

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



TESIS

***“Diseño y manufactura de electrodos metálicos
nanoestructurados mediante micromaquinado e impresión 3D”***

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Presenta:

Jesús Vidal Payan Carrillo

Director:

Dr. Mario Alberto Curiel Álvarez

Codirector:

Dr. Oscar Manuel Pérez Landeros

Mexicali, Baja California

Enero de 2025

Agradecimientos

Antes que nada, quiero darles las gracias a mis padres, Vidal Payan y Verónica Carrillo, así como a mis hermanos Edgar Payan y Camila Payan, por siempre apoyarme y darme fuerzas para lograr todo lo que me he propuesto a lo largo de mi vida, sin ellos nada de lo aquí escrito sería posible, los amo a todos.

También a mi novia, Nahomy Verdugo, gracias por siempre estar para mí, brindarme un espacio en su casa casi todos días y compartirme su conocimiento y amor, te amo demasiado.

Un especial agradecimiento a mis directores de tesis, Dr. Mario Alberto Curiel Álvarez y Dr. Oscar Manuel Pérez Landeros por siempre estar dispuestos a brindarme su conocimiento, por confiar en mí y en qué puedo superar los retos que se me presenten. Además de brindarme un espacio en el Laboratorio de Semiconductores, Microelectrónica y Nanotecnología en el cual siempre me sentí acogido y rodeado de excelentes académicos y mejores personas.

Gracias a todos los doctores que estuvieron acompañándome a lo largo de mis estudios de maestría, Dr. Nicola Radnev, Dra. Mariela Domínguez, Dr. David Mateos, Dr. Roumen Nikolov, Dr. Jhonathan Saenz, por brindarme su apoyo y conocimiento siempre que lo requería, de verdad muchas gracias por todo su apoyo.

A mis compañeros de laboratorio y ahora amigos, Alan García, Esteban Osorio, Yessenia Vicente, Eddue Osuna, Arantxa Villasana, Iván Cardoza y Jackeline Navarro por siempre hacer del laboratorio un ambiente extraordinario y lleno de conocimiento, gracias por todas esas tardes a la hora de comida en las que platicábamos y jugábamos juegos de mesa, de verdad gracias por todo lo que compartimos dentro y fuera del laboratorio, los quiero.

Y a todas aquellas personas que estuvieron conmigo a lo largo de mis estudios de maestría les doy las gracias de todo corazón.

Contenido

AGRADECIMIENTOS	2
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	8
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.2 JUSTIFICACIÓN Y USO DE LOS RESULTADOS.....	10
1.3 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	11
<i>Objetivo General:</i>	11
<i>Objetivos específicos:</i>	11
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	12
2.1 INSUMOS DE LA MANUFACTURA	12
<i>Sustratos</i>	12
<i>Metales</i>	15
2.2 SOFTWARES	17
<i>Fusion 360</i>	17
<i>Slicers</i>	18
<i>Láser GRBL</i>	19
2.3 FABRICACIÓN	19
<i>Micromaquinado</i>	19
<i>Corte y grabado CNC</i>	21
<i>Escritura directa láser de película delgada</i>	22
<i>Impresión 3D</i>	23
<i>Técnicas físicas de deposición de vapor</i>	25
<i>Recocido térmico rápido (RTA)</i>	25
2.4 CARACTERIZACIÓN.....	26
<i>Microscopía</i>	26
<i>Espectroscopía</i>	28
<i>Mediciones eléctricas</i>	31
<i>Prueba de fatiga</i>	32
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA Y DETALLES EXPERIMENTALES	33

3.1 PROGRAMACIÓN DE POSTPROCESADOR	33
3.2 CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS DE FABRICACIÓN.	36
<i>Impresión 3D SLA LCD</i>	36
<i>Corte laser CNC</i>	38
3.3 ESCRITURA DIRECTA DE ELECTRODOS SOBRE PELÍCULA DELGADA.	38
3.4 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MÁSCARAS PARA PVD.....	39
3.5 FABRICACIÓN DE ELECTRODOS.	42
3.6 PRUEBAS DE FATIGA.....	44
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	46
4.1 RESULTADOS DE POST PROCESADOR.....	46
4.2 PARÁMETROS ÓPTIMOS DE CORTE Y GRABADO LÁSER CNC.....	47
4.3 MEDICIONES DE FTIR	47
4.4 PRUEBAS DE RESOLUCIÓN	48
4.5 ELIPSOMETRÍA.....	52
4.6 SEM	53
4.7 EDS	54
4.8 MEDICIONES ELÉCTRICAS	55
4.9 MEDICIONES DE RESISTENCIA LAMINAR.....	56
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	58
5.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	58
5.2 TRABAJO FUTURO.....	58
REFERENCIAS.....	59
APÉNDICE.....	64

Lista de Figuras

Figura 2-1 Dispositivo electrónico fabricado sobre sustrato de papel.....	13
Figura 2-2 Corning glass.....	13
Figura 2-3 Rollo de poliimida.....	14
Figura 2-4 Cable plano flexible.	15
Figura 2-5 Barra de herramientas del apartado de diseño.	17
Figura 2-6 Lista de espacios de trabajo.	18
Figura 2-7 Ejemplo de conversión de modelo 3D a código G.	18
Figura 2-8 Procesos de micromaquinado: a) Superficial y b) Volumétrico.....	20
Figura 2-9 Ejemplo de micromaquinado superficial: a) Deposición de capa de sacrificio, b) grabado de la capa de sacrificio, c) Deposición de la capa de estructura y c) Remoción de la capa de sacrificio.	20
Figura 2-10 Ejemplo de micromaquinado volumétrico: a) Colocación de máscara con patrón, b) Remoción del material no cubierto por la máscara, c) Socavado de la parte inferior del cantiléver y d) Vista superior del cantiléver.	21
Figura 2-11 Esquema de componentes de corte láser CNC.	21
Figura 2-12 Esquema de componentes de corte router CNC.....	22
Figura 2-13 Esquema de funcionamiento y componentes de equipo de escritura directa láser (LDW) [25].....	23
Figura 2-14 Esquema de funcionamiento y componentes de impresión 3D FMD. .	24
Figura 2-15 Esquema de funcionamiento y componentes de impresión 3D SLA LCD.	24
Figura 2-16 Esquema de técnica de evaporación térmica en alto vacío [30].	25
Figura 2-17 Esquema de técnica de RTA.	26
Figura 2-18 Esquema de componentes de microscopio óptico.	27
Figura 2-19 Esquema de funcionamiento y componentes de un SEM.	28
Figura 2-20 Esquema de funcionamiento de un equipo de VASE.....	29
Figura 2-21 Esquema de funcionamiento y componentes de espectrómetro FTIR.	30

Figura 2-22 Esquema de señales generadas de la interacción del haz de electrones con la muestra.	30
Figura 2-23 Esquema de medición de 2 terminales.	31
Figura 2-24 Contactos sobre semiconductor para la medición de la resistencia laminar.	32
Figura 2-25 Esquema de equipo de aplicación de fatiga mecánica [38].	32
Figura 3-1 Estructura general de un postprocesador CNC.	34
Figura 3-2 Sección de configuración del postprocesador.	34
Figura 3-3 Sección de propiedades del postprocesador.	35
Figura 3-4 Sección de funciones del postprocesador.	35
Figura 3-5 Esquema del tamaño del pixel del panel LCD.	36
Figura 3-6 Modelo 3D de prueba para máxima resolución de impresión 3D SLA LCD.	37
Figura 3-7 Modelo 3D y rutas de corte para pruebas de potencia láser CNC.	38
Figura 3-8 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de peinetas para escritura directa sobre películas de Au sobre sustrato de óxido de silicio.	38
Figura 3-9 a) Escritura directa en: a) 100 Cu sobre óxido de silicio, b) 100 nm Al sobre óxido de silicio, c) 100 nm de Au sobre óxido de silicio.	39
Figura 3-10 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara de serpentín.	40
Figura 3-11 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara de geometrías complejas.	40
Figura 3-12 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara para dispositivo de microfluidica.	40
Figura 3-13 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara para mediciones de resistencia laminar.	41
Figura 3-14 Preparación y colocación de Kapton para corte laser CNC.	41
Figura 3-15 Esquema de depósito mediante evaporación térmica de película de 50 nm de Au sobre óxido de silicio y PI.	42

Figura 3-16 Depósito mediante evaporación térmica de película de Al sobre mica térmica con geometría de serpentín.	43
Figura 3-17 Depósito mediante evaporación térmica de bicapa Au/Ni en sustrato de PI.	43
Figura 3-18 Película delgada de Au de 50 nm después del RTA.....	44
Figura 3-19 Equipo de pruebas de fatiga fabricado en el LSMN.	44
Figura 3-20 Vista lateral de los electrodos montados en el equipo de pruebas de fatiga.	45
Figura 3-21 Vista superior de los electrodos montados en el equipo de pruebas de fatiga.	45
Figura 4-1 Comparativa de Código G resultante después y antes de la modificación.	46
Figura 4-2 Espectrómetro FTIR Perkin Elmer Spectrum One.	47
Figura 4-3 Resultados por FTIR de mica térmica.....	48
Figura 4-4 Resultados por FTIR de PI.....	48
Figura 4-5 Pruebas de máxima resolución de impresión 3D de resina 100% de potencia de luz y 8 segundos de exposición.	49
Figura 4-6 Pruebas de máxima resolución de impresión 3D de resina 80% de potencia de luz y 8 segundos de exposición.	49
Figura 4-7 Pruebas de máxima resolución de impresión 3D de resina 60% de potencia de luz y 8 segundos de exposición.	49
Figura 4-8 Comparación de corte laser: a) potencia de 137.5 y b) potencia de 500.	50
Figura 4-9 Imágenes de máscara para mediciones de resistencia laminar.....	51
Figura 4-10 Contactos metálicos depositados a través de sputtering para pruebas de resistencia laminar.	51
Figura 4-11 Intensidad de transmisión a través de película Ni/Corning glass.	52
Figura 4-12 Intensidad de transmisión a través de bicapa Au/Ni/Corning glass.	52

Figura 4-13 Imagen SEM de NPs de Au obtenidas por RTA en película de 50 nm de Au sobre sustrato de Corning glass.	53
Figura 4-14 Imagen SEM a) y ampliación de la zona de análisis EDS b) de electrodo bicapa Au/Ni/PI.....	54
Figura 4-15 Caracterización de la bicapa Au/Ni/PI por medio de espectroscopia EDS.	54
Figura 4-16 Denominación de las geometrías en electrodo bicapa Au/Ni/PI.....	55
Figura 4-17 Gráfico de cambio en la resistividad con respecto a los ciclos de fatiga del electrodo bicapa Au/Ni/PI de geometrías complejas sin RTA.....	55
Figura 4-18 Gráfico de cambio en la resistividad con respecto a los ciclos de fatiga del electrodo bicapa Au/Ni/PI de geometrías complejas con RTA.	56
Figura 4-19 Mediciones de Voltaje – Corriente sobre los contactos para pruebas de resistencia laminar.	57
Figura 4-20 Representación de la resistencia laminar de la película.	57

Lista de Tablas

Tabla 3-1 Configuración de experimento de resolución máxima de impresión 3D SLA LCD.....	37
Tabla 4-1 Parámetros óptimos de potencia de corte láser CNC para papel, PI, Cu, Al y Au.	47

Capítulo 1 Introducción

El presente proyecto de maestría se centra en el diseño y manufactura de electrodos metálicos para su aplicación en dispositivos de electrónica flexible. Con el objetivo de hacer uso de los avances en las técnicas de micromaquinado e impresión 3D, se trabajó en litografía de diferentes máscaras y medios para la fabricación de electrodos metálicos con geometrías controladas, así como, procesos de recocido térmico rápido (RTA) para la obtención de electrodos nanoestructurados [1]. Los resultados de los diseños y la manufactura de electrodos están científicamente validados por técnicas de caracterización superficial y óptica interpretando los resultados obtenidos. Se utilizaron diseños en diferentes dispositivos estudiados por el grupo de Semiconductores, Microelectrónica y Nanotecnología del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

1.1 Planteamiento del problema

Durante los últimos años la tecnología de manufactura aditiva está adquiriendo mucho interés por el bajo coste y la rapidez con el que se pueden fabricar prototipos y objetos a comparación de otros métodos, haciendo que esta sea más accesible para el público en general, permitiendo que exista una gran comunidad alrededor de ella [2]. Gracias a este crecimiento se ha adoptado la tecnología de manufactura aditiva en campos como la química, electrónica, y biología llevándola hasta microescala e incluso se está tratando de miniaturizar el proceso a tal grado que se logre un dispositivo a una escala nanométrica [3].

La presente investigación propone diseñar y manufacturar electrodos nanoestructurados mediante la técnica de micromaquinado e impresión 3D para su aplicación en dispositivos electrónicos funcionales los cuales pueden tener la capacidad de ser flexibles controlando y modulando sus propiedades eléctricas al ser sometidos a estrés mecánico.

1.2 Justificación y uso de los resultados

Durante la última década la industria semiconductora se ha fortalecido y crecido a lo largo de la frontera de México con Estados Unidos, tanto así que México ha declarado la industria semiconductora como prioritaria en el país mediante la Secretaría de Economía e Innovación [4]. Debido a lo anterior es importante el avance de proyectos enfocados al desarrollo de la industria semiconductora para atraer empresas e inversionistas a nuestro país y demostrar el talento que existe en nuestra localidad [5].

El método de micromaquinado e impresión 3D tiene muchas ventajas al ser un método físico, ya que, a comparación de los métodos químicos se tiene un mejor control de la contaminación y es más preciso al realizar los grabados. Además de que al utilizar este método se es capaz de fabricar electrodos los cuales pueden ser añadidos a dispositivos flexibles y al ser nanoestructurados sus propiedades mecánicas no se ven afectadas en gran medida como pasaría con los electrodos convencionales y esto nos ayudaría a tener un mejor control y modulación de las propiedades de estos dispositivos.

1.3 Objetivos de investigación

Objetivo General:

Diseñar y manufacturar electrodos a partir de películas delgadas metálicas depositadas a través de máscaras mediante evaporación térmica en alto vacío, así como, electrodos metálicos nanoestructurados por RTA para aplicaciones en electrónica flexible.

Objetivos específicos:

1. Diseñar electrodos de geometrías complejas a partir de películas delgadas metálicas mediante la técnica de micromaquinado y/o impresión 3D sobre sustratos rígidos.
2. Manufacturar electrodos nanoestructurados de geometrías complejas a partir de películas delgadas metálicas mediante la técnica de RTA y micromaquinado 3D sobre sustratos rígidos.
3. Caracterizar el desempeño electrónico y mecánico de los electrodos de película delgada en sustratos rígidos y flexibles.
4. Caracterizar el desempeño electrónico y mecánico de los electrodos nanoestructurados en sustratos rígidos y flexibles.
5. Estudiar las propiedades de los electrodos de película delgada y nanoestructurados integrados en dispositivos electrónicos y optoelectrónicos.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Insumos de la manufactura

Al fabricar electrodos de película delgada se debe tener muy en cuenta los materiales que se estarán utilizando para la experimentación y con ello, saber qué resultados se pueden esperar de su fabricación, ya que de estos depende las propiedades que se busquen o la combinación entre ellos que pueda dar un resultado favorable a la presente investigación. A continuación, se presentan los materiales utilizados:

Sustratos

En electrónica de estado sólido un sustrato es un sólido el cual sirve de base para depositar diferentes películas o capas que después formarán un dispositivo electrónico. Para efectos de la presente investigación se utilizaron los siguientes sustratos:

- **Papel bond**

El papel bond generalmente es fabricado comprimiendo fibras de celulosa de madera o alguna planta mientras aún contiene humedad. Este ha sido utilizado por investigadores desde el siglo XX para crear sensores de diferentes tipos, por ejemplo, Gay-Lussac creó el papel de prueba Litmus para detectar ácidos. A partir de este invento, otros científicos siguieron utilizando este sustrato para fabricar tiras de papel de prueba para detectar químicos en seco. Además de la importante contribución que tuvieron los premio nobel en 1952 Martin y Synge por inventar la cromatografía de papel [6].

