en sustratos de ZnO será necesario definir protocolos con varias pasadas en donde se controla la cantidad de ITO que se va eliminando en cada pasada.

### 3.5 ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FRECUENCIA

La optimización de un proceso de micromecanizado requiere mejorar su eficiencia y precisión reduciendo todo lo posible el tiempo de procesado, el coste y la cantidad de material no aprovechado. En esta fase del proyecto, se ha analizado la posibilidad de aumentar la frecuencia del láser ya que ello permitiría aumentar la velocidad de procesado. Esta labor es fundamental para una posible industrialización del proceso.

Para este estudio de optimización se ha decidido trabajar con una muestra de ITO depositada sobre  $\text{LiNbO}_3$ . Para cada valor de frecuencia se ha realizado el siguiente barrido de potencias: 3.36 W, 2.86 W, 2.60 W, 2.35 W, 2.16 W, 1.99 W, 1.57 W, 1.45 W, 1.15 W, 1.12 W. Como se ha observado en la sección 3.3, cuando la potencia es inferior a 2.16 W, se está eliminando la capa de ITO sin dañar el sustrato de LNO cuando se trabaja con 2 kHz. Para las potencias por encima de este valor se empieza a dañar el sustrato de ITO. Tal y como se muestra en la Tabla 4, a velocidad de barrido se ha ido modificando al aumentar la frecuencia con el fin de mantener en todos los tratamientos un valor de  $d_{\text{pulso}} = 5 \mu\text{m}$ .

| Casos ( $\delta_{\text{pulso}} = 5 \mu\text{m}$ ) |    |    |    |     |     |      |     |      |
|---------------------------------------------------|----|----|----|-----|-----|------|-----|------|
| f (kHz)                                           | 2  | 4  | 10 | 20  | 50  | 66.7 | 100 | 200  |
| v (mm/s)                                          | 10 | 20 | 50 | 100 | 250 | 334  | 500 | 1000 |

Tabla 4. Tabla con los valores de frecuencia y velocidad de barrido utilizados en el estudio del efecto de la frecuencia de barrido.

En la Figura 35 se muestra cómo ha ido evolucionando la profundidad de la región micromecanizada. Esta muestra tiene un espesor de ITO de aproximadamente 400 nm. Una vez que se comienza a dañar el sustrato, la profundidad de la zona ablacionada aumenta con mucha más rapidez. Se observa que estos niveles de potencia varían al ir variando la frecuencia. En la Figura 36, se muestra como ha ido evolucionando el umbral de ablación del ITO en función de la frecuencia. En estos experimentos se ha definido este umbral como el último valor de potencia en donde no se modifica el recubrimiento de ITO. Hay que tener presente que el valor real estará entre esta potencia y la siguiente utilizada, a la que claramente se observa que el láser ya a ablacionado parte o todo el recubrimiento

de ITO. Se aprecia claramente que, a frecuencias mayores, el umbral de ablación disminuye. Esto quiere decir que la potencia necesaria para comenzar a ablacionar el recubrimiento de ITO (eje X de la Figura 36) disminuye conforme el láser irradia más pulsos por segundo.

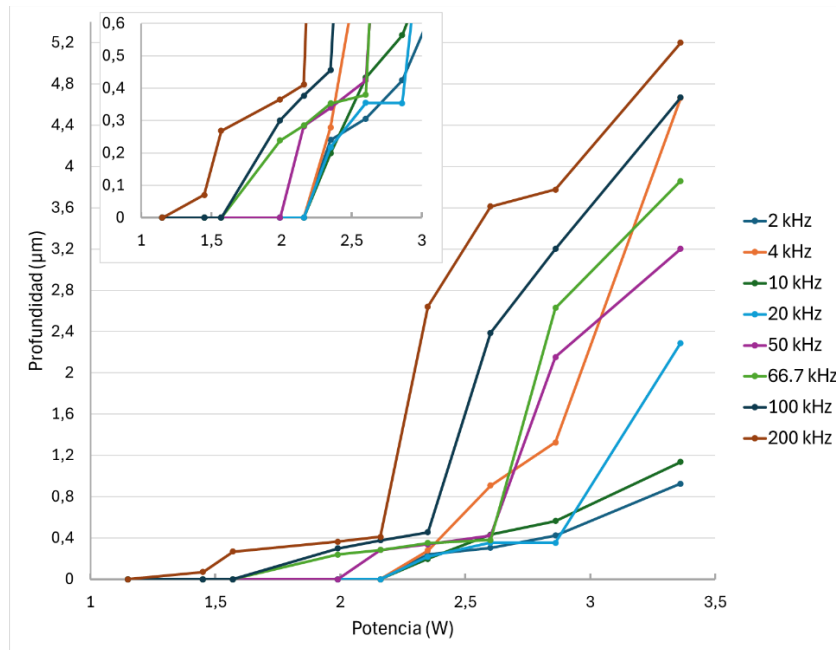


Figura 35. Evolución de la profundidad de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada cuando el tratamiento se aplica sobre la cara en la que está depositado el ITO sobre directamente sobre el LNO.

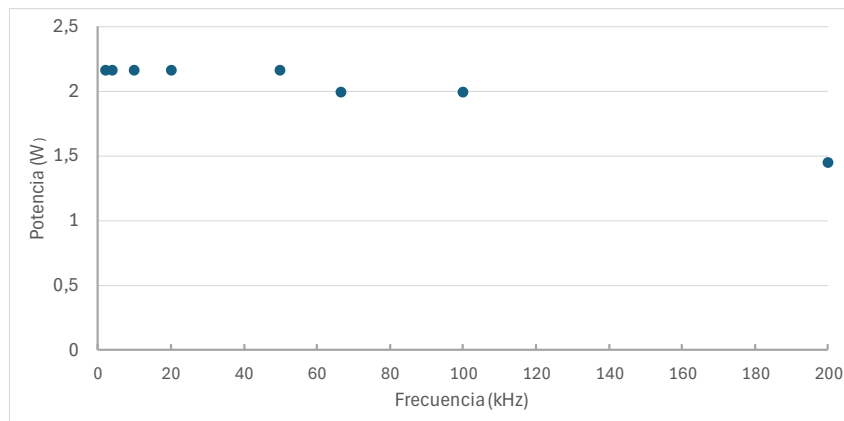


Figura 36. Evolución del umbral de ablación del ITO, asociado con el último valor de potencia estudiada que no produce modificación en el recubrimiento, en función de la frecuencia.

Es importante tener presente que, si se comparan los valores mostrados en la Figura 35 para la frecuencia de 2 kHz, con los mostrados en la Figura 21 no coinciden. Eso se debe a la diferencia de espesores de la capa de ITO y al hecho de que en el sistema láser, actualmente se ajusta la distancia entre la muestra y el láser a mano, por lo que es complicado volver a reposicionar la muestra en la misma posición cuando los tratamientos se realizan en días diferentes.

En consecuencia, al aumentar la frecuencia se puede eliminar la capa de ITO con menores valores de potencia, tal como se observa en las Figuras 35 y 36. Este fenómeno puede estar relacionado con la acumulación temporal de calor en la muestra, y que esta alta temperatura favorezca el proceso de ablación, reduciendo la energía del umbral de daño. Al trabajar con altas velocidades y altas frecuencias, el número de pulsos que llegan al material por unidad de tiempo crece sustancialmente, lo que produce una gran acumulación de calor. Esta acumulación de calor es muy importante en este tipo de procesos.