Actualmente ya se han fabricado dispositivos más complejos como se muestra en la Figura 2-1 Dispositivo electrónico fabricado sobre sustrato de papel.

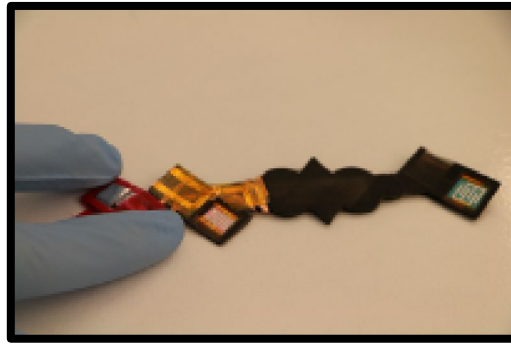


Figura 2-1 Dispositivo electrónico fabricado sobre sustrato de papel

Al ser el papel uno de los productos más indispensables en todo el mundo es muy fácil de adquirir y al usarlo en este proyecto podríamos reciclar papel que ya no está en uso dentro del laboratorio y se pueden obtener muestras de calidad [7].

- **Óxido de silicio amorfo (Corning glass)**

A lo largo de la historia de la fabricación electrónica el óxido de silicio (vidrio) ha sido uno de los principales sustratos rígidos para la creación de dispositivos microelectrónicos ya que provee estabilidad térmica y una superficie con una planicidad continua a lo largo de todo el sustrato. En la Figura 2-2 se muestra una Oblea de óxido de silicio en la presentación que normalmente se utiliza para fabricar dispositivos microelectrónicos [8].

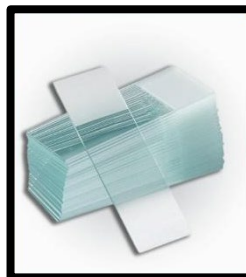


Figura 2-2 Corning glass.

- **Mica térmica**

La mica térmica (MAXSeal) ya ha sido utilizada por investigadores a lo largo del mundo para fabricar dispositivos microelectrónicos como es el caso de la universidad de TSINGHUA en china, en donde se fabricaron memristores flexibles en sustratos de mica térmica. Esto debido a sus propiedades flexibles, a su dureza y resistencia a la flexión al haberlo flexionado 10^3 veces y seguir obteniendo la misma respuesta eléctrica [9].

- **Poliimida (PI)**

La poliimida normalmente puede ser fabricada directamente de una solución de un dianhídrido y una diamina en un disolvente fenólico con un punto de ebullición alto. Alternativamente la forma más común es un proceso de dos pasos en el que un precursor de ácido poliamídico (PAA, por sus siglas en inglés) es sintetizado de la reacción de un dianhídrido y una diamina en disolventes orgánicos polares para después convertirlo en PI a través de imidización térmica/química de PAA. La PI se caracteriza por la repetición de la estructura imida como unidad lineal o heterocíclica en la cadena principal del esqueleto del polímero, y se clasifica en grupos alifáticos, semiaromáticos y aromáticos [10].

Este polímero es muy utilizado en la industria electrónica debido principalmente a su resistencia a temperaturas de hasta 300 grados y flexibilidad [11], normalmente se puede encontrar como se muestra en la Figura 2-3 en forma de Rollo de Poliimida con o sin adhesivo.

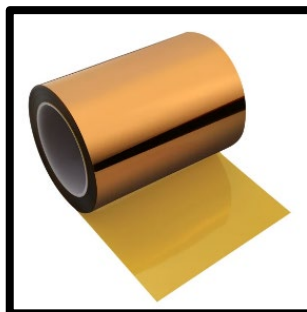


Figura 2-3 Rollo de poliimida

La poliimida está presente en cintas adhesivas para proteger los componentes de un PCB al momento de reparar o soldar algún otro componente dañado. También se puede observar su uso en la fabricación de cables planos flexibles como se muestra en la Figura 2-

4, además de que algunos fabricantes de Placas de Circuitos Impresos (PCB por sus siglas en inglés) ya utilizan a la poliimida como sustrato para PCB flexibles [12].



Figura 2-4 Cable plano flexible.

En la última década se ha utilizado este polímero como sustrato para aplicaciones en electrónica flexible, como la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo que desarrolló la Universidad Nacional de Taiwán [13].

Metales

Los metales son elementos químicos que suelen ser sólidos, brillantes, maleables y dúctiles, y tienen buena conductividad térmica y eléctrica. Constituyen una gran parte de la tabla periódica, con más de 70 elementos clasificados como metales [14]. Algunos de estos tienen propiedades específicas que los hacen ideales para algunas aplicaciones en electrónica como los siguientes:

- **Oro (Au)**

El oro es un metal con número atómico 79 dentro del grupo 11 de la tabla periódica, con una densidad de 19.3 g/cm^3 , un punto de fusión (T_f) de $1064 \text{ }^\circ\text{C}$, un punto de vaporización (T_v) de $2660 \text{ }^\circ\text{C}$ y una dureza de entre 2.5 a 3 en la escala de Mohs. Este presenta varias propiedades que lo hacen muy útil en electrónica, como su baja reactividad con otros elementos, su alta conductividad eléctrica con un valor de 4.1×10^7 / y su alta maleabilidad. Este metal tiene un costo algo elevado de aproximadamente 1555.64 pesos

mexicanos por gramo [15] al día que se escribe esta tesis, por lo que este material debe usarse de manera prudente.

- **Cobre (Cu)**

El cobre es un metal con número atómico 29 del grupo 11 de la tabla periódica, con una densidad de 8.96 g/cm^3 , un T_f de $1085 \text{ }^\circ\text{C}$, un T_v de $1187 \text{ }^\circ\text{C}$ y una dureza de 3 en la escala de Mohs. Este metal presenta algunas propiedades que lo hacen excelente para fabricación de componentes y dispositivos electrónicos como puede ser su gran ductilidad y maleabilidad, además de tener una conductividad eléctrica alta con un valor de $5.96 \times 10^7 \text{ /}$. El cobre tiene un costo actual de 0.18 pesos mexicanos por gramo [15] lo que lo hace un material muy asequible para fabricar cualquier tipo de componente o dispositivo electrónico.

- **Aluminio (Al)**

El aluminio es un metal con número atómico 13 del grupo 13 de la tabla periódica, con una densidad de 2.7 g/cm^3 , un T_f de $660.3 \text{ }^\circ\text{C}$, un T_v de $2467 \text{ }^\circ\text{C}$ y una dureza de entre 2 y 4 en la escala de Mohs. El aluminio es usado en electrónica debido a su alta resistencia a la corrosión, su baja densidad y su conductividad eléctrica con un valor de $3.5 \times 10^7 \text{ /}$. Este metal tiene un costo actual de 0.046 pesos mexicanos por gramo [15], además que es un material de fácil adquisición y lo hace ideal para su uso en fabricación electrónica.

- **Níquel (Ni)**

El níquel es un metal con número atómico 28 del grupo 10 de la tabla periódica, con una densidad de 8.9 g/cm^3 , un T_f de $1455 \text{ }^\circ\text{C}$, un T_v de $2457 \text{ }^\circ\text{C}$ y una dureza de 5 en la escala de Mohs. Este metal es ampliamente utilizado en la industria electrónica debido a su resistencia a la corrosión, a su alta dureza, su gran ductilidad, maleabilidad y su conductividad eléctrica con un valor de $1.43 \times 10^7 \text{ /}$. Este material tiene un costo actual de 0.35 pesos mexicanos [15], por lo que es un material bastante asequible, fácil de adquirir.

2.2 Softwares

Para la realización de este proyecto se seleccionaron los siguientes softwares de acuerdo a las necesidades y objetivos planteados para la realización de máscaras y electrodos nanoestructurados.

Fusion 360

Fusion 360 es un software basado en la nube que integra el diseño, ingeniería, electrónica y manufactura todo en uno.

En el apartado de diseño se cuenta con una gran variedad de herramientas para modelado en tres dimensiones como se muestra en la Figura 2-5.

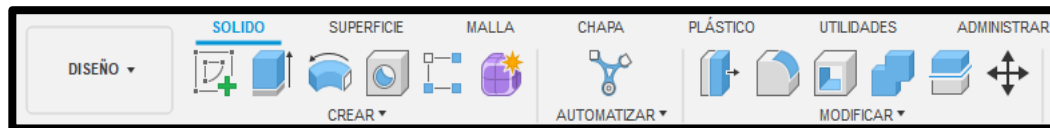


Figura 2-5 Barra de herramientas del apartado de diseño.

Este software contiene todas las herramientas necesarias para la fabricación de cualquier pieza ya sea para impresión 3D, corte láser o router, torno entre otras herramientas. Además, permite la colaboración en línea haciendo grupos de trabajo en los que se puede trabajar en un mismo diseño al mismo tiempo. Todo lo anterior hace que este software sea atractivo para las empresas ya que no se requiere de programas adicionales para la manufactura de productos [16].

En la Figura 2-6 se muestran los diferentes espacios de trabajo que se pueden utilizar en el software dependiendo la tarea que se quiera realizar.

DISEÑO
DISEÑO GENERATIVO
RENDERIZAR
ANIMACIÓN
SIMULACIÓN
FABRICACIÓN
DIBUJO ▶

Figura 2-6 Lista de espacios de trabajo.

Slicers

Los slicers son softwares que nos permiten convertir un modelo 3D en un archivo que el equipo de impresión 3D pueda ejecutar para lograr la impresión. Dependiendo de la tecnología de impresión 3D que se esté utilizando es el tipo de slicer que se debe utilizar, además de la personalización que permita el software para lograr imprimir una pieza de calidad [17].

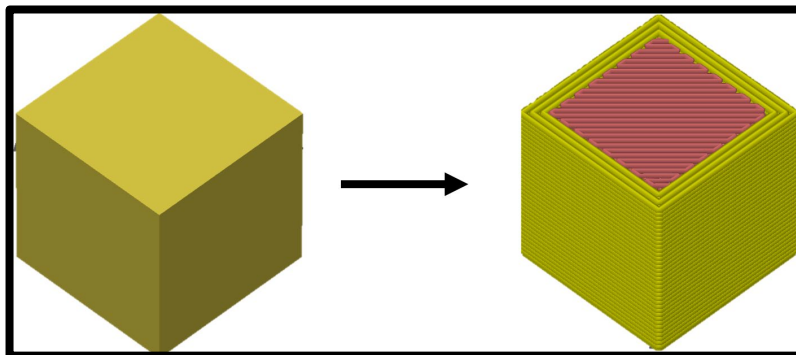


Figura 2-7 Ejemplo de conversión de modelo 3D a código G.

Para la tecnología de Moldeado por Deposición Fundida (FDM) se utiliza Prusa Slicer. El cual posee una gran cantidad de herramientas y parámetros modificables para mejorar la calidad y rapidez de la impresión.

Para la tecnología de estereolitografía por LCD (SLA LCD) se utiliza el software propietario del equipo de impresión 3D, Photon Workshop, el cual cuenta con gran cantidad de herramientas y parámetros a configurar para mejorar la calidad y resolución de la impresión

Láser GRBL

Al utilizar la tecnología láser o router CNC para realizar cortes o grabados en distintas superficies es necesario utilizar un software que controle el equipo de corte y que cuente con las medidas de seguridad necesarias para el correcto manejo del equipo.

El software de Láser GRBL facilita la tarea de controlar el equipo de corte debido a su interfaz amigable al usuario, además de ser un software gratuito y recibe actualizaciones y soporte constante por parte de los desarrolladores [18].

Postprocesador

Para realizar un corte ya sea con router o láser se requiere primero del diseño CAD para generar rutas de corte que la máquina CNC debe seguir. Estas rutas se tienen que traducir en un formato que la máquina pueda entender. El encargado de esta traducción es el postprocesador que normalmente está incluido en los softwares de modelado 3D, CAD y CAM [19].

2.3 Fabricación

Micromaquinado

Se le llama micromaquinado al conjunto de herramientas de diseño y fabricación que son capaces de formar de forma precisa estructuras y elementos en la escala de los micrómetros [20]. Este conjunto es fundamental para la fabricación de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) y se separa en 2 procesos de micromaquinado, los cuales son los siguientes.

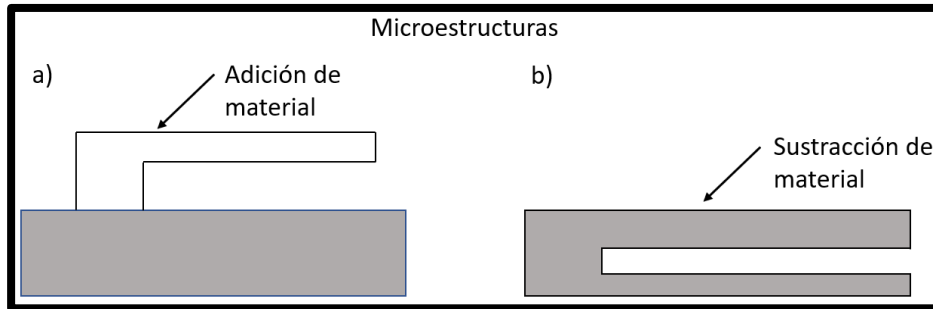


Figura 2-8 Procesos de micromaquinado: a) Superficial y b) Volumétrico.

- **Micromaquinado Superficial**

Este es principalmente un proceso aditivo el cual consiste en depositar diferentes capas de manera secuencial sobre un sustrato [20] tal como se muestra en la Figura 2-9.

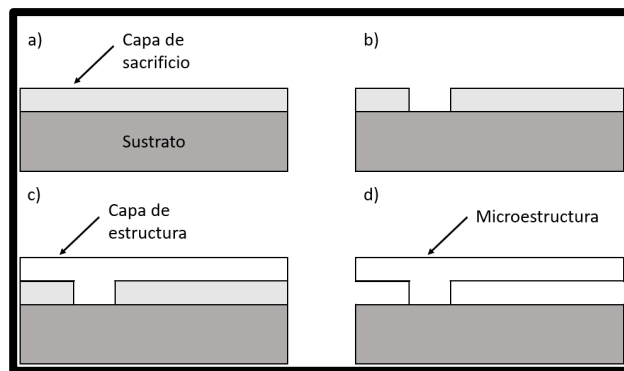


Figura 2-9 Ejemplo de micromaquinado superficial: a) Depósito de capa de sacrificio, b) grabado de la capa de sacrificio, c) Depósito de la capa de estructura y c) Remoción de la capa de sacrificio.

- **Micromaquinado Volumétrico**

En este proceso está dirigido a remover relativamente grandes cantidades de material del sustrato para producir dispositivos que se puedan mover o deformar [21] como en el ejemplo de la Figura 2-10.

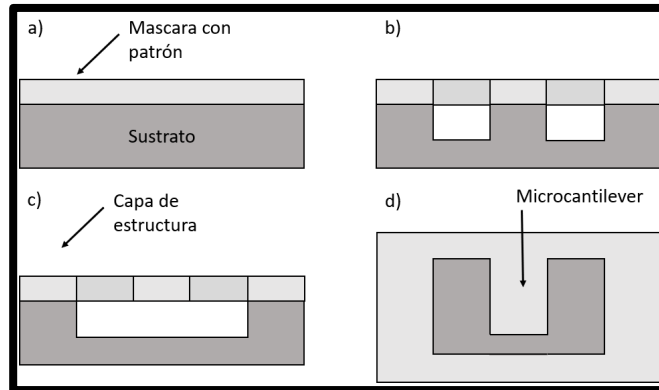


Figura 2-10 Ejemplo de micromaquinado volumétrico: a) Colocación de máscara con patrón, b) Remoción del material no cubierto por la máscara, c) Socavado de la parte inferior del cantiléver y d) Vista superior del cantiléver.

Corte y grabado CNC

Este tipo de corte y grabado se realiza a través de un dispositivo controlado por computadora que le indica la potencia del láser o revoluciones por minuto del router y la ruta que seguirá el cabezal para lograr el corte o grabado deseado.

- **Láser**

El corte láser consiste en un haz de luz laser la cual se conforma, se concentra y se guía hasta incidir en la pieza, fundiendo o evaporando el punto de contacto entre la pieza y el haz de luz láser realizando el corte [22] como se observa en la Figura 2-11.

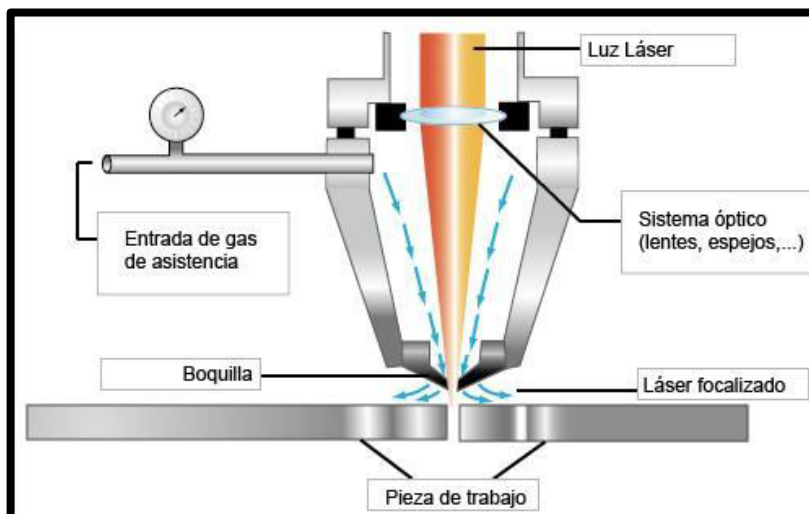


Figura 2-11 Esquema de componentes de corte láser CNC.

- Router

Este tipo de corte consiste en un router al cual se le acopla una broca específica al diámetro deseado del corte y al tipo de material que se desea cortar [23] como se muestra en la Figura 2-12.

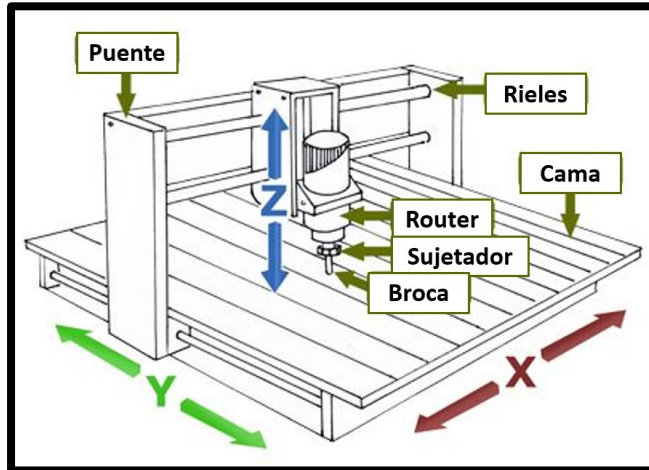


Figura 2-12 Esquema de componentes de corte router CNC.

Escritura directa láser de película delgada

Consiste en un haz de luz láser pulsada que incide y calienta la interfaz de la película en el sustrato de origen, esto origina un frente de fusión que se propaga a través de la película hasta alcanzar la superficie libre, momento en el que el material interfaz se sobrecalienta más allá de su punto de ebullición y la presión inducida por el vapor impulsa el material hacia el sustrato aceptor. Este proceso se puede observar en la Figura 2-13 [24][25].

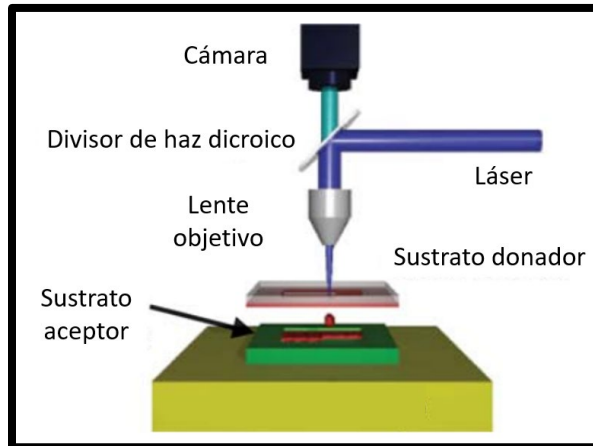


Figura 2-13 Esquema de funcionamiento y componentes de equipo de escritura directa láser (LDW) [25].

Impresión 3D

Esta es una técnica de manufactura aditiva la cual consiste en una serie de procesos que permiten fabricar objetos por medio de la adición de material por capas las cuales corresponden a los cortes transversales de un modelo 3D [26].

- **Moldeado por Deposición Fundida (FDM)**

La impresión FDM consiste en un rollo de filamento de algún polímero termoplástico que pasa a través de un extrusor caliente el cual funde el polímero para poder colocarlo de manera programada sobre una cama caliente en la cual este se adhiere, depositando así capas de polímero las cuales conforman el objeto final [27] como se muestra en la Figura 2-14.

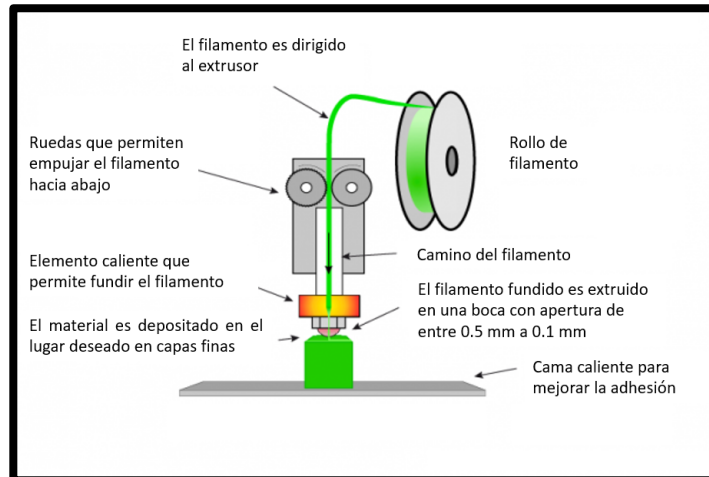


Figura 2-14 Esquema de funcionamiento y componentes de impresión 3D FMD.

- **Estereolitografía (SLA LCD)**

Este tipo de impresión 3D consiste en el llenado de una tina con una resina líquida foto curable a una longitud de onda del rango del ultravioleta (UV), después se introduce la plataforma de impresión hasta el fondo de la tina encontrándose con el panel LCD teniendo de separación una membrana transparente al ultravioleta. El panel LCD revela por capas el modelo 3D curando la resina en la plataforma de impresión logrando así el modelo 3D [28] como se muestra en la Figura 2-15.

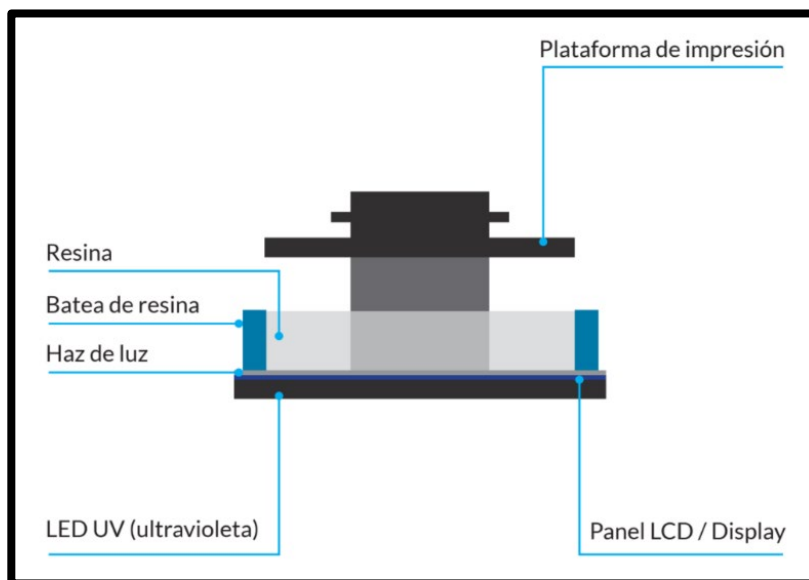


Figura 2-15 Esquema de funcionamiento y componentes de impresión 3D SLA LCD.

Técnicas físicas de deposición de vapor

Estas técnicas se basan en la deposición de películas sobre un sustrato por medio de la evaporación o pulverización de un material sólido.

- **Evaporación térmica en alto vacío**

Esta técnica de deposición de metales de baja energía consiste en evaporar un metal utilizando un filamento de tungsteno o un crisol en el que se coloca el metal a evaporar y se somete a un potencial eléctrico alto que provoca el calentamiento y posterior evaporación del metal. Esto sucede dentro de una campana de vidrio dentro de la cual se requiere un vacío de entre 10^{-4} y 10^{-9} Torr [29] [30]. En la Figura 2-16 se muestra un esquema de esta técnica.

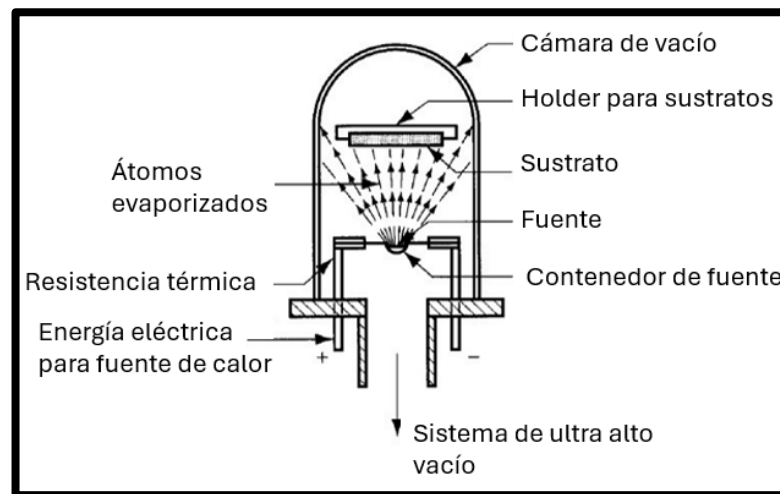


Figura 2-16 Esquema de técnica de evaporación térmica en alto vacío [30].

Recocido térmico rápido (RTA)

Consiste en calentar de forma rápida un material desde la temperatura ambiente hasta la temperatura deseada según la aplicación. Una vez alcanzada esta temperatura se mantiene así por tiempo determinado como se muestra en la Figura 2-17, se retira de la fuente de calor y se espera hasta que vuelva a temperatura ambiente [31]. Es usado para la activación de los dopantes, reacciones interfaciales de los contactos metálicos y fabricación de nanopartículas.

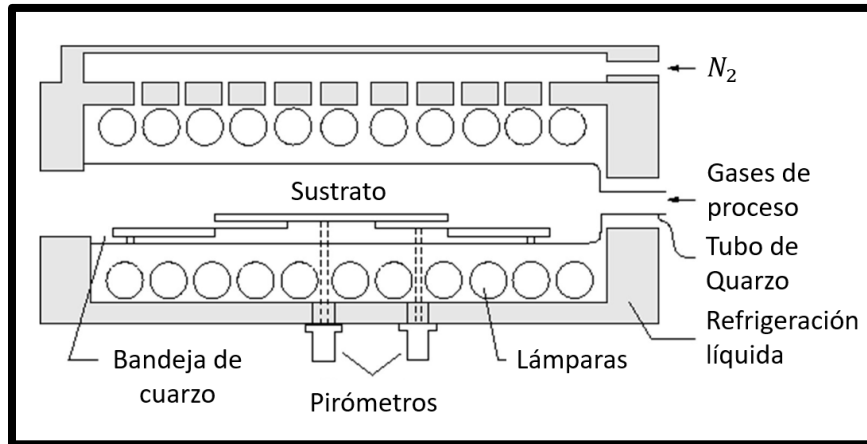


Figura 2-17 Esquema de técnica de RTA.

2.4 Caracterización

Para el desarrollo de dispositivos electrónicos es necesario caracterizar los materiales a utilizar, como su estructura, composición, morfología, propiedades térmicas, entre otras.

Microscopía

La microscopía nos ayuda a evaluar de manera visual el componente o dispositivo fabricado, así como a determinar su morfología y artefactos que pudieron suceder durante la fabricación.

- **Microscopía óptica**

Este tipo de microscopía utilizan una fuente de iluminación de luz blanca la cual pasa a través de un arreglo de lentes que magnifican el objeto de interés como se muestra en la Figura 2-18. Usualmente estos microscopios cuentan con una resolución de $0.25 \mu m$ y magnificaciones de entre $1x$ y $1000x$ [32].

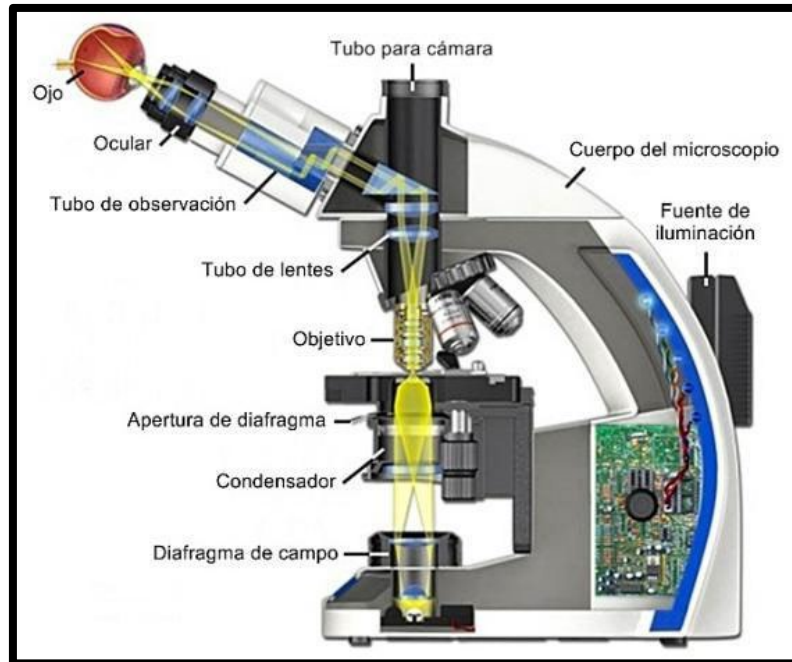


Figura 2-18 Esquema de componentes de microscopio óptico.

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Es un instrumento capaz de ofrecer un variado rango de información procedente de la superficie de la muestra. Su funcionamiento se basa en barrer un haz concentrado de electrones sobre una muestra dentro de una cámara de vacío como se observa en la Figura 2-19. La fuente de electrones primarios impacta sobre la muestra cediendo energía suficiente para generar electrones secundarios con cierto nivel de energía ($0 - 50 \text{ eV}$), los cuales se desprenden de la muestra siendo capturados por un detector de electrones secundarios, formando así una imagen [33].