La Tabla 5 recoge el umbral de ablación del ITO para cada frecuencia y los tiempos total de procesado.

| Frecuencias (kHz) | Umbral de ablación (W) | Tiempo total de procesado (segundos/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------------|------------------------|-------------------------------------------------------|
| 2                 | 2.16                   | 2000                                                  |
| 4                 | 2.16                   | 1000                                                  |
| 10                | 2.16                   | 400                                                   |
| 20                | 2.16                   | 200                                                   |
| 50                | 2.16                   | 80                                                    |
| 66.7              | 1.99                   | 60                                                    |
| 100               | 1.99                   | 40                                                    |
| 200               | 1.45                   | 20                                                    |

Tabla 5. Umbral de ablación del ITO y tiempos de procesado.

Esta posibilidad de realizar los tratamientos a alta frecuencia supone una reducción considerable del tiempo de procesado como se muestra en la Tabla 5. Para obtener el tiempo de procesado para cada uno de los casos se ha empleado como referencia una muestra de 1 cm x 1 cm de área. Con la velocidad del láser como dato para cada uno de los casos se calcula el tiempo que dedica el láser para mecanizar una línea.

$$t_{1 \text{ línea}}(\text{segundos}) = \frac{1 \text{ cm}}{v}$$

Una vez se ha obtenido el tiempo de procesado láser para una línea se calcula cuantas líneas caben por lado en dicha área de la muestra con una separación entre líneas de 5 μm.

$$\text{Número de líneas} = \frac{10 \text{ mm}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}$$

Por último, se obtiene el tiempo total de procesado de dicha área de 1 cm x 1 cm como:

$$\text{Tiempo total de procesado} = t_{1 \text{ línea}} \cdot \text{Número de líneas}$$

La reducción del tiempo total del procesado reafirma las grandes ventajas que tiene la tecnología láser y este estudio de optimización en cuanto al potencial de industrialización del proceso.

Este resultado es muy favorable, ya que además de disminuir sustancialmente el tiempo de procesado, el menor requerimiento de potencia supone un mayor ahorro de energía.

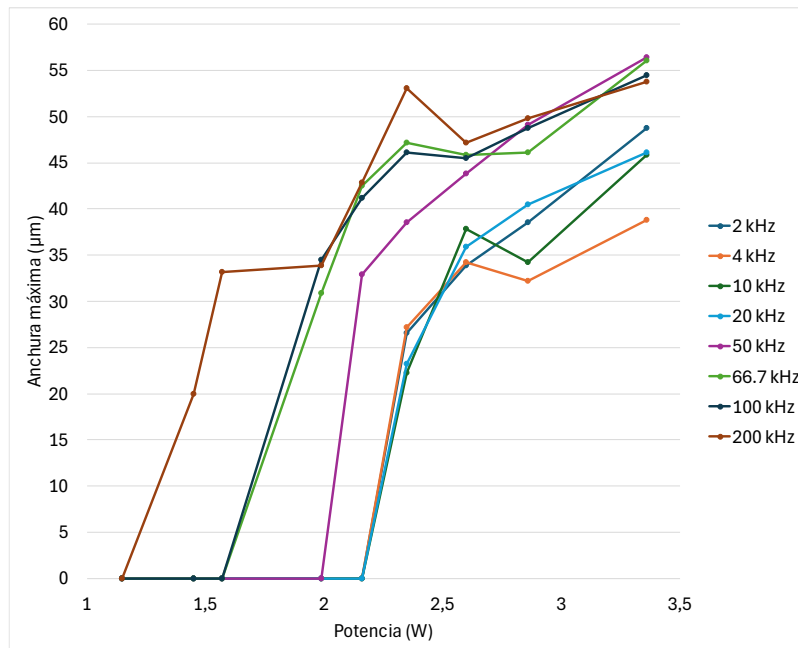


Figura 37. Evolución de la anchura de la zona mecanizada en función de la potencia aplicada cuando el tratamiento se aplica sobre la cara en la que está depositado el ITO sobre directamente sobre el LNO.

La Figura 37 muestra la dependencia de la anchura mecanizada con la potencia. Esto nos permite regular la potencia en función de la anchura que queramos en nuestros circuitos. Además, como para unas determinadas potencias el arranque de material en profundidad va a ser el mismo, es decir esa capa de ITO en su totalidad. Para ese rango de potencias se podría elegir la potencia más conveniente en función de si se quiere hacer un trazado de circuito más o menos ancho.

Para una mayor apreciación de los acabados superficiales de cada línea trazada para cada potencia en los diferentes escenarios se ha medido un perfil topográfico y una topografía 2D de cada una de las potencias. Como referencia, se han elegido las Figuras 38 y 39, que son representativas de las diferentes condiciones. La totalidad de las medidas se recogen en el ANEXO II. Las potencias elegidas son aquellas que para cada escenario diferente están más próximas al arranque total de esa capa de ITO de 400 nm.

Al analizar las imágenes de procesos láser, tanto en una como en dos dimensiones, notamos una relación clave: para lograr un óptimo acabado superficial a velocidades de procesamiento más altas, debemos reducir la potencia del láser. Esta reducción compensa el aumento de la energía por unidad de área que el material experimentaría, evitando así daños excesivos y garantizando una superficie más lisa.

La Figura 39 revela una mejora significativa en el acabado superficial al operar a una frecuencia de 200 kHz en comparación con 2 kHz. Este hallazgo no solo implica un ahorro de energía y una reducción en el tiempo de procesamiento, sino que también resulta en un perfil de grabado en forma de "U". Dicho perfil es óptimo para la elaboración de circuitos, lo cual subraya la ventaja de emplear frecuencias elevadas en estos procesos.

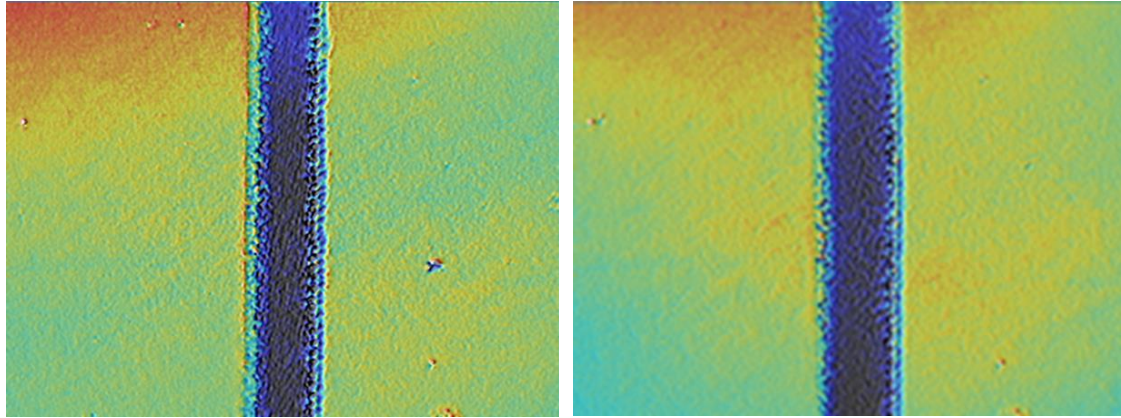


Figura 38. Topografía de las zonas mecanizadas con 2.6 W (2 kHz) y con 2.16 W (200 kHz).