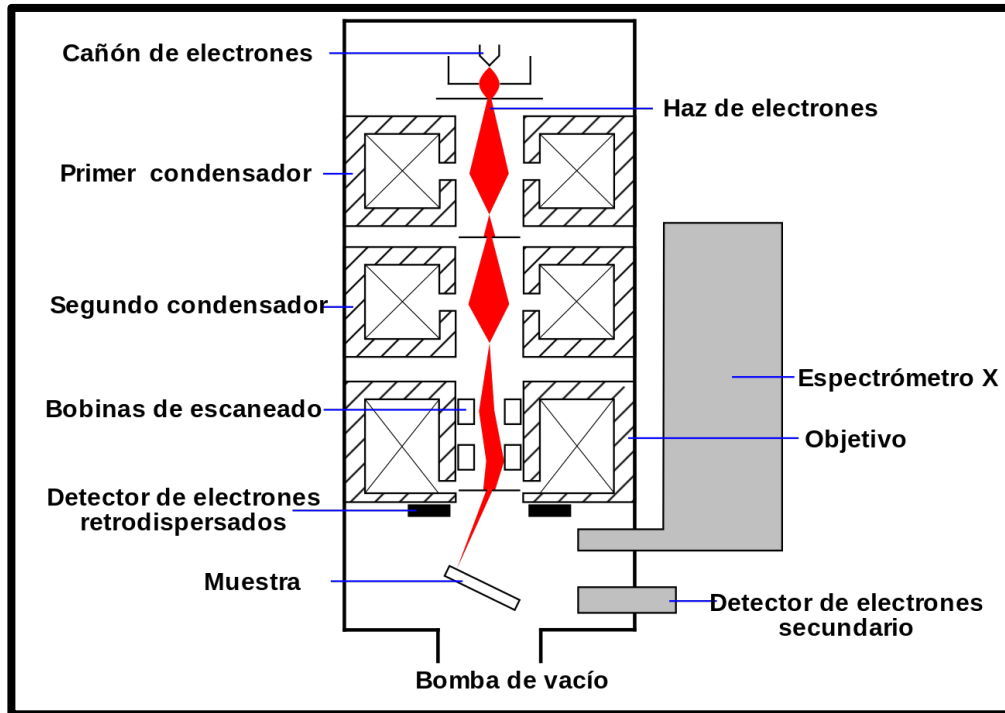


Figura 2-19 Esquema de funcionamiento y componentes de un SEM.

Espectroscopía

Para caracterizar un material es necesario conocer su composición química, además de sus propiedades ópticas las cuales pueden ser determinadas por medio de estudios basados en espectroscopias como las siguientes técnicas.

- **Espectroscopia elipsométrica de ángulo variable (VASE)**

La VASE consiste en un haz de luz polarizado en sus componentes p y s, el cual incide en un medio homogéneo de bulto. La luz reflejada está normalmente polarizada elípticamente. Este haz de luz es capturado por un analizador que se desplaza mecánicamente dependiendo de la intensidad de la luz recibida como se muestra en la Figura 2-20 [34].

La técnica de VASE se puede utilizar para estudios de transmisión o reflexión de luz con los cuales se puede obtener información del material analizado, así como sus constantes ópticas (índice de refracción y constante de extinción).

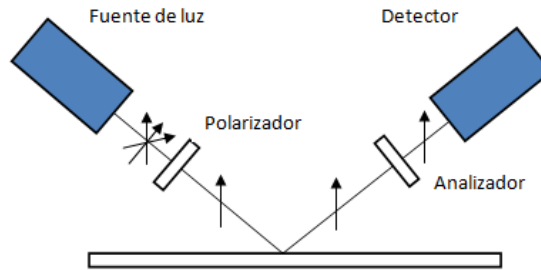


Figura 2-20 Esquema de funcionamiento de un equipo de VASE.

- **Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**

La espectroscopía por FTIR consiste en la radiación de luz infrarrojo a través de una muestra. Algunas longitudes de onda serán absorbidas por la muestra mientras otras pasarán a través de ella, resultando en un espectro que representa la absorción y transmisión molecular, creando un espectro característico de la muestra [35].

El espectrómetro FTIR utiliza un arreglo de espejos para llevar el haz de luz infrarrojo hacia la muestra y posteriormente al detector como se muestra en la Figura 2-21.

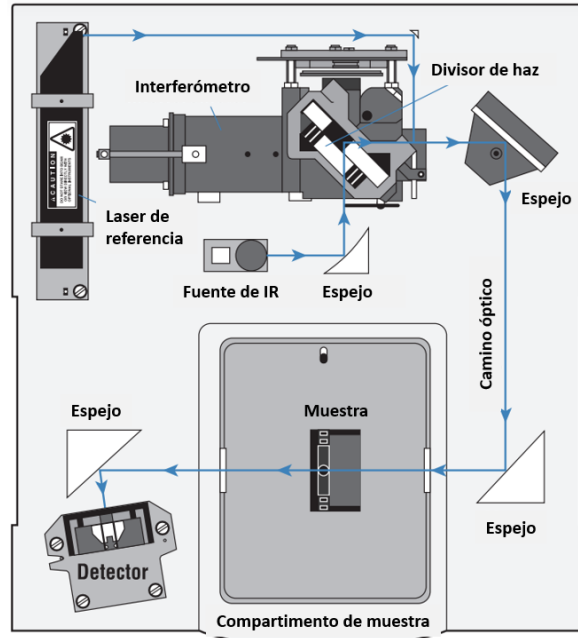


Figura 2-21 Esquema de funcionamiento y componentes de espectrómetro FTIR.

- **Espectroscopia de rayos x de energía dispersiva (EDS)**

Su funcionamiento se basa en la obtención de información mediante la irradiación de una fuente de electrones hacia una muestra con una energía entre 1 – 30 keV. Al colisionar los electrones con la muestra se generan rayos X como se muestra en la Figura 2-22, estos son capturados por un detector que normalmente se encuentra acoplado a los microscopios SEM y procesados en forma de un análisis elemental de la muestra [36].

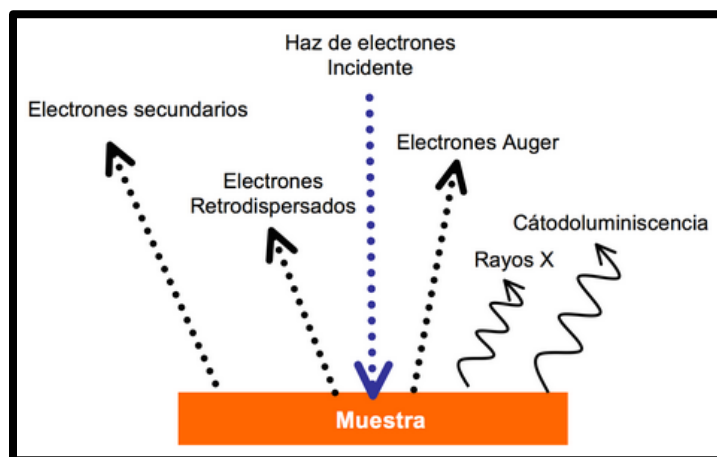


Figura 2-22 Esquema de señales generadas de la interacción del haz de electrones con la muestra.

Mediciones eléctricas

- **Medición de resistencia de dos terminales**

Este método se basa en aplicar un voltaje (V) a un contacto metálico o semiconductor y medir la corriente (I) que atraviesa entre las dos terminales. Estas deben estar a una distancia determinada como la Figura 2-23. Aplicando la ley de ohm de la Ecuación 2.1 se obtiene la resistencia del contacto [37].

$$R = V/I \quad (2.1)$$

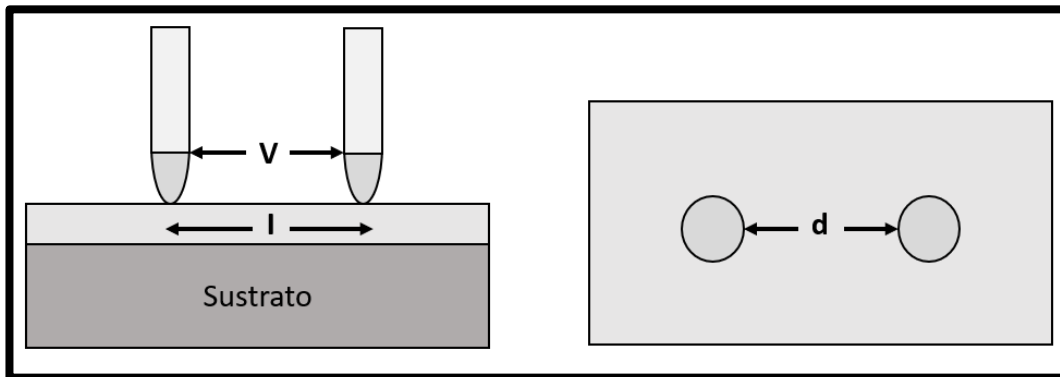


Figura 2-23 Esquema de medición de 2 terminales.

- **Resistencia laminar**

Las películas delgadas normalmente son caracterizadas por su resistencia laminar la cual es expresada en ohms por metro cuadrado (Ω/m^2). La resistencia laminar (R_{sh}) es una medida de resistividad promedio sobre el grosor de la muestra. En la Ecuación 2.2 se muestra la expresión de la resistencia laminar para semiconductores dopados uniformemente.

$$R_{sh} = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln \ln(2)} \left(\frac{V}{I} \right) = 4.532 \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.2)$$

Para medir la resistencia laminar se colocan contactos sobre la superficie a medir como se muestra en la Figura 2-24. Se toman las mediciones de resistencia entre cada contacto para trazar una gráfica. La resistencia laminar será la pendiente de la recta resultante de la gráfica [37].

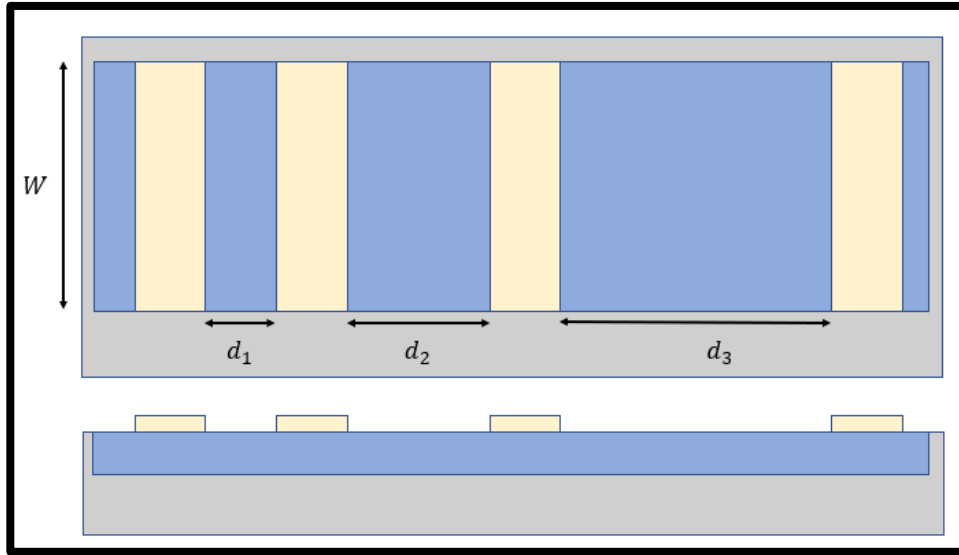


Figura 2-24 Contactos sobre semiconductor para la medición de la resistencia laminar.

Prueba de fatiga

Se le llama fatiga al proceso de cambio estructural permanente, progresivamente localizado, debido a la aplicación repetida de tensiones o deformaciones.

Para llevar a la muestra al punto de fatiga es necesario estresar mecánicamente la muestra con un equipo que lo haga de forma repetida como el esquema observado en la figura 2-25 el cual consiste en mantener fija la muestra de un extremo mientras el otro es desplazado para provocar una curvatura definida en la muestra [38][39] con la finalidad de medir las propiedades de interés de la muestra, comparar estas con sus propiedades iniciales y conocer los límites o el punto de fatiga de la muestra.

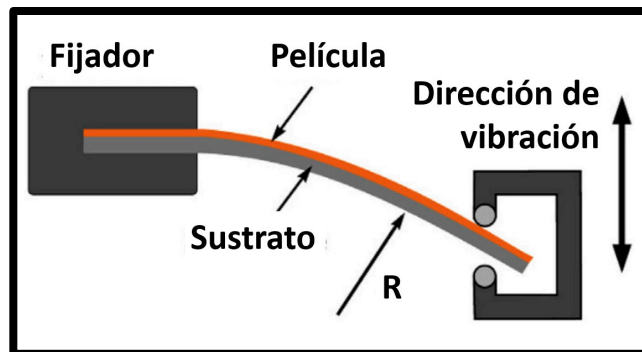


Figura 2-25 Esquema de equipo de aplicación de fatiga mecánica [38].

Capítulo 3 Metodología y detalles experimentales

En este capítulo se describe la metodología utilizada para la programación de un postprocesador para máquina CNC que cumpla con los requerimientos y facilite el uso de la máquina de corte CNC. Se detalla la caracterización de los equipos de impresión 3D SLA LCD para obtener los parámetros que permitan utilizar la máxima resolución de estos. Se presentará la metodología para la escritura directa de electrodos o mascarar sobre películas delgadas de Au. Además, se desarrolla la metodología para el diseño y fabricación de máscaras para evaporación térmica, las cuales se diseñaron y fabricaron con los softwares Fusion 360 y LáserGRBL respectivamente. Se incluye la metodología para la fabricación de electrodos delgados sobre diferentes sustratos, diferentes materiales y geometrías para su aplicación en dispositivos de electrónica flexible. Por último, se describe la prueba de fatiga aplicada a los electrodos fabricados sobre sustratos flexibles.

3.1 Programación de postprocesador

Se modificó un postprocesador de código abierto escrito en lenguaje de programación C para optimizar el código y facilitar su uso en el equipo de corte CNC. El código se encuentra en el Apéndice 1.

Los postprocesadores tienen una estructura como se muestra en la Figura 3-1.



Figura 3-1 Estructura general de un postprocesador CNC.

Se modificó la extensión del código saliente y la descripción de las capacidades en la sección de configuración como se muestra en la Figura 3-2.

```
description = "GCode for Fusion360";  
vendor = "Marlin";  
vendorUrl = "https://github.com/MarlinFirmware/Marlin";  
  
extension = "gcode";  
setCodePage("ascii");  
  
capabilities = CAPABILITY_MILLING | CAPABILITY_JET;
```

Figura 3-2 Sección de configuración del postprocesador.

Como se muestra en la Figura 3-3, en la sección de propiedades se modificaron los nombres de sus variables y se añadió una variable para activar o desactivar el movimiento en el eje Z.

```

properties = {
  Inicio_Home_X: false,
  Inicio_Home_Y: false,
  Inicio_Home_Z: false,
  Posicion_Inicial_Z: "2",
  Fin_Home_X: false,
  Posicion_Final_Y: "",
  Posicion_Final_Z: "",
  Beep_Final: false,
  Viaje_Rapido_XY: 2500,
  Viaje_Rapido_Z: 300,
  Encendido_Router: "200",
  Apagado_Router: "0",
  Marcado_Laser: "128",
  Vaporizar_Laser: "255",
  Atravesar_Laser: "192",
  Apagado_Laser: "0",
  Movimiento_en_Z: true
};

```

Figura 3-3 Sección de propiedades del postprocesador.

En la sección de funciones se agregó el inicio de la línea de código para indicar la potencia de la herramienta de corte CNC y se utilizó la variable `Movimiento_en_Z` en las funciones que la requieren como se muestra en la Figura 3-4.

```

function onRapid(_x, _y, _z) {
  var x = xOutput.format(_x);
  var y = yOutput.format(_y);
  var z = zOutput.format(_z);
  if (x || y) {
    writeWords(" ");
    writeWords("M03 S"+properties.Apagado_Laser);
    writeWords(" ");
    writeWords("G0", x, y, feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_XY));
    if (properties.Movimiento_en_Z == false){
      writeWords("M03 S"+properties.Marcado_Laser);
    }
    if (properties.Movimiento_en_Z == true){
      writeWords("M03 S"+properties.Encendido_Router);
    }
  }
  if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == true) {
    if (z) {
      writeWords("G0", z, feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_Z));
    }
  }
}

```

Figura 3-4 Sección de funciones del postprocesador.

3.2 Caracterización de equipos de fabricación.

Para fabricar una pieza con éxito y con la resolución deseada se debe conocer el equipo con el que se está trabajando, como se opera y las configuraciones que este presenta. Esto es muy importante ya que con esto se tiene control total del proceso de fabricación. A continuación, se presentará la caracterización de los equipos de impresión 3D y corte CNC.

Impresión 3D SLA LCD

- **Resolución**

Se utilizó el equipo de impresión 3D SLA LCD Anycubic Photon Mono 4K con un panel LCD monocromático con densidad de 163 pixeles por pulgada (PPI), resolución lateral de $35 \mu m$ (tamaño de píxel), como se muestra en la Figura 3-5, altura de capa mínima de $10 \mu m$ y lámpara de luz UV de 405 nm.

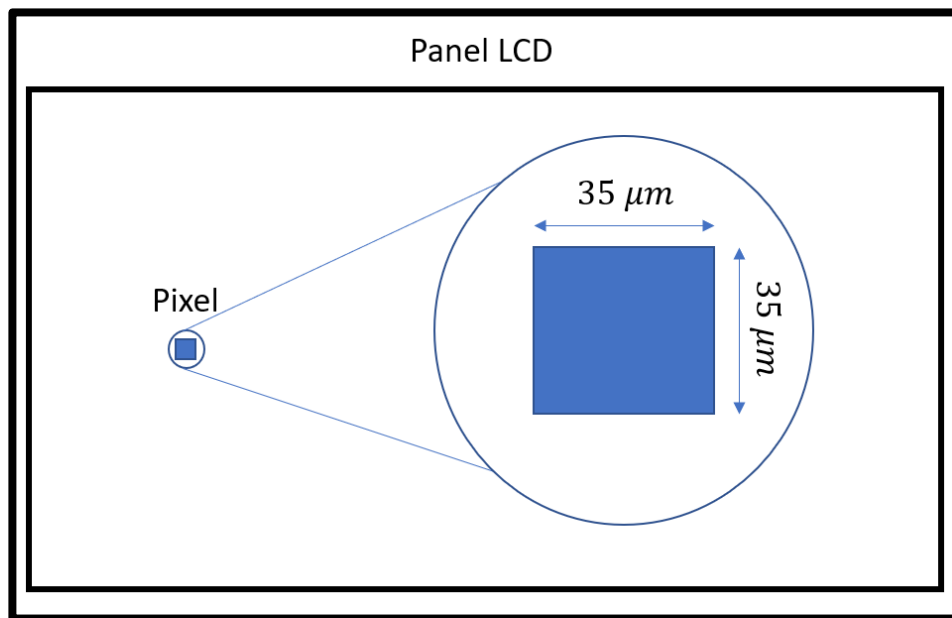


Figura 3-5 Esquema del tamaño del píxel del panel LCD.

Se diseñó un modelo 3D con estructuras cuadradas de $35 \times 35 \mu m$, una separación de $35 \mu m$ entre sí y una altura de $90 \mu m$ la cual se puede observar en la Figura 3-6.

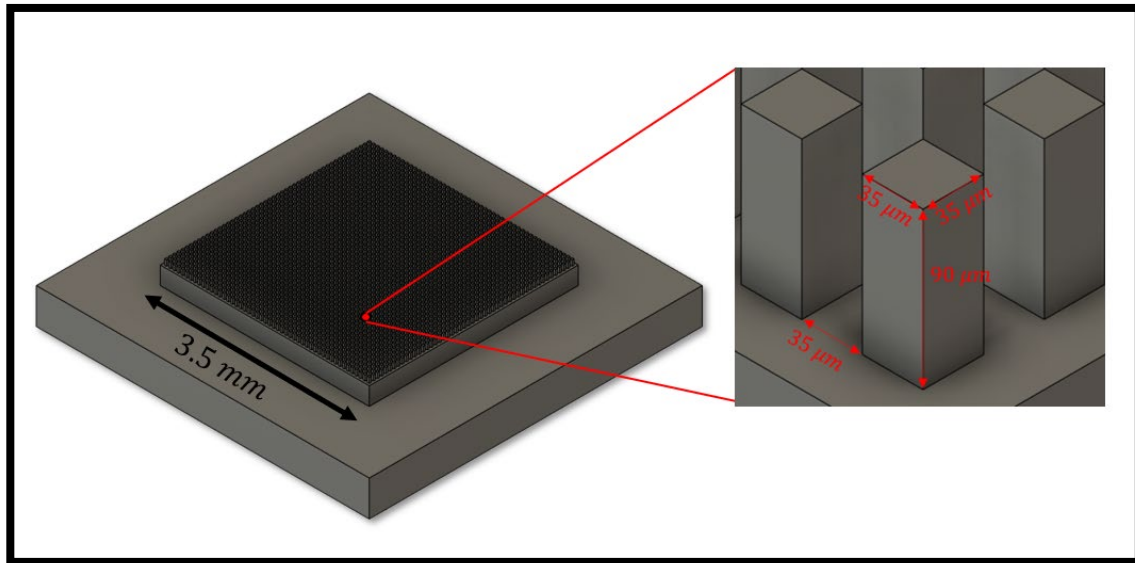


Figura 3-6 Modelo 3D de prueba para máxima resolución de impresión 3D SLA LCD.

- **Parámetros determinantes de resolución máxima**

Se realizaron iteraciones del modelo de la figura 3-6 con altura de capa de $10 \mu\text{m}$ variando tiempos de exposición y potencia de la lámpara UV como se muestra en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Configuración de experimento de resolución máxima de impresión 3D SLA LCD.

Altura de capa (μm)	Potencia de la lámpara (%)	Tiempo de exposición (Segundos)
10	100	6
		8
		10
	80	6
		8
		10
	60	6
		8
		10

Corte laser CNC

Se utilizó un láser CNC con 2.5 GDL de longitud de onda de 455 nm , potencia de 5.5 W y punto de $200 \times 300\ \mu\text{m}$.

Se diseñó un modelo 3D de líneas rectas. Cada línea cuenta con un valor de potencia diferente, desde 85 hasta 200 unidades como en la Figura 3-7.

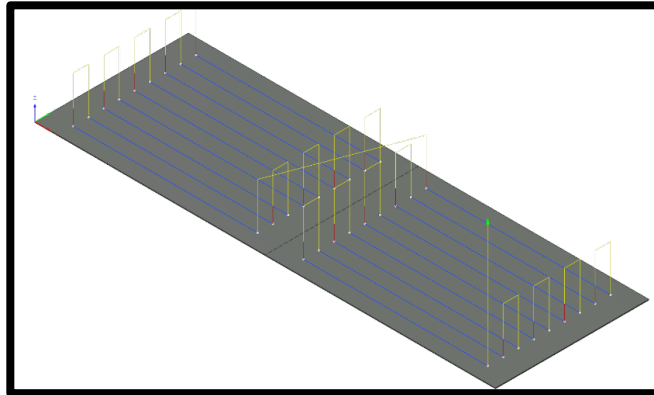


Figura 3-7 Modelo 3D y rutas de corte para pruebas de potencia láser CNC.

Se utilizó el código G resultante para obtener la potencia ideal para corte en sustratos de papel, PI y grabado en películas de Cu, Al y Au.

3.3 Escritura directa de electrodos sobre película delgada.

Se diseñó un modelo 3D de peinetas con canales de $200\ \mu\text{m}$ de ancho como se muestra en la Figura 3-8 y se generaron rutas de corte para su aplicación en películas delgadas.

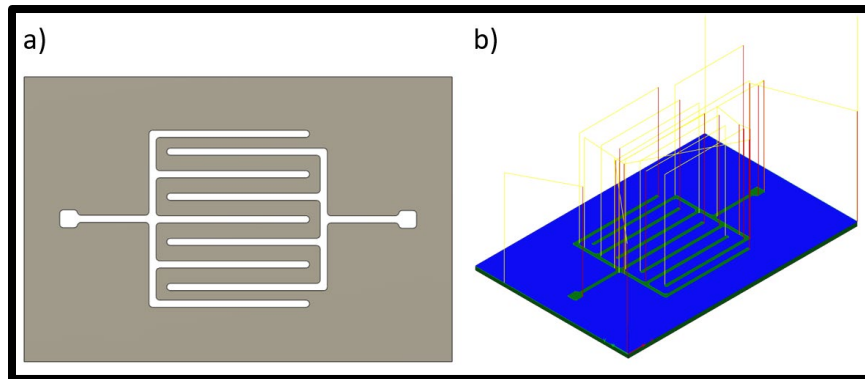


Figura 3-8 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de peinetas para escritura directa sobre películas de Au sobre sustrato de óxido de silicio.

Se realizaron depósitos de película delgada de 100 nm de Cu, Al y Au sobre sustratos de óxido de silicio sobre los que se aplicó escritura directa con el código G generado anteriormente como se muestra en la Figura 3-9.

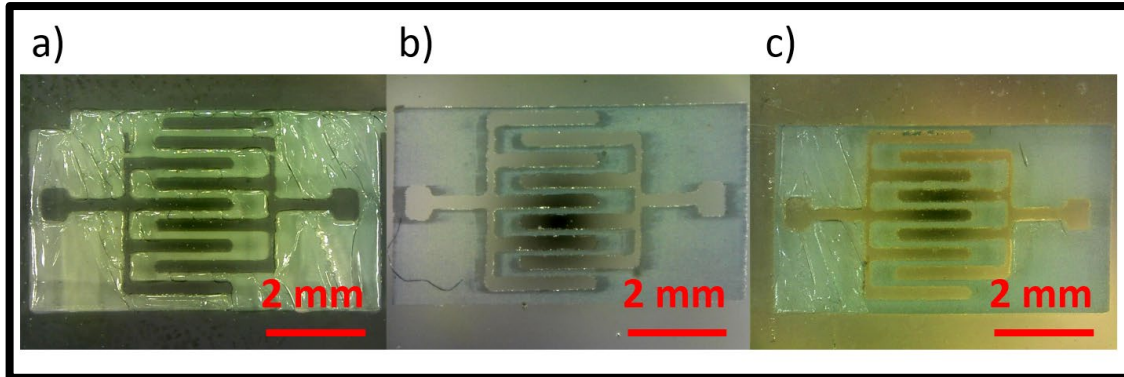


Figura 3-9 a) Escritura directa en: a) 100 nm Cu sobre óxido de silicio, b) 100 nm Al sobre óxido de silicio, c) 100 nm de Au sobre óxido de silicio.

3.4 Diseño y fabricación de máscaras para PVD.

En esta sección se muestra el diseño máscaras mediante la técnica de corte láser CNC con diferentes geometrías para aplicaciones en electrodos, sensores, microfluídica y pruebas de resistencia laminar.

Se diseñó el modelo 3D de una máscara de serpiente (Figura 3-10), con un ancho de canal de 1 mm basada en geometrías ya reportadas para dispositivos flexibles [40], máscara de geometrías complejas con un ancho de canal de 700 μm para pruebas de fatiga de electrodos (Figura 3-11), máscara para depósito de Cu sobre dispositivo de microfluídica (Figura (3-12) y máscara para mediciones de resistencia laminar con un ancho de canal de 300 μm (Figura 3-13).

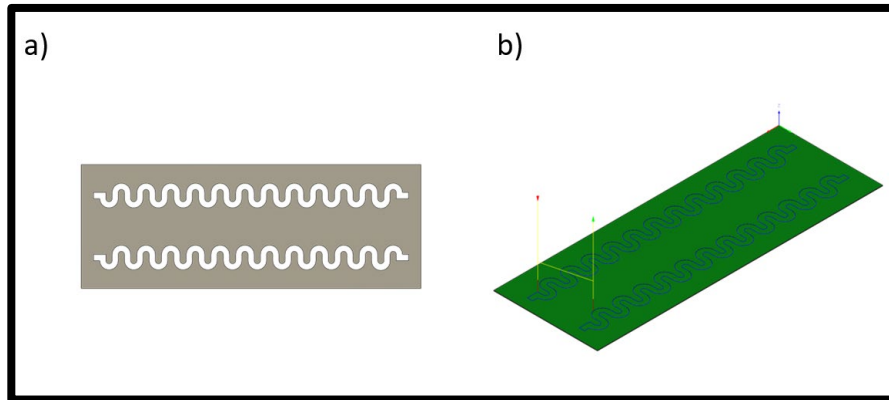


Figura 3-10 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara de serpentín.

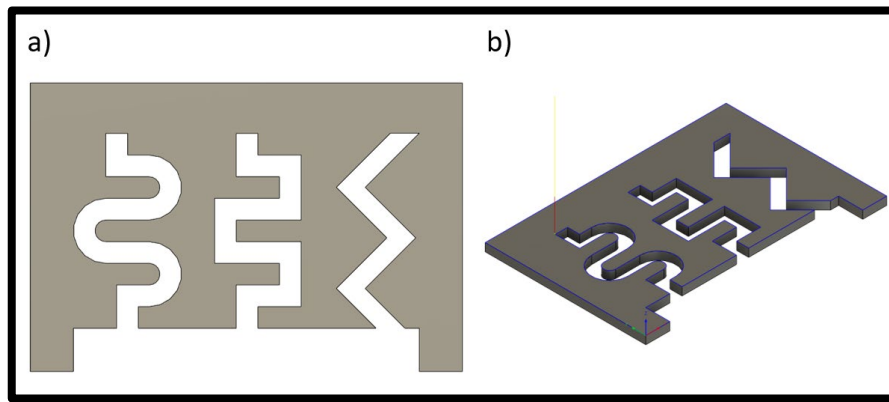


Figura 3-11 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara de geometrías complejas.

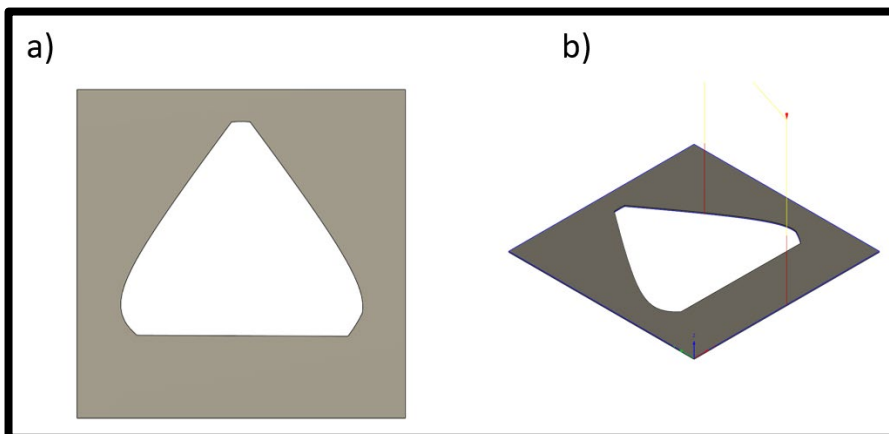


Figura 3-12 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara para dispositivo de microfluidica.