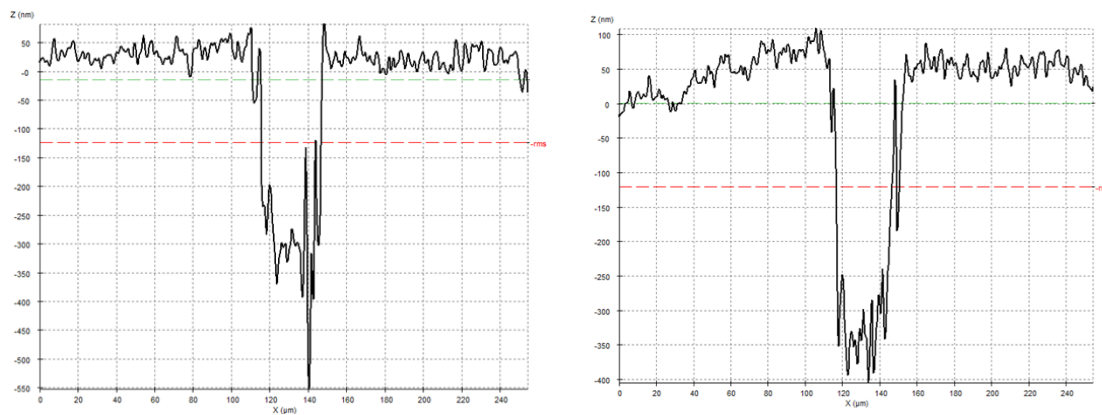


Figura 39. Perfiles de las zonas mecanizadas con 2.6 W (2 kHz) y con 2.16 W (200 kHz).

Esta capacidad de controlar con precisión el acabado superficial en procesos láser tiene una relevancia tecnológica e industrial significativa. Sienta las bases para el mecanizado láser de circuitos eléctricos en láminas delgadas de óxido de indio y estaño (ITO) sobre diversos sustratos. La ablación selectiva de capas delgadas mediante láseres de pulsos ultracortos es una técnica crucial aquí, permitiendo una eliminación de material extremadamente precisa con un daño térmico mínimo. Esto hace posible el procesamiento a nivel industrial de componentes electrónicos y es fundamental para la fabricación de dispositivos electrónicos flexibles y sensores avanzados. La creciente demanda de electrónica plegable y wearable hace que el mecanizado láser de alta precisión sobre sustratos flexibles sea un área vital para el desarrollo de la próxima generación de dispositivos.

### 3.6 EJEMPLO DE CIRCUITO ELÉCTRICO

Finalmente, para poner de manifiesto la capacidad de utilizar esta tecnología láser para la fabricación de circuitos eléctricos se ha mecanizado el circuito mostrado en la Figura 40, que consiste en dos electrodos entre los que hay conectado un conductor de ITO de 0.96 mm de anchura y 10 mm de longitud. A continuación, se muestra dos tablas con las dimensiones del circuito y con las condiciones de procesado.

| Dimensiones del circuito |      |
|--------------------------|------|
| Ancho (mm)               | 0.97 |
| Largo (mm)               | 10   |
| Espesor (nm)             | 150  |

Tabla 6. Dimensiones del circuito.

| Condiciones de procesado |      |
|--------------------------|------|
| Frecuencia (kHz)         | 10   |
| v(mm/s)                  | 50   |
| d <sub>pulso</sub> (μm)  | 5    |
| d <sub>línea</sub> (μm)  | 5    |
| Número de líneas         | 5    |
| Potencia (W)             | 3.36 |

Tabla 7. Condiciones de procesado.

Se ha medido la resistencia eléctrica, dando un valor de 0.21 kΩ, lo que nos da un valor de resistividad eléctrica de 0.003 Ω mm, un valor dentro del rango de valores de resistividad que se observan en estos tipos de recubrimientos, 0.001 – 0.007 Ω mm.

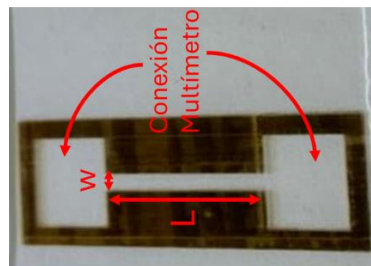


Figura 40. Circuito de prueba.

## 4 CONCLUSIONES

La investigación en el micromecanizado láser de capas de ITO ha emergido como un campo de estudio crucial para diversas aplicaciones tecnológicas, desde pantallas táctiles hasta dispositivos fotovoltaicos. Sin embargo, este proceso, aunque prometedor, presenta desafíos significativos que giran en torno a la optimización de los parámetros para lograr una ablación efectiva sin comprometer la integridad del sustrato. A pesar de existir un rango de potencias láser que permite una ablación eficiente del ITO sin dañar el sustrato subyacente, la proximidad al umbral de daño del sustrato exige un control extremadamente preciso, en particular, cuando los espesores de ITO a eliminar son considerables. Esta complejidad se acentúa en función del tipo de sustrato, donde ciertos materiales como el ZnO y el LNO, en contraste con el vidrio, demandan un mayor control para evitar daños.

Para garantizar la integridad del material y la calidad del acabado superficial, resulta indispensable implementar sistemas de monitorización avanzados. En nuestro caso, la combinación de microscopía confocal y un micrófono ha demostrado ser fundamental para supervisar el proceso de forma precisa. La microscopía confocal nos permite evaluar detalladamente el acabado superficial de los tratamientos aplicados, ofreciendo una visión clara de la morfología resultante. Por otro lado, el micrófono proporciona información en tiempo real sobre la evolución del proceso de ablación del material, permitiéndonos no solo conocer el volumen de material que se está eliminando por la intensidad del sonido, sino también determinar si la ablación se limita únicamente a la capa de ITO o si está afectando el sustrato subyacente.

En este TFM, hemos determinado el umbral de ablación del ITO utilizando estas dos técnicas complementarias: la microscopía confocal y la monitorización acústica. Los resultados obtenidos indican que, para los valores de los parámetros de procesado que se han utilizado, el umbral de ablación del ITO se encuentra en el rango de 1.15 a 1.57 W. Por el contrario, se ha medido un umbral de ablación de 11.15 W en el caso del sustrato de vidrio, pero si se utilizan como sustratos el LNO y ZnO, sus umbrales de ablación son mucho más próximos, 2.16 W para el caso del LNO y 1.57 W en el caso del ZnO.

Además, en este trabajo se ha estudiado cómo se modifica este umbral de ablación al cambiar la frecuencia del láser y se ha observado que se requiere menos energía cuanto mayor es la frecuencia debido a que la acumulación temporal de pulsos favorece el proceso de ablación.