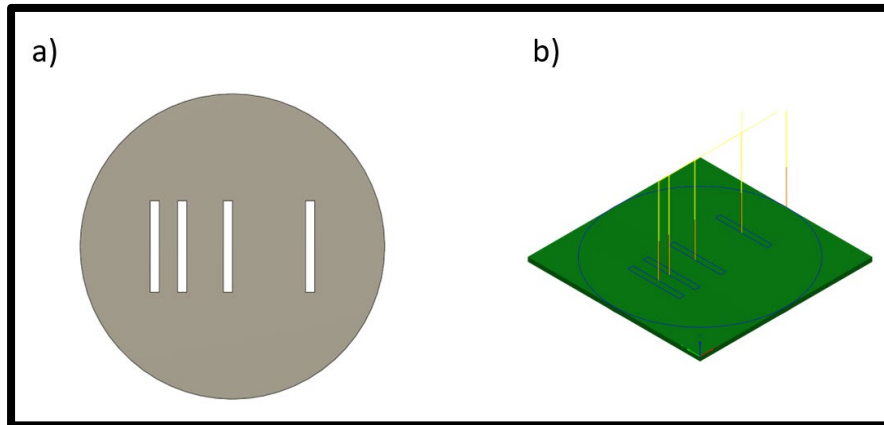


Figura 3-13 a) Modelo 3D y b) rutas de corte de mascara para mediciones de resistencia laminar.

El material utilizado para fabricar las máscaras de serpentín, diferentes geometrías y dispositivo de microfluídica es Kapton debido a su resistencia a temperaturas altas y su facilidad para colocar y sujetar la máscara de contacto al sustrato donde se deposita por por la técnica de evaporación térmica (TE, por sus siglas en inglés).

Para fabricar las máscaras de Kapton se coloca sobre una oblea de óxido de silicio y se monta en la máquina de corte láser CNC como se muestra en la Figura 3-14.

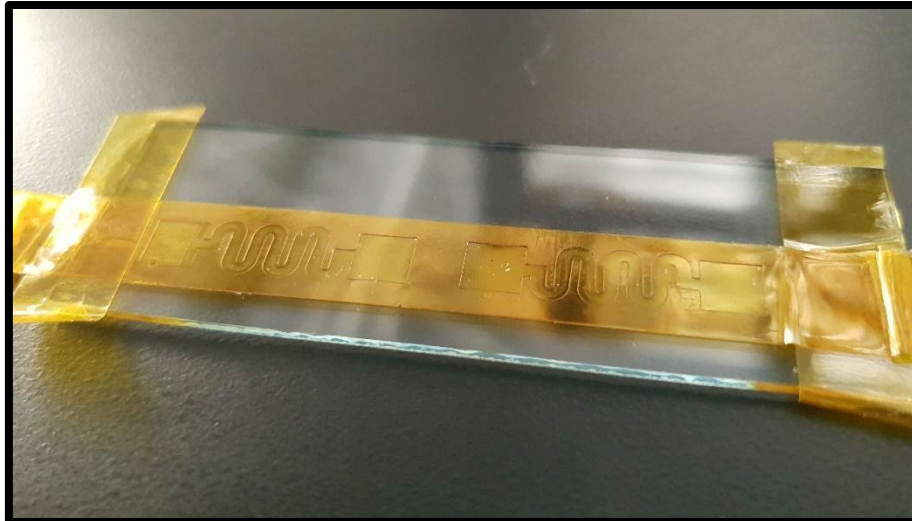


Figura 3-14 Preparación y colocación de Kapton para corte laser CNC.

El material utilizado en la fabricación de máscaras para mediciones de resistencia laminar es el papel bond metalizado por evaporación térmica debido a la baja o nula contaminación que se presenta en el sustrato después de ser utilizado. Al estar metalizado

se mejora a la definición del corte debido a que este evita que los bordes del corte se deformen por la alta temperatura que induce el láser en el papel.

Para fabricar la máscara de papel bond metalizado por evaporación térmica este se coloca sobre una oblea de óxido de silicio para después ser fijados a la máquina de corte láser CNC.

3.5 Fabricación de electrodos.

En esta sección se muestra la metodología para la fabricación de electrodos de distintos espesores, geometrías y materiales sobre sustratos flexibles y rígidos, además del tratamiento de RTA para algunos de estos.

- **Película delgada**

Se depositó mediante evaporación térmica una película de 50 *nm* de Au, basado en espesores de película ya reportados [41], sobre un sustrato de óxido de silicio y PI como se muestra en la Figura 3-15.

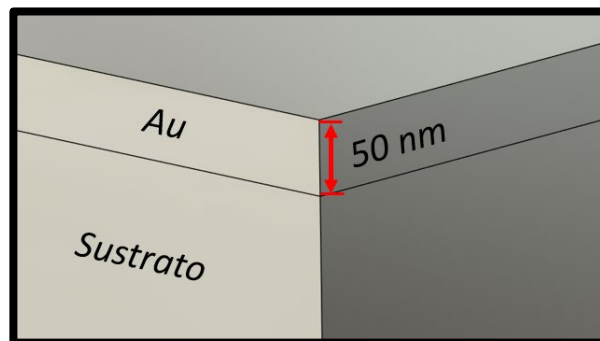


Figura 3-15 Esquema de depósito mediante evaporación térmica de película de 50 *nm* de Au sobre óxido de silicio y PI.

Se depositó mediante evaporación térmica una película delgada de 380 *nm* de Al, basado en grosores ya reportados [42], sobre mica térmica utilizando la máscara de la Figura 3-10 como se muestra en la Figura 3-16.

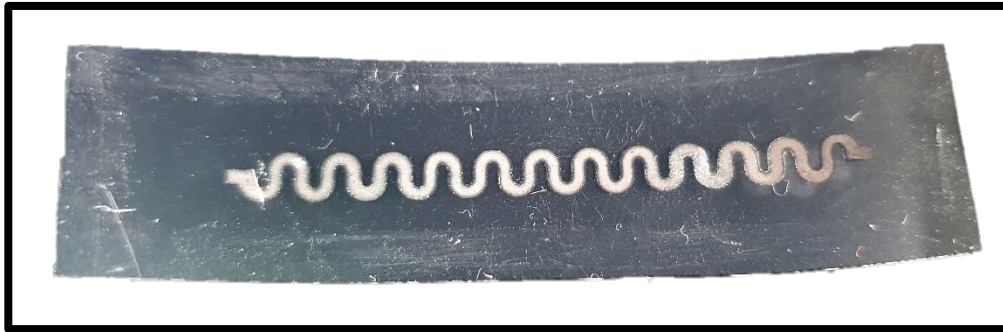


Figura 3-16 Depósito mediante evaporación térmica de película de Al sobre mica térmica con geometría de serpiente.

- **Bicapa**

De acuerdo con datos ya reportados acerca del uso de la bicapa Au/Ni [43][44] y utilizando la máscara de la Figura 3-11 se depositó mediante evaporación térmica un electrodo multicapa de estos metales con grosores de 20 nm y 50 nm respectivamente sobre un sustrato de PI como se muestra en la Figura 3-17. Se fabricó un electrodo adicional con la misma bicapa sin geometrías que funcione de referencia.

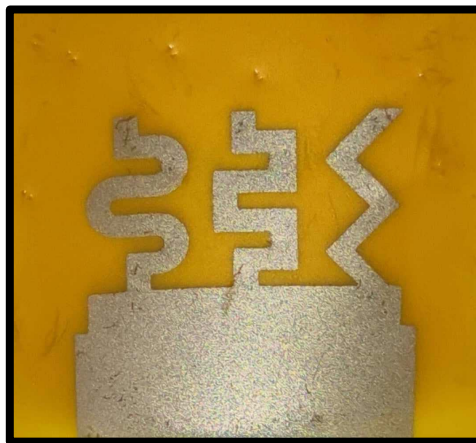


Figura 3-17 Depósito mediante evaporación térmica de bicapa Au/Ni en sustrato de PI.

- **RTA**

Se aplicó RTA la película delgada de Au de 50 nm mostrada en la Figura 3-15 a una temperatura de 300 °C durante 15 segundos para la obtención de nanopartículas [41] como se muestra en la Figura 3-18.

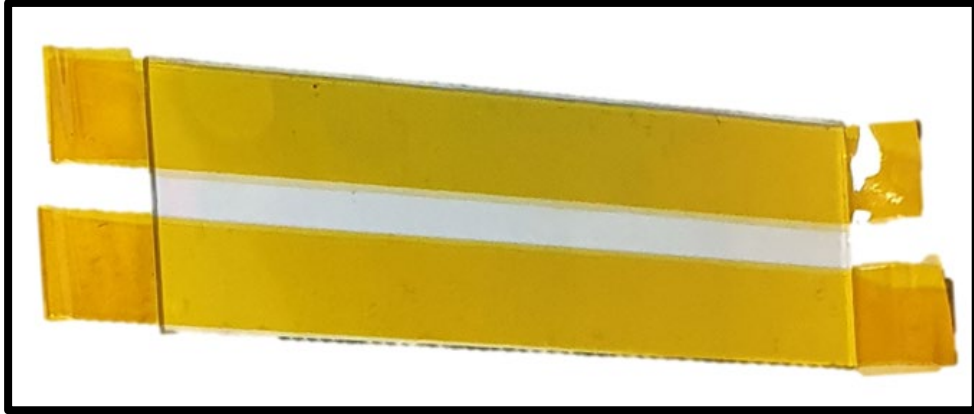


Figura 3-18 Película delgada de Au de 50 nm después del RTA.

3.6 Pruebas de fatiga.

Utilizando un equipo de prueba de fatiga fabricado en el LSMN que se muestra en la Figura 3-19, se realizaron pruebas de fatiga en los electrodos multicapa mostrados en la Figura 3-17. A estos contactos se les realizaron 6000 ciclos de fatiga y se midió su resistividad cada 500 ciclos para identificar el punto de fatiga de cada una de las geometrías presentes.

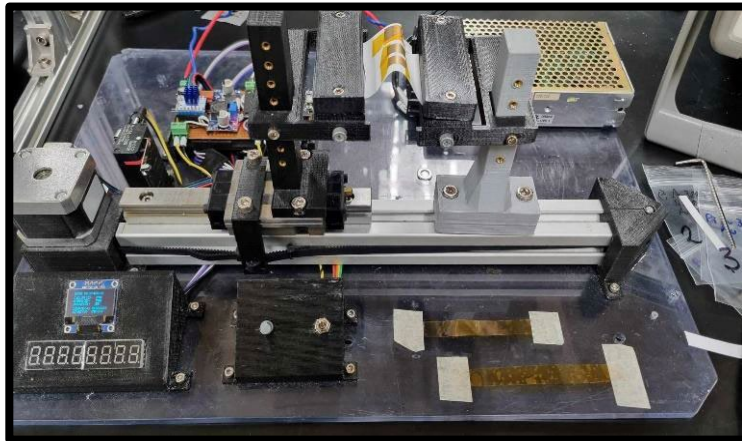


Figura 3-19 Equipo de pruebas de fatiga fabricado en el LSMN.

Debido a las dimensiones de los electrodos, estos se colocaron y fijaron con Kapton a un papel bond para después montarlos en el equipo de prueba de fatiga como se muestra en la Figura 3-20 y 3-21.

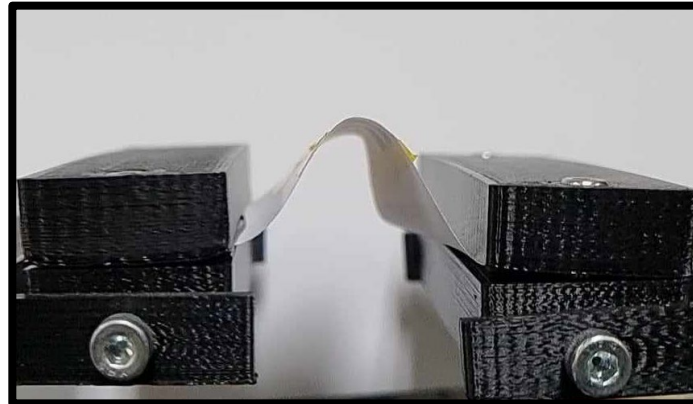


Figura 3-20 Vista lateral de los electrodos montados en el equipo de pruebas de fatiga.

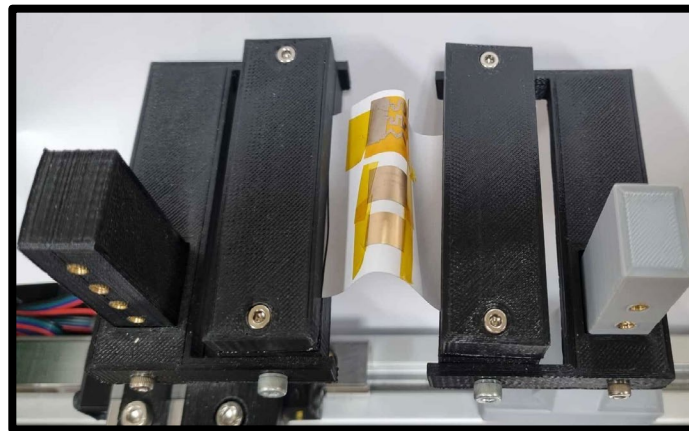


Figura 3-21 Vista superior de los electrodos montados en el equipo de pruebas de fatiga.

Capítulo 4 Resultados

4.1 Resultados de post procesador

Se utilizó el postprocesador modificado para generar código G a partir de rutas de corte. En la Figura 4-1 se muestra la comparativa del código G resultante antes y después de modificarlo.

Postprocesador Modificado	Postprocesador Original
M03 S0 ;Laser/Fan OFF	M117 Starting...
G21 ;Metric Values	M107 ;Laser/Fan OFF
G17 ;Plane XY	G21 ;Metric Values
G90 ;Absolute Positioning	G17 ;Plane XY
G92 X0 Y0 Z0 ;Set XYZ Positions	G90 ;Absolute Positioning
G0 F2500	G92 X0 Y0 Z0 ;Set XYZ Positions
G0 Z2 F300 ;Position Z	G0 F2500
	G0 Z2 F300 ;Position Z
M03 S0	M400
	M117 Grabado1
G0 X10.001 Y4.98 F2500	G0 X10.001 Y4.98 F2500
M03 S200	G0 Z15 F300
G0 Z15 F300	G0 Z2
G0 Z2	G1 Z0.02 F333
G1 Z0.02 F333	G1 Y4.986 Z0.006 F1000
G1 Y4.986 Z0.006 F1000	G1 X10 Y5 Z0
G1 X10 Y5 Z0	G1 X9.98 Y5.442
G1 X9.98 Y5.442	G1 X9.922 Y5.88
G1 X9.922 Y5.88	G1 X9.825 Y6.312
G1 X9.825 Y6.312	G1 X9.69 Y6.733
G1 X9.69 Y6.733	G1 X9.518 Y7.141
G1 X9.518 Y7.141	G1 X9.312 Y7.532
G1 X9.312 Y7.532	G1 X9.071 Y7.903
G1 X9.071 Y7.903	

Figura 4-1 Comparativa de Código G resultante después y antes de la modificación.

4.2 Parámetros óptimos de corte y grabado láser CNC

La Tabla 4-1 muestra los resultados obtenidos de parámetros óptimos de corte y grabado utilizados en toda la experimentación.

Tabla 4-1 Parámetros óptimos de potencia de corte láser CNC para papel, PI, Cu, Al y Au.

Potencia de corte	Papel	PI	Película de Cu (200 nm)	Película de Al (200 nm)	Película de Au (200 nm)
85 - 93	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
94 - 102	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
103 - 111	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
112 - 119	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
120 - 128	Acceptable	Acceptable	Inacceptable	Acceptable	Acceptable
129 - 137	Inacceptable	Acceptable	Inacceptable	Acceptable	Acceptable
138 - 146	Inacceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Inacceptable
147 - 155	Inacceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Inacceptable
156 - 164	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
165 - 173	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
174 - 182	Acceptable	Inacceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
183 - 191	Acceptable	Inacceptable	Acceptable	Inacceptable	Acceptable
192 - 200	Acceptable	Inacceptable	Acceptable	Inacceptable	Acceptable

Acceptable
Inacceptable

4.3 Mediciones de FTIR

Para realizar las mediciones de FTIR se utilizó el equipo Perkin Elmer Spectrum One como el de la Figura 4-2.



Figura 4-2 Espectrómetro FTIR Perkin Elmer Spectrum One.

En la Figura 4-3 se presenta el espectro característico de la mica térmica utilizada para electrodos de Al.

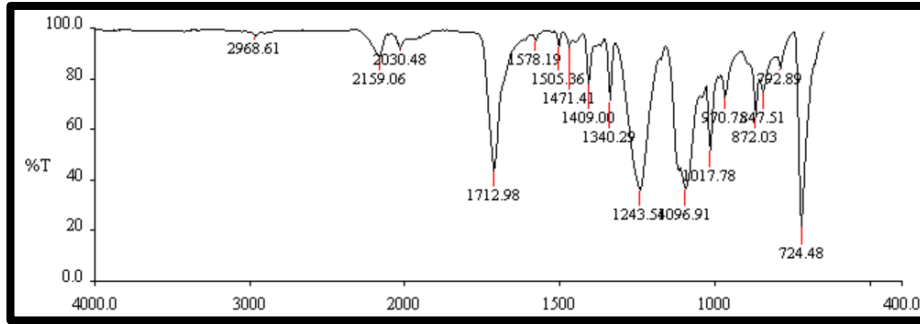


Figura 4-3 Resultados por FTIR de mica térmica.

En la Figura 4-4 se presenta el espectro característico de la poliimida utilizada para electrodos de Ni/Au.

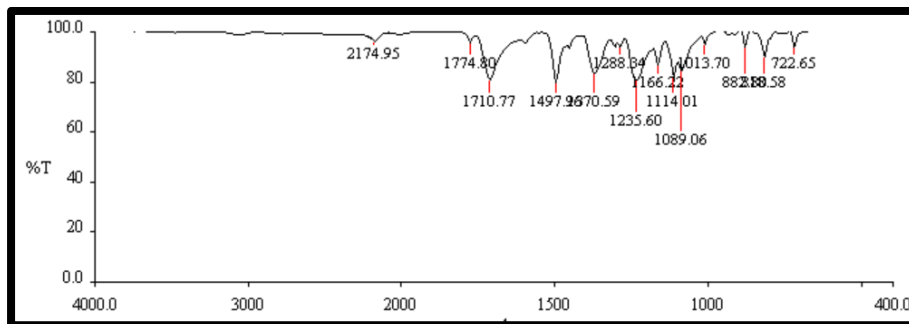


Figura 4-4 Resultados por FTIR de PI.

4.4 Pruebas de resolución

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de resolución de impresión SLA LCD. Las pruebas se hicieron bajo potencia y tiempo variable, obteniendo los mejores resultados de resolución lateral y vertical con potencia de 80% @ 8 segundos, como se muestra en la Figura 4-6. También, se realizaron pruebas de mínimo y máximo aceptable para determinar los límites del equipo (Figura 4-5 y Figura 4-7). La resolución lateral mínima obtenida fue de 55 μm con una estructura característica mínima (feature size) de 35.8 μm (Nominal de 35 μm). La resolución vertical mantuvo una precisión promedio de 14.23 % según valores nominales (Resolución de 10 μm).

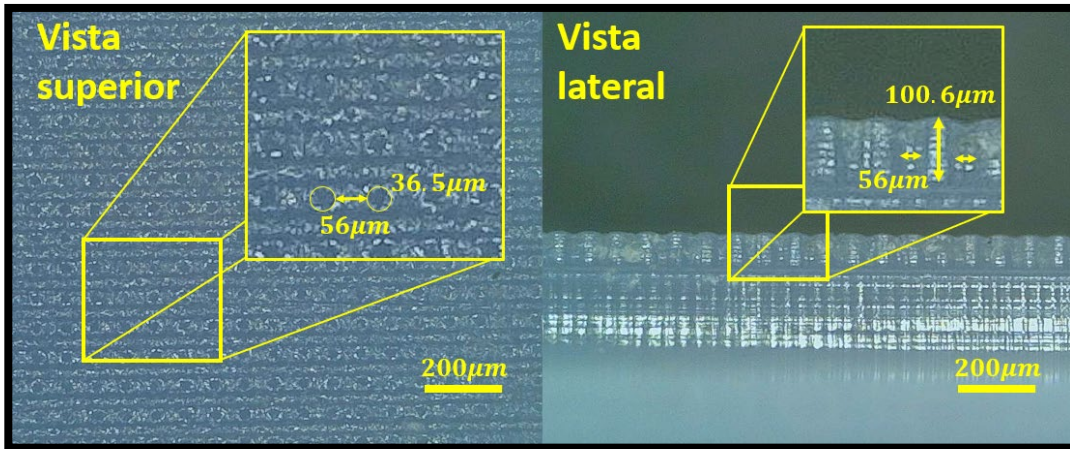


Figura 4-5 Pruebas de máxima resolución de impresión 3D de resina 100% de potencia de luz y 8 segundos de exposición.

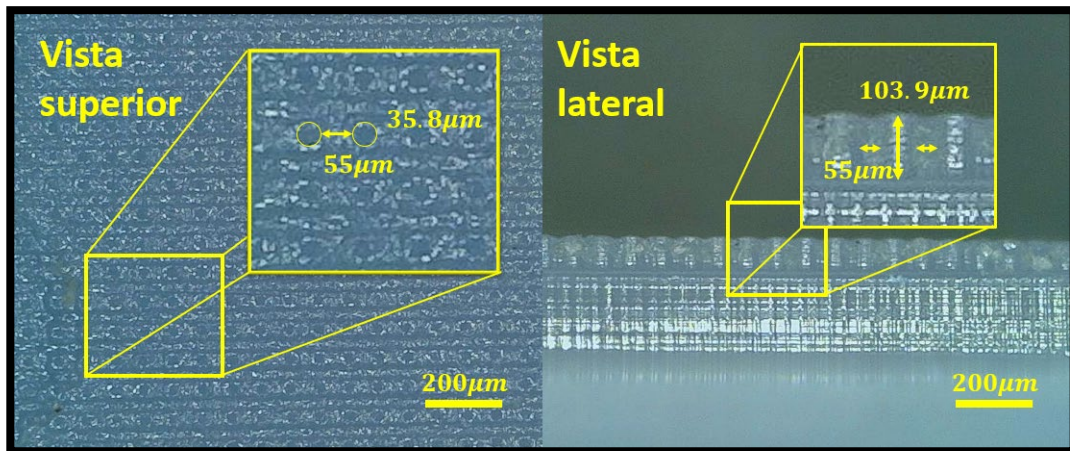


Figura 4-6 Pruebas de máxima resolución de impresión 3D de resina 80% de potencia de luz y 8 segundos de exposición.

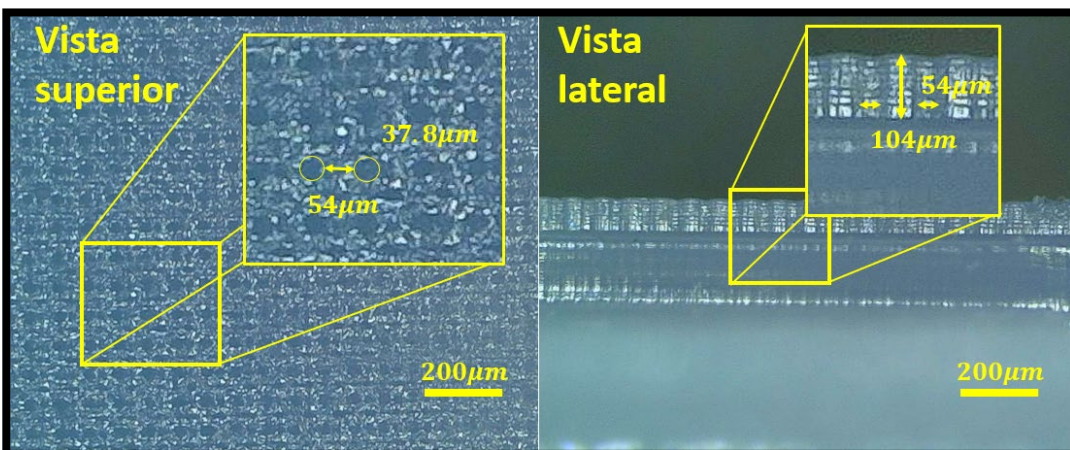


Figura 4-7 Pruebas de máxima resolución de impresión 3D de resina 60% de potencia de luz y 8 segundos de exposición.

Se realizaron cortes láser CNC a Kapton con potencias aceptables y no aceptables. La Figura 4-8 inciso a), muestra el extremo cualitativo de menor desempeño de corte, tomando en cuenta como parámetros de calidad el exceso de rebabas y el sobredimensionamiento. En el inciso b), se muestra la mejor calidad de corte basado en los mismos criterios cualitativos.

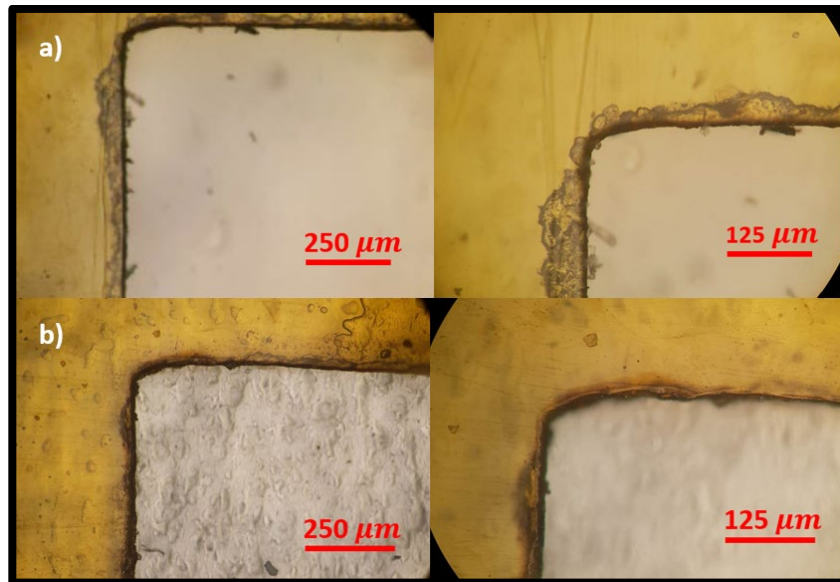


Figura 4-8 Comparación de corte laser: a) potencia de 137.5 y b) potencia de 500.

Se fabricaron máscaras de papel bond recubiertas con Au por evaporación térmica. Estas máscaras se utilizan en procesos evaporación térmica para depósitos de contactos eléctricos para mediciones de resistencia laminar. Las máscaras fueron cortadas por láser CNC como se muestra en la Figura 3-13. Los resultados de resolución de corte láser se muestran en la Figura 4-9.

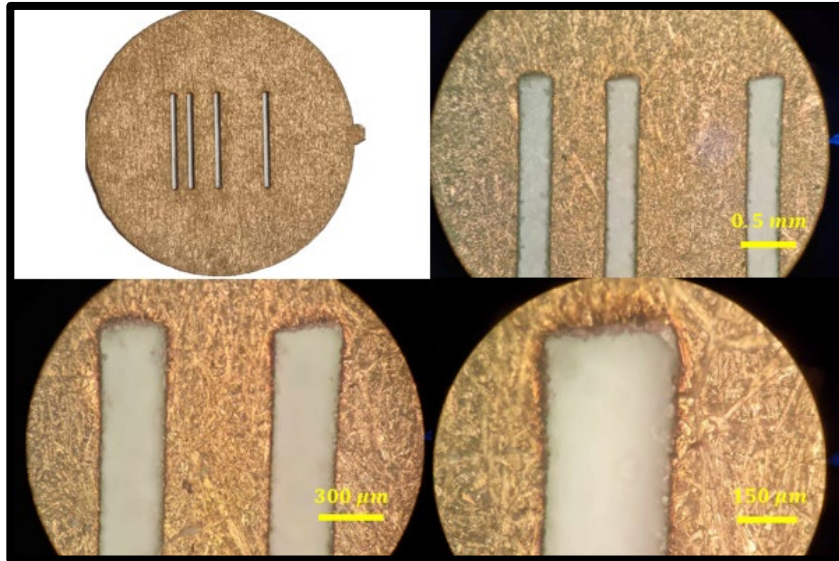


Figura 4-9 Imágenes de máscara para mediciones de resistencia laminar.

Se depositó una película delgada de Au sobre NiOx/Corning glass utilizando las máscaras fabricadas para mediciones de resistencia laminar. Los resultados cualitativos de los electrodos obtenidos por sputtering se muestran en la Figura 4-10.

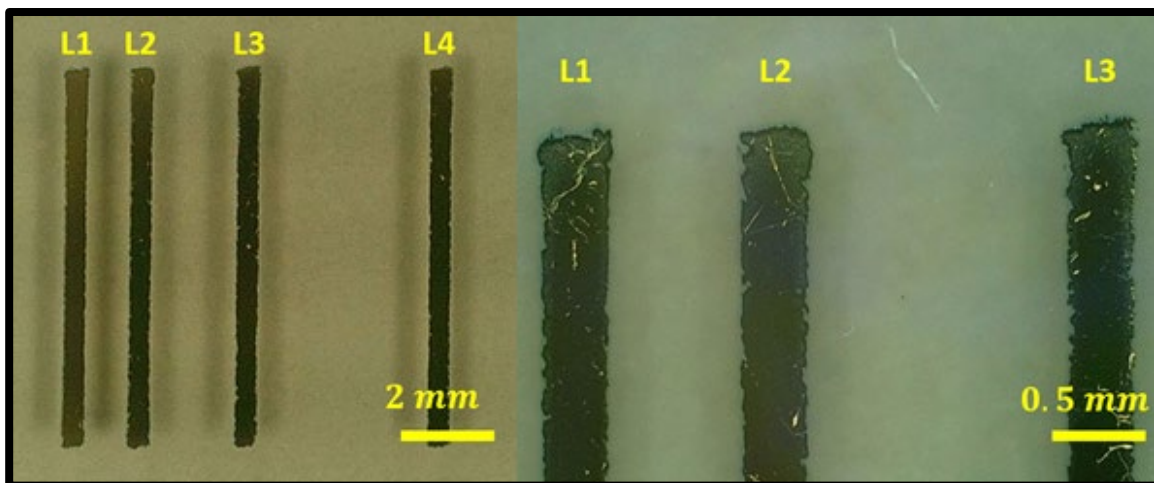


Figura 4-10 Contactos metálicos depositados a través de sputtering para pruebas de resistencia laminar.