Estos resultados constituyen un avance en el proceso de mecanizado láser de precisión lo que abre varias vías prometedoras para el futuro, consolidando el papel de esta tecnología en la industria e impulsando la innovación. Este TFM es el punto de partida que demuestra el gran potencial que tiene la tecnología láser para preparar circuitos eléctricos basados en películas de ITO sobre diferentes sustratos. Es por ello por lo que se abren multitud de líneas futuras de investigación para continuar este trabajo:

- Estudiar en profundidad los cambios que se pueden producir en cuanto a precisión del mecanizado o la generación de daños en el recubrimiento de ITO cuando se trabaja con frecuencias elevadas, con el fin de determinar con precisión cuál es la frecuencia más alta con la que se puede trabajar en esta aplicación.
- Preparación de circuitos con diferentes diseños para diversas aplicaciones, ya que el láser posee una gran versatilidad a la hora de diseñar los circuitos.

- Estudio de los umbrales de ablación de otros materiales como, por ejemplo, el silicio o el aluminio que se emplean típicamente como sustratos para las películas de ITO en diversas aplicaciones.
- Estudiar cambios microestructurales o químicos del ITO inducidos por el proceso de ablación laser.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Askari, H. Fallah, M. Askari, and M. C. Mohmmadieyh, "Electrical and optical properties of ITO thin films prepared by DC magnetron sputtering for low-emitting coatings."
- [2] M. Z. H. Khan, "Effect of ITO surface properties on SAM modification: A review toward biosensor application," Apr. 15, 2016, *Cogent OA*. doi: 10.1080/23311916.2016.1170097.
- [3] U. De Zaragoza, M. I. Melero, C. Directores, S. Demming, and J. G. Paracuellos, "CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR PROYECTO FIN DE CARRERA-INGENIERIA QUIMICA ESPECIALIDAD INGENIERIA DE PROCESOS," 2010.
- [4] O. Flor, "The role of advanced materials in flexible electronics," *Athenea*, pp. 54–62, Dec. 2024, doi: 10.47460/athenea.v5i18.85.
- [5] W. BAUTISTA AGUILAR, "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE QUÍMICA," May 2017.
- [6] J. del Moral *et al.*, "A Holistic Solution to Icing by Acoustic Waves: De-Icing, Active Anti-Icing, Sensing with Piezoelectric Crystals, and Synergy with Thin Film Passive Anti-Icing Solutions," *Adv Funct Mater*, vol. 33, no. 15, Apr. 2023, doi: 10.1002/adfm.202209421.
- [7] M. Bender, W. Seelig, C. Daube, H. Frankenberger, B. Ocker, and J. Stollenwerk, "Dependence of oxygen flow on optical and electrical properties of DC-magnetron sputtered ITO films," 1998.
- [8] L. R. Cruz, C. Legnani, I. G. Matoso, C. L. Ferreira, and H. R. Moutinho, "Influence of pressure and annealing on the microstructural and electro-optical properties of RF magnetron sputtered ITO thin films," *Mater Res Bull*, vol. 39, no. 7–8, pp. 993–1003, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.materresbull.2004.03.008.
- [9] W.-F. Wu, B.-S. Chiou, and S.-T. Hsieh, "Effect of sputtering power on the structural and optical properties of RF magnetron sputtered ITO films," 1994. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/0268-1242/9/6/014>
- [10] Koichi Haga, "Haga\_1992\_Jpn.\_J.\_Appl.\_Phys.\_31\_925," pp. 925–931, 1992.
- [11] S. Ashok, P.P. Sharma, and S.J. Fonash, "Spray-Deposited [TO-Silicon SIS Heterojunction Solar Cells," 1980.
- [12] W.-H. Kim *et al.*, "Effect of sputtering power on the structural and optical properties of RF magnetron sputtered ITO films You may also like Low Pressure Chemical Vapor Deposition of Aluminum-Doped Zinc Oxide for Transparent Conducting Electrodes Sputtered Indium-Tin-Oxide on p-GaN Effect of sputtering power on the structural and optical properties of RF magnetron sputtered ITO films," 1994.
- [13] D. Y. Construcción De Un Magnetron, F. Arévalo Olivares, and B. EL Rafael Pujada Bermudez TESIS PARA OBTAR TÍTULO DE, "UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA," 2018.

- [14] S. Vázquez, “Fabricación y caracterización de óxidos conductores transparentes depositados por medio de Sputtering para aplicaciones en dispositivos fotovoltaicos,” 2016.
- [15] K. Ouyang *et al.*, “Large-scale, high-transparency, ultra-thin ITO membranes with robust conductivity and flexibility,” *Acta Mater*, vol. 260, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.actamat.2023.119334.
- [16] M. F. Chen, Y. P. Chen, W. T. Hsiao, and Z. P. Gu, “Laser direct write patterning technique of indium tin oxide film,” *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 24 SPEC. ISS., pp. 8515–8518, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.tsf.2007.03.172.
- [17] Z. H. Li, E. S. Cho, and S. J. Kwon, “A new laser direct etching method of indium tin oxide electrode for application to alternative current plasma display panel,” *Appl Surf Sci*, vol. 255, no. 24, pp. 9843–9846, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.apsusc.2009.04.103.
- [18] G. Račiukaitis, M. Brikas, M. Gedvilas, and T. Rakickas, “Patterning of indium-tin oxide on glass with picosecond lasers,” *Appl Surf Sci*, vol. 253, no. 15, pp. 6570–6574, May 2007, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.01.099.
- [19] S. Xiao, E. L. Gurevich, and A. Ostendorf, “Incubation effect and its influence on laser patterning of ITO thin film,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 107, no. 2, pp. 333–338, May 2012, doi: 10.1007/s00339-012-6820-y.
- [20] Q. Bian, X. Yu, B. Zhao, Z. Chang, and S. Lei, “Femtosecond laser ablation of indium tin-oxide narrow grooves for thin film solar cells,” *Opt Laser Technol*, vol. 45, no. 1, pp. 395–401, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2012.06.018.
- [21] S. Krause, P. T. Miclea, F. Steudel, S. Schweizer, and G. Seifert, “Precise microstructuring of indium-tin oxide thin films on glass by selective femtosecond laser ablation,” *EPJ Photovoltaics*, vol. 4, 2013, doi: 10.1051/epjpv/2012013.
- [22] M. Park *et al.*, “Ultrafast laser ablation of indium tin oxide thin films for organic light-emitting diode application,” *Opt Lasers Eng*, vol. 44, no. 2, pp. 138–146, Feb. 2006, doi: 10.1016/J.OPTLASENG.2005.03.009.
- [23] H. W. Choi, D. F. Farson, J. Bovatsek, A. Arai, and D. Ashkenasi, “Direct-write patterning of indium–tin–oxide film by high pulse repetition frequency femtosecond laser ablation,” in *Applied Optics*, 23rd ed., vol. 46, H. W. Choi, D. F. Farson, J. Bovatsek, A. Arai, and D. Ashkenasi, Eds., 2007, pp. 5792–5799.
- [24] C. W. Cheng and C. Y. Lin, “High precision patterning of ITO using femtosecond laser annealing process,” *Appl Surf Sci*, vol. 314, pp. 215–220, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.06.174.
- [25] W. Wei, R. Hong, M. Jing, J. N. Jang, J. Lee, and Y. Jang, “cite this article: Mikio Mohri *et al.*,” 1990.
- [26] M. Hoheisel, A. Mitwalsky, and C. Mrotzek, “Microstructure and etching properties of sputtered indium—tin oxide (ITO),” in *physica status solidia*, 2nd ed., vol. 123, M. Hoheisel, A. Mitwalsky, and C. Mrotzek, Eds., Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 1991, pp. 461–472.

- [27] T.-H. Tsai and Y.-F. Wu, "cite this article: Mayumi Inoue et al," 1989.
- [28] K. H. Kim, S. J. Kwon, and T. O. Tak, "A study on removal of shoulders at laser ablated indium tin oxide film edge," *Jpn J Appl Phys*, vol. 47, no. 1, pp. 197–201, Jan. 2008, doi: 10.1143/JJAP.47.197.
- [29] K. H. Kim, S. J. Kwon, H. S. Mok, and T. O. Tak, "Laser direct patterning of indium tin oxide layer for plasma display panel bus electrode," *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, vol. 46, no. 7 A, pp. 4282–4285, Jul. 2007, doi: 10.1143/JJAP.46.4282.
- [30] G. Singh, H. Sheokand, S. Ghosh, K. V. Srivastava, J. Ramkumar, and S. A. Ramakrishna, "Excimer laser micromachining of indium tin oxide for fabrication of optically transparent metamaterial absorbers," *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 125, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1007/s00339-018-2013-7.
- [31] G. Račiukaitis, M. Brikas, M. Gedvilas, and T. Rakickas, "Patterning of indium-tin oxide on glass with picosecond lasers," *Appl Surf Sci*, vol. 253, no. 15, pp. 6570–6574, May 2007, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.01.099.
- [32] A. Risch and R. Hellmann, "Laser scribing of gallium doped zinc oxide thin films using picosecond laser," *Appl Surf Sci*, vol. 258, no. 5, pp. 1849–1853, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.apsusc.2011.10.060.
- [33] G. Singh, H. Sheokand, S. Ghosh, K. V. Srivastava, J. Ramkumar, and S. A. Ramakrishna, "Excimer laser micromachining of indium tin oxide for fabrication of optically transparent metamaterial absorbers," *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 125, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1007/s00339-018-2013-7.
- [34] J. B. Choi, J. H. Kim, K. A. Jeon, and S. Y. Lee, "Properties of ITO films on glass fabricated by pulsed laser deposition," in *Materials Science and Engineering: B*, Elsevier BV, Sep. 2003, pp. 376–379. doi: 10.1016/S0921-5107(02)00625-6.
- [35] H. Zhao, Y. Wang, T. Xue, H. Su, and J. Zhang, "Direct evidence of visible surface plasmon excitation in ITO film coated on LiNbO<sub>3</sub> slabs," *Opt Express*, vol. 25, no. 6, p. 6227, Mar. 2017, doi: 10.1364/oe.25.006227.
- [36] M. J. Sánchez-Rivera, M. J. Orts, V. Pérez-Herranz, and S. Mestre, "Effect of type and amount of alumina as dopant over the densification and the electrical properties of zinc oxide ceramic electrodes," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 60, no. 1, pp. 53–61, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.bsecv.2020.01.003.
- [37] J. M. Liu, "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," 1982.
- [38] J. Rivera-Sahún, L. Porta-Velilla, G. F. de la Fuente, and L. A. Angurel, "Use of Green Fs Lasers to Generate a Superhydrophobic Behavior in the Surface of Wind Turbine Blades," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 24, Dec. 2022, doi: 10.3390/polym14245554.
- [39] E. M. Maingi *et al.*, "UV femtosecond laser cleaning of encrusted historical stained-glasses," *J Cult Herit*, vol. 61, pp. 100–108, May 2023, doi: 10.1016/j.culher.2023.03.005.

## 6 ANEXO I TABLAS

### 6.1 ITO SOBRE VIDRIO

| Potencia (W) | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad (μm) | Anchura (μm) |
|--------------|-------------------------|---------------------|------------------|--------------|
| 1.12         | 0                       | 0                   |                  |              |
| 1.15         | 0                       | 0                   |                  |              |
| 1.45         | 0                       | 0                   |                  |              |
| 1.57         | 0.14                    | 19.26               |                  |              |
| 1.99         | 0.15                    | 29.88               |                  |              |
| 2.16         | 0.17                    | 39.18               |                  |              |
| 3.36         | 0.15                    | 57.10               |                  |              |
| 4.76         | 0.15                    | 63.74               |                  |              |
| 6.16         | 0.15                    | 69.39               |                  |              |
| 7.81         | 0.16                    | 79.35               |                  |              |
| 9.38         | 0.18                    | 92.30               | 0.11             | 35.19        |
| 11.15        | 6.68                    | 105.91              | 0.12             | 27.89        |
| 12.91        | 8.68                    | 113.54              | 0.14             | 36.85        |

Tabla A.1. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados sobre ITO depositado en vidrio.

| Potencia (W) | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) |
|--------------|-------------------------|---------------------|
| 7.81         | 0                       | 0                   |
| 8.60         | 0                       | 0                   |
| 9.38         | 0                       | 0                   |
| 11.15        | 6.42                    | 23.90               |
| 12.91        | 8.27                    | 33.53               |

Tabla A.2. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados sobre vidrio.

### 6.2 ITO SOBRE LiNbO<sub>3</sub>

| Potencia (W) | Profundidad máxima(μm) | Anchura máxima(μm) | Profundidad(μm) | Anchura(μm) |
|--------------|------------------------|--------------------|-----------------|-------------|
| 1.12         | 0                      | 0                  |                 |             |
| 1.15         | 0.49                   | 32.54              |                 |             |
| 1.45         | 0.61                   | 33.40              |                 |             |
| 1.57         | 0.60                   | 34.20              |                 |             |
| 1.99         | 0.63                   | 38.18              |                 |             |
| 2.16         | 0.63                   | 39.18              |                 |             |
| 2.35         | 2.85                   | 47.48              | 0.63            | 13.28       |

Tabla A.3. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados sobre ITO depositado en LNO.

| Potencia (W)   | Profundidad máxima( $\mu\text{m}$ ) | Anchura máxima( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1.12           | 0                                   | 0                               |
| 1.15           | 0                                   | 0                               |
| 1.45           | 0                                   | 0                               |
| 1.57           | 0                                   | 0                               |
| 1.99           | 0                                   | 0                               |
| 2.16(1 linea)  | 0.45                                | 9.96                            |
| 2.16(2 lineas) | 2.23                                | 11.95                           |
| 2.16           | 2.71                                | 33.20                           |
| 3.36           | 7.15                                | 51.79                           |
| 4.76           | 8.94                                | 59.76                           |
| 6.16           | 10.80                               | 63.08                           |
| 7.81           | 12.77                               | 70.38                           |
| 9.38           | 14.08                               | 76.36                           |
| 11.15          | 15.89                               | 76.03                           |
| 12.91          | 18.30                               | 80.68                           |

Tabla A.4. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados sobre LNO.

### 6.3 ITO SOBRE ZnO

| Potencia (W) | Profundidad máxima( $\mu\text{m}$ ) | Anchura máxima( $\mu\text{m}$ ) | Profundidad( $\mu\text{m}$ ) | Anchura( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1.12         | 0                                   | 0                               |                              |                          |
| 1.15         | 0                                   | 0                               |                              |                          |
| 1.45         | 0.33                                | 18.26                           |                              |                          |
| 1,57         | 0.32                                | 35.52                           |                              |                          |
| 1.99         | 0.53                                | 40.84                           | 0.12                         | 28.88                    |
| 2.16         | 0.88                                | 42.16                           | 0.27                         | 24.57                    |
| 2.35         | 0.98                                | 45.15                           | 0.38                         | 26.89                    |

Tabla A.5. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados sobre ITO depositado en ZnO-vidrio.

| Potencia (W) | Profundidad máxima( $\mu\text{m}$ ) | Anchura máxima( $\mu\text{m}$ ) | Profundidad( $\mu\text{m}$ ) | Anchura( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1.12         | 0                                   | 0                               |                              |                          |
| 1.15         | 0                                   | 0                               |                              |                          |
| 1.45         | 0                                   | 0                               |                              |                          |
| 1.57         | 0.22                                | 25.56                           |                              |                          |
| 1.99         | 0.33                                | 28.22                           |                              |                          |
| 2.16         | 0.85                                | 36.33                           |                              |                          |
| 3.36         | 1.45                                | 46.81                           |                              |                          |
| 4.76         | 1.78                                | 51.79                           |                              |                          |
| 6.16         | 2.17                                | 62.75                           |                              |                          |
| 7.81         | 2.5                                 | 66.4                            |                              |                          |
| 9.38         | 3.1                                 | 76.03                           | 0.12                         | 35.19                    |

|              |      |        |      |       |
|--------------|------|--------|------|-------|
| <b>11.15</b> | 4.19 | 86.65  | 2.17 | 38.51 |
| <b>12.91</b> | 4.78 | 100.93 | 2.57 | 47.81 |

*Tabla A.6. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados sobre ZnO-vidrio.*

## 6.4 TRATAMIENTOS A DIFERENTES FRECUENCIAS

| Potencia (W) | 2 kHz                   |                     |                  |              |
|--------------|-------------------------|---------------------|------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 0.93                    | 48.80               | 0.37             | 20.58        |
| <b>2.6</b>   | 0.42                    | 38.51               | 0                | 0            |
| <b>2.35</b>  | 0.31                    | 33.86               | 0                | 0            |
| <b>2.16</b>  | 0.24                    | 26.56               | 0                | 0            |
| <b>1.99</b>  | 0                       | 0                   | 0                | 0            |
| <b>1.57</b>  | 0                       | 0                   | 0                | 0            |
| <b>1.45</b>  | 0                       | 0                   | 0                | 0            |
| <b>1.15</b>  | 0                       | 0                   | 0                | 0            |
| <b>1.12</b>  | 0                       | 0                   | 0                | 0            |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 2 kHz.*

| Potencia (W) | 4 kHz                   |                     |                         |              |
|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad máxima (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 2.33                    | 38.84               | 0.45                    | 6.97         |
| <b>2.6</b>   | 0.66                    | 32.20               | 0.37                    | 9.30         |
| <b>2.35</b>  | 0.45                    | 34.20               | 0                       | 0            |
| <b>2.16</b>  | 0.14                    | 27.22               | 0                       | 0            |
| <b>1.99</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.57</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.45</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.15</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.12</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 4 kHz.*

| Potencia (W) | 10 kHz                  |                     |                         |              |
|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad máxima (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 1.14                    | 45.82               | 0.53                    | 3,32         |
| <b>2.6</b>   | 0.56                    | 34.20               | 0.35                    | 6,64         |
| <b>2.35</b>  | 0.43                    | 37.85               | 0                       | 0            |
| <b>2,16</b>  | 0.20                    | 22.24               | 0                       | 0            |
| <b>1,99</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |

|             |   |   |   |   |
|-------------|---|---|---|---|
| <b>1,57</b> | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <b>1,45</b> | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <b>1,15</b> | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <b>1,12</b> | 0 | 0 | 0 | 0 |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 10 kHz.*

| Potencia (W) | 20 kHz                  |                    |                         |              |
|--------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima(μm) | Profundidad máxima (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 2.29                    | 46.15              | 0.31                    | 19.26        |
| <b>2.6</b>   | 0.35                    | 40.50              | 0                       | 0            |
| <b>2.35</b>  | 0.36                    | 35.86              | 0                       | 0            |
| <b>2.16</b>  | 0.22                    | 23.24              | 0                       | 0            |
| <b>1.99</b>  | 0                       | 0                  | 0                       | 0            |
| <b>1.57</b>  | 0                       | 0                  | 0                       | 0            |
| <b>1.45</b>  | 0                       | 0                  | 0                       | 0            |
| <b>1.15</b>  | 0                       | 0                  | 0                       | 0            |
| <b>1.12</b>  | 0                       | 0                  | 0                       | 0            |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 20 kHz.*

| Potencia (W) | 50 kHz                  |                     |                         |              |
|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad máxima (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 3.20                    | 56.44               | 0.48                    | 27.89        |
| <b>2.6</b>   | 2.15                    | 49.14               | 0.49                    | 10.29        |
| <b>2.35</b>  | 0.43                    | 43.82               | 0                       | 0            |
| <b>2.16</b>  | 0.34                    | 38.51               | 0                       | 0            |
| <b>1.99</b>  | 0.28                    | 32.87               | 0                       | 0            |
| <b>1.57</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.45</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.15</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.12</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 50 kHz.*

| Potencia (W) | 66.7 kHz                |                     |                         |              |
|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad máxima (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 3.86                    | 56.11               | 0.43                    | 27.22        |
| <b>2.6</b>   | 2.63                    | 46.15               | 0.40                    | 17.93        |
| <b>2.35</b>  | 0.38                    | 45.82               | 0.14                    | 35.86        |
| <b>2.16</b>  | 0.35                    | 47.14               | 0                       | 0            |
| <b>1.99</b>  | 0.29                    | 42.50               | 0                       | 0            |

|             |      |       |   |   |
|-------------|------|-------|---|---|
| <b>1.57</b> | 0.24 | 30.88 | 0 | 0 |
| <b>1.45</b> | 0    | 0     | 0 | 0 |
| <b>1.15</b> | 0    | 0     | 0 | 0 |
| <b>1.12</b> | 0    | 0     | 0 | 0 |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 66.7 kHz.*

| Potencia (W) | 100 kHz                 |                     |                         |              |
|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad máxima (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 4.67                    | 54.45               | 0.43                    | 29.55        |
| <b>2.6</b>   | 3.20                    | 48.8                | 0                       | 0            |
| <b>2.35</b>  | 2.39                    | 45.48               | 0.49                    | 10.96        |
| <b>2.16</b>  | 0.46                    | 46.15               | 0                       | 0            |
| <b>1.99</b>  | 0.37                    | 41.17               | 0                       | 0            |
| <b>1.57</b>  | 0.30                    | 34.53               | 0                       | 0            |
| <b>1.45</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.15</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |
| <b>1.12</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 100 kHz.*

| Potencia (W) | 200 kHz                 |                     |                         |              |
|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
|              | Profundidad máxima (μm) | Anchura máxima (μm) | Profundidad máxima (μm) | Anchura (μm) |
| <b>3.36</b>  | 5.20                    | 53.78               | 0.41                    | 29.88        |
| <b>2.6</b>   | 3.78                    | 49.80               | 0.35                    | 28.55        |
| <b>2.35</b>  | 3.61                    | 47.14               | 0.41                    | 21.25        |
| <b>2.16</b>  | 2.64                    | 53.12               | 0.43                    | 18.26        |
| <b>1.99</b>  | 0.41                    | 42.83               | 0                       | 0            |
| <b>1.57</b>  | 0.37                    | 33.86               | 0                       | 0            |
| <b>1.45</b>  | 0.27                    | 33.20               | 0                       | 0            |
| <b>1.15</b>  | 0.07                    | 19.92               | 0                       | 0            |
| <b>1.12</b>  | 0                       | 0                   | 0                       | 0            |

*Tabla A.7. Datos de la profundidad y anchura de las zonas mecanizadas en los diferentes tratamientos realizados con una frecuencia de 200 kHz.*

## 7 ANEXO II

### 7.1 PERFILES Y TOPOGRAFÍAS DE LAS ZONAS MECANIZADAS

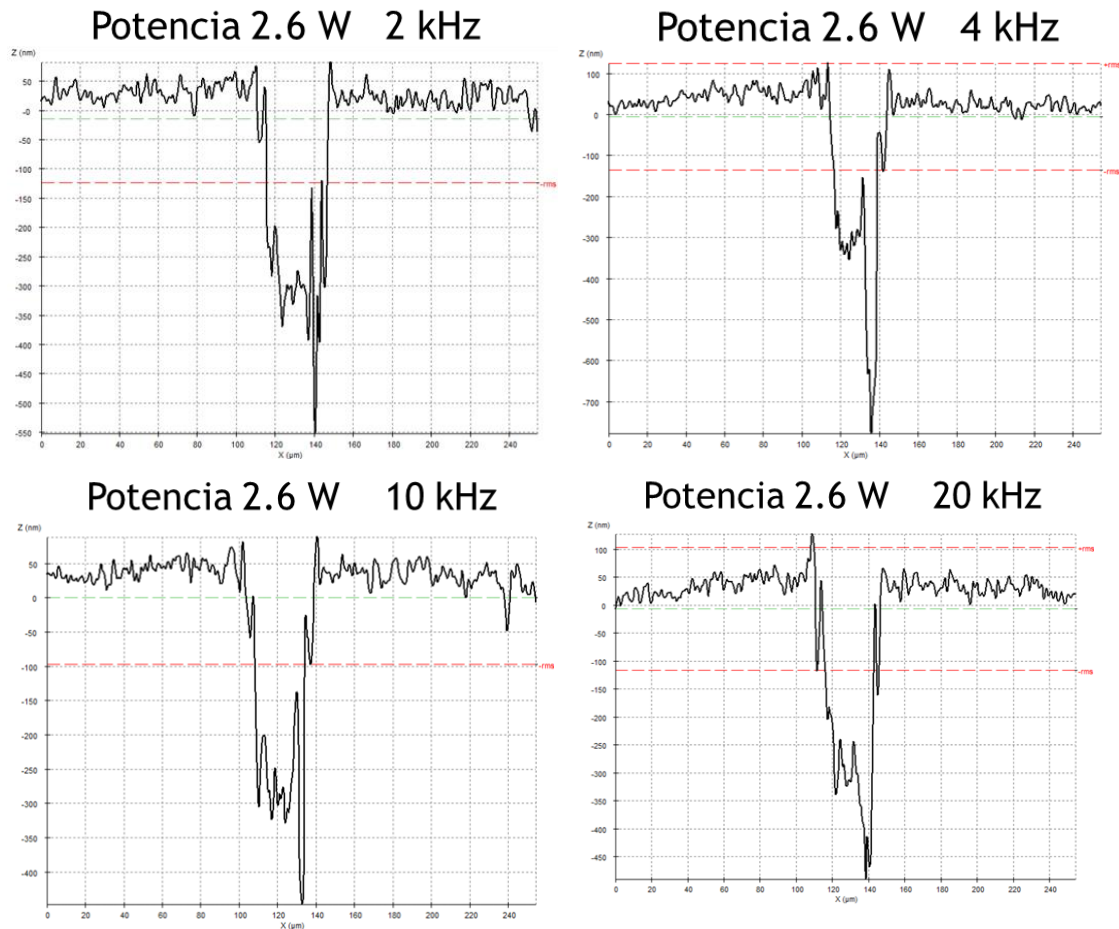
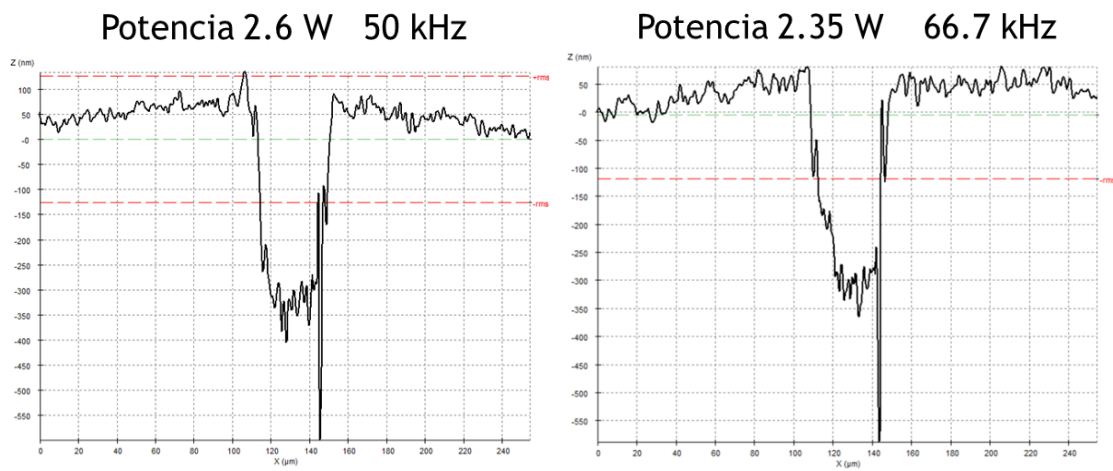


Figura 41. Perfiles de las zonas mecanizadas en el análisis del efecto de la frecuencia.



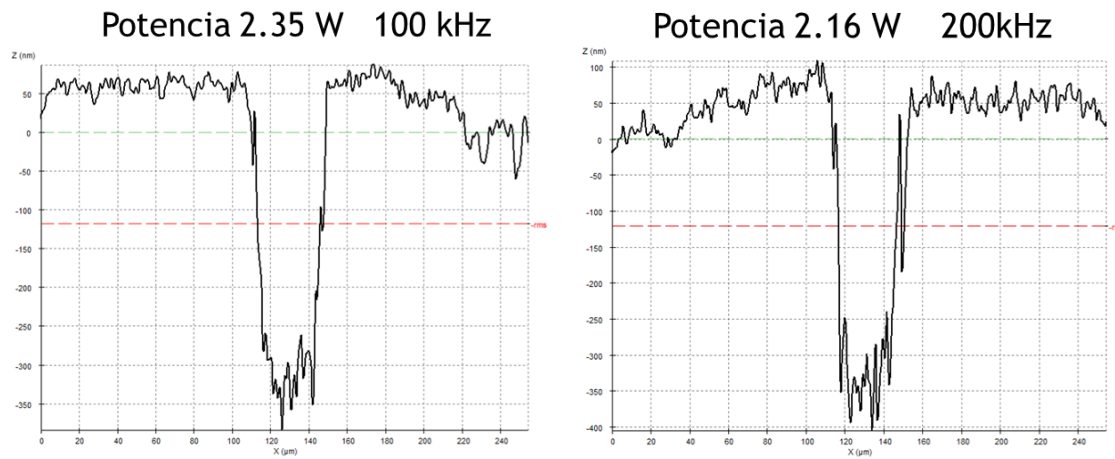


Figura 42. Perfiles de las zonas mecanizadas en el análisis del efecto de la frecuencia.

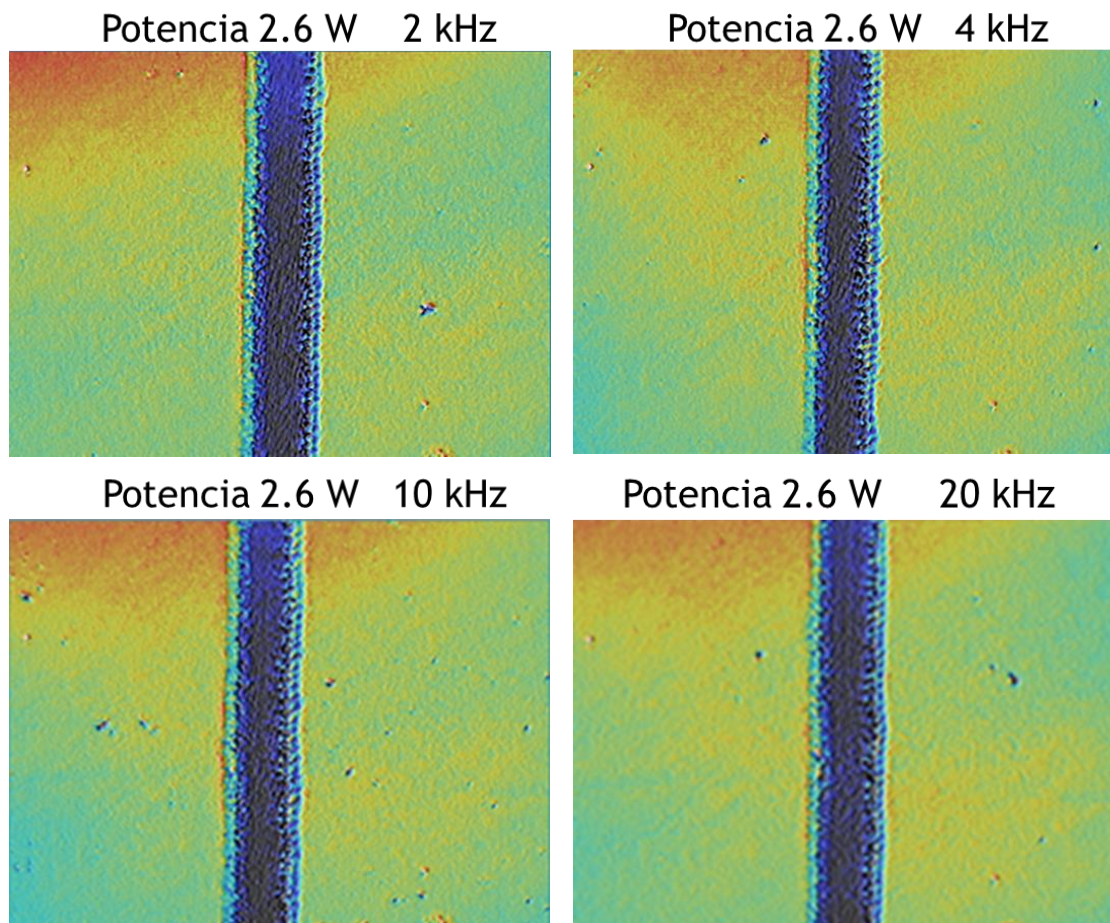
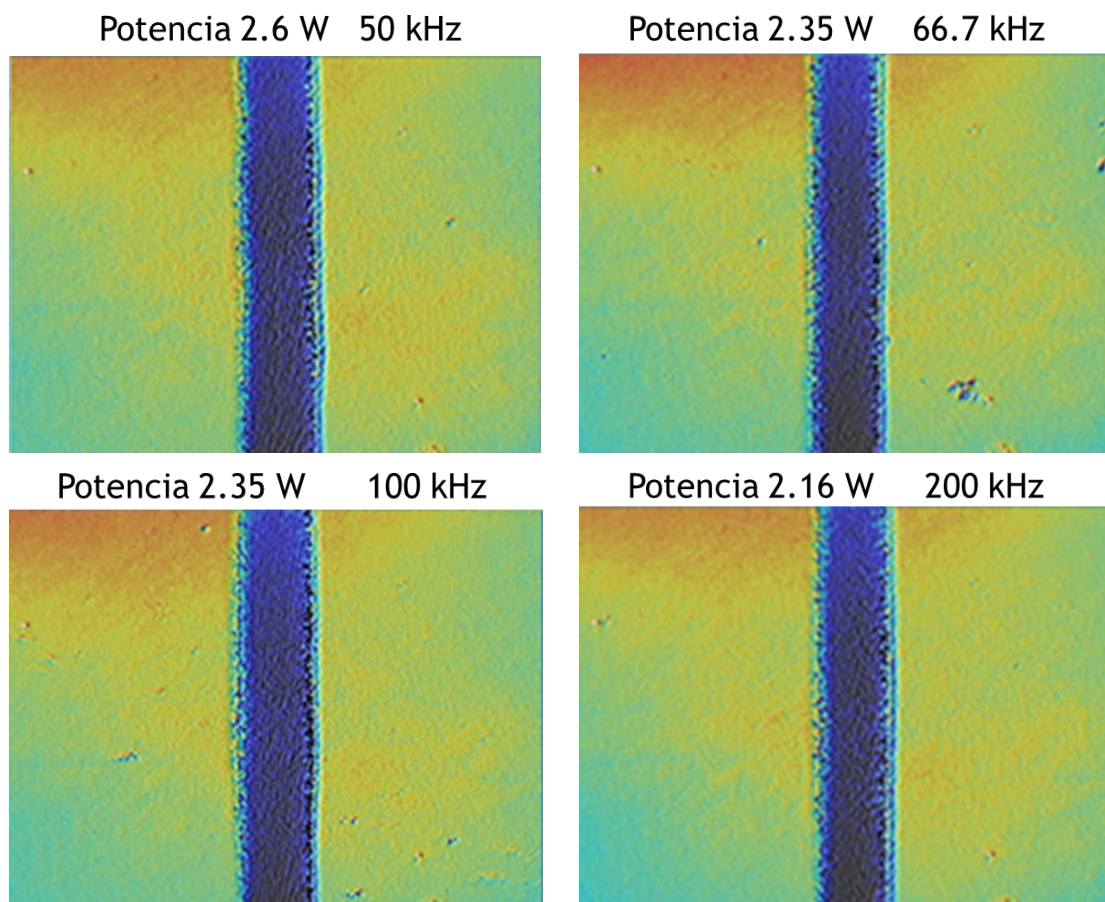


Figura 43. Topografía de las zonas mecanizadas en el análisis del efecto de la frecuencia.



*Figura 44. Topografía de las zonas mecanizadas en el análisis del efecto de la frecuencia.*