4.5 Elipsometría

Se realizaron mediciones de elipsometría en la película de 50 nm de Ni/Corning glass y bicapa Au(25nm)/Ni(50nm)/Corning glass como se muestra en las siguientes gráficas.

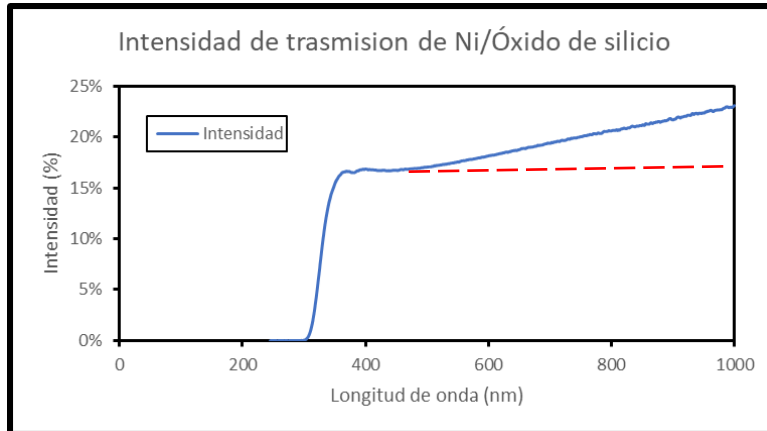


Figura 4-11 Intensidad de transmisión a través de película Ni/Corning glass.

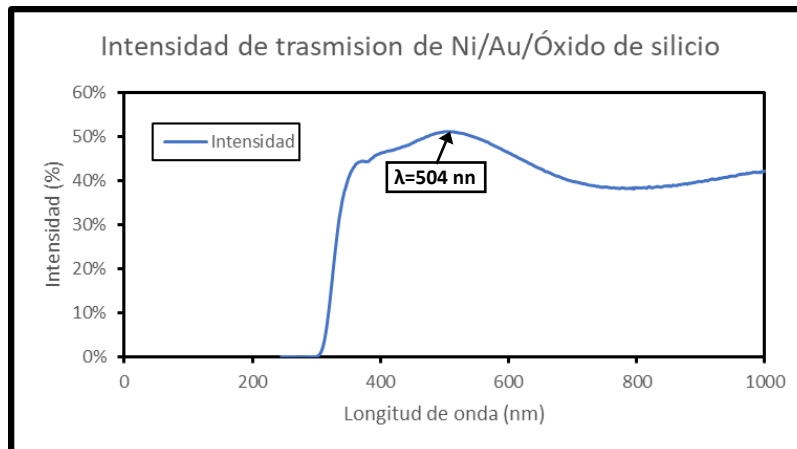


Figura 4-12 Intensidad de transmisión a través de bicapa Au/Ni/Corning glass.

En la Figura 4-11, se puede observar la contribución de la película de Ni en el rango longitud de onda de 450 – 1000 nm como indica la línea punteada. En la Figura 4-12 se observa la contribución de la película de Au. El pico de transmisión a $\lambda=504 \text{ nm}$ comprueba la presencia de Au delgado. Sin embargo, la alta intensidad de esta, esconde la contribución de la película de Ni.

4.6 SEM

Se tomaron imágenes de SEM de las películas de Au de 50 nm depositadas sobre Corning glass y posteriormente sometidas al proceso de RTA para evaluar la formación de nanopartículas como se muestra en la Figura 4-13 a) y 4-13 b).

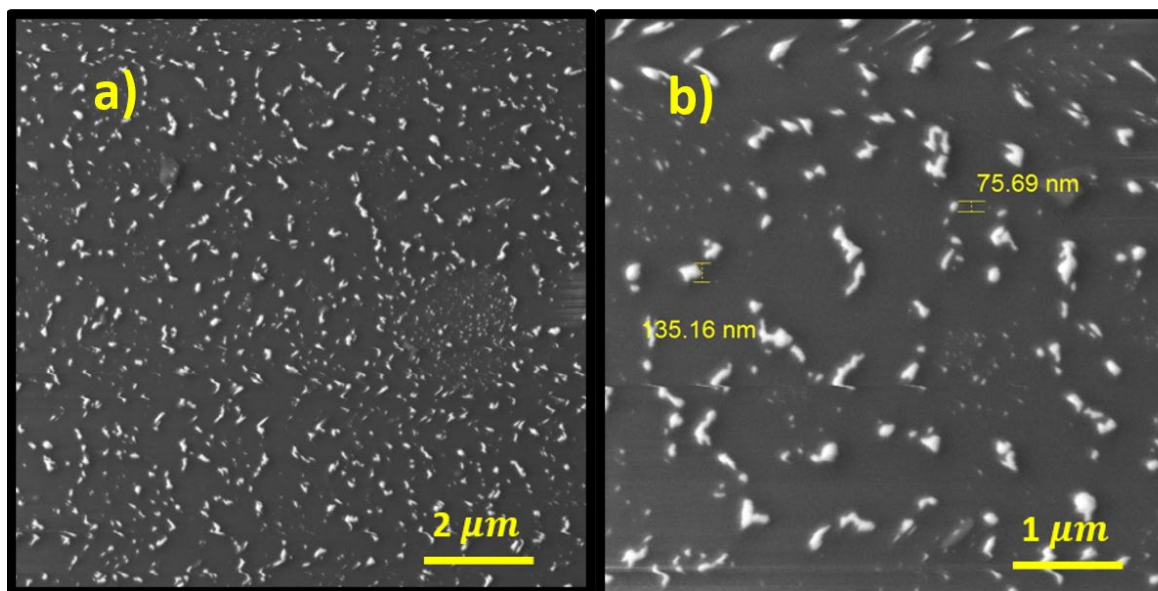


Figura 4-13 Imagen SEM de NPs de Au obtenidas por RTA en película de 50 nm de Au sobre sustrato de Corning glass.

El tratamiento de RTA deriva en la formación de NPs con formas irregulares del y diámetros dispersos en el rango de 20 a 150 nm (Figura 4-13 b)). La alta movilidad del Au sobre Corning glass permite la aglomeración de NPs en el orden de las centenas de nanómetros y la aparición de NPs más pequeñas en el orden de las decenas de nanómetros es debido a irregularidades imperceptibles en el sustrato.

Se obtuvieron imágenes de SEM para el electrodo bicapa Au/Ni/PI como se observa en la Figura 4-14 a) y 4-14 b).

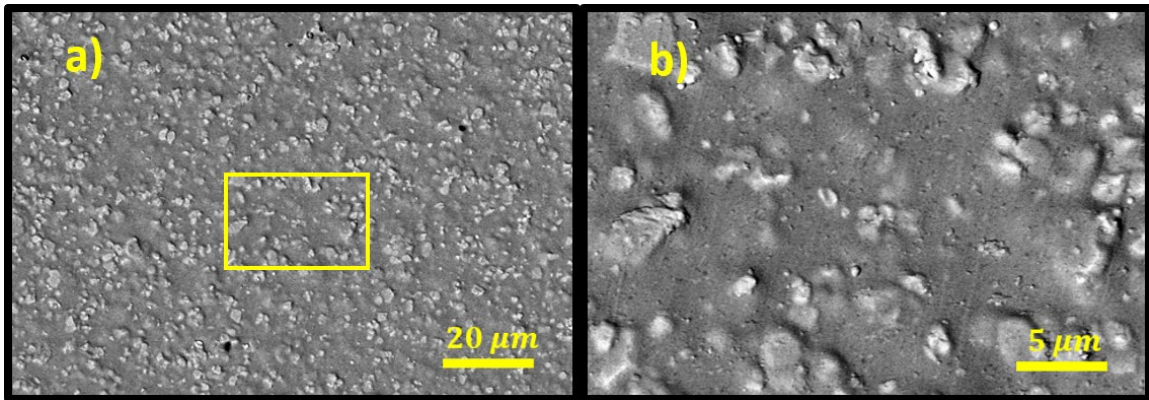


Figura 4-14 Imagen SEM a) y ampliación de la zona de análisis EDS b) de electrodo bicapa Au/Ni/PI.

Las películas bicapa Au/Ni/PI muestran una alta rugosidad comparativamente con películas individuales de Ni y Au. Esto mejora las propiedades eléctricas y mecánicas de la bicapa en comparación con los electrodos de Au, Cu, y Al.

4.7 EDS

Se realizó espectroscopia química EDS (Figura 4-15) por área a los electrodos bicapa Au/Ni/PI para identificar los elementos presentes en la bicapa. La zona de análisis se muestra en la Figura 4-14 inciso b). El alto contenido de carbono se atribuye al sustrato flexible de PI. El contenido de oxígeno se atribuye a la oxidación de la película de Ni.

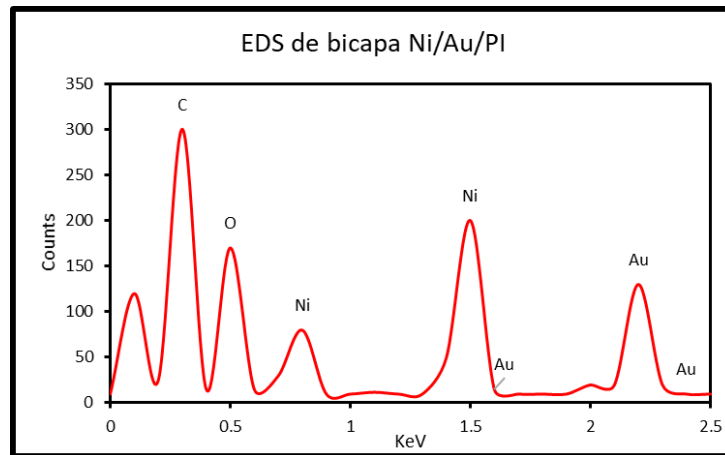


Figura 4-15 Caracterización de la bicapa Au/Ni/PI por medio de espectroscopia EDS.

4.8 Mediciones eléctricas

Se realizaron pruebas de fatiga a él electrodo bicapa Au/Ni/Pi sin geometrías complejas (M1) y con geometrías complejas (M2) a 4000 ciclos, midiendo su resistencia cada 100 ciclos con lo que se obtuvo el cambio de resistencia contra ciclos de fatiga. Las geometrías complejas utilizadas para esta prueba se muestran en la Figura 4-16. Estas geometrías son las más utilizadas en la actualidad en dispositivos flexibles de radiofrecuencia.

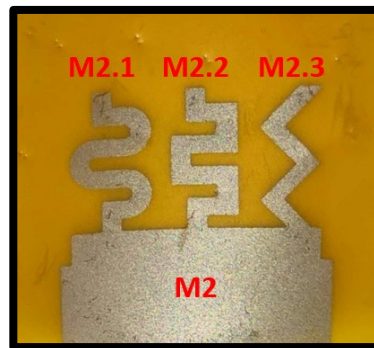


Figura 4-16 Denominación de las geometrías en electrodo bicapa Au/Ni/Pi.

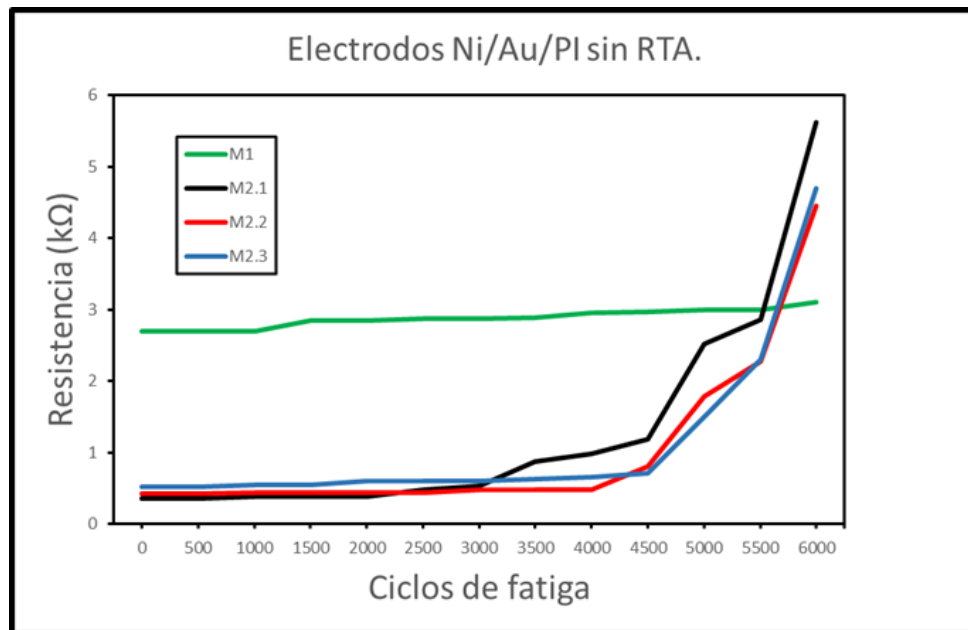


Figura 4-17 Gráfico de cambio en la resistividad con respecto a los ciclos de fatiga del electrodo bicapa Au/Ni/Pi de geometrías complejas sin RTA.

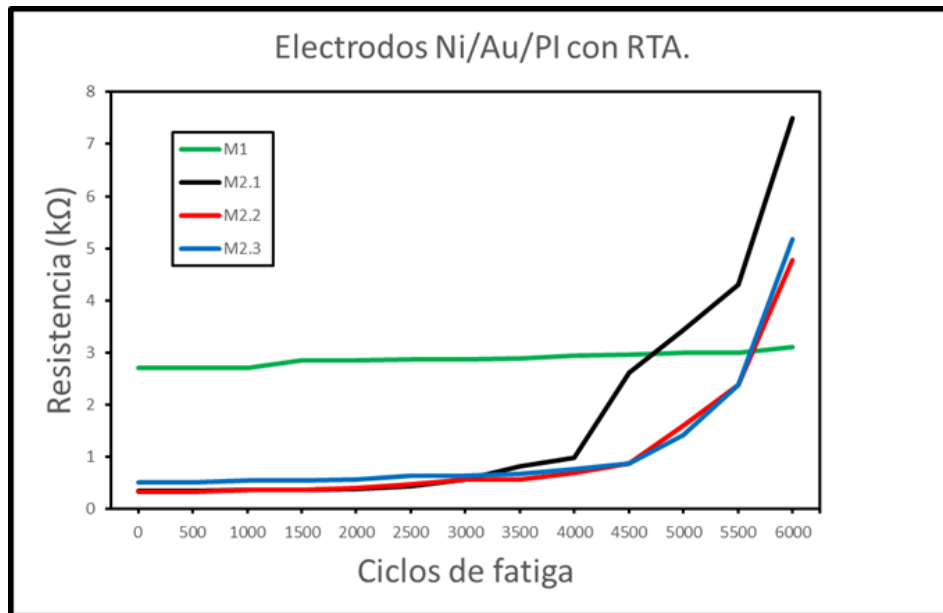


Figura 4-18 Gráfico de cambio en la resistividad con respecto a los ciclos de fatiga del electrodo bicapa Au/Ni/PI de geometrías complejas con RTA.

La Figura 4-17 muestra el gráfico de resistencia contra ciclos de fatiga en muestras de geometrías complejas sin RTA. Como se puede observar, la línea verde (M1) que corresponde a la muestra de control sin geometrías complejas y sin RTA, mantiene una resistencia en constante y en promedio más alta que la resistencia inicial de las muestras de geometrías más complejas (M2.1, M2.2, M2.3) hasta los 5.5 k ciclos de fatiga aproximadamente. Las muestras con RTA mostraron un comportamiento similar como se muestra en la Figura 4-18. Sin embargo, la muestra M2.1 muestra un incremento de la resistencia a 4.5 k ciclos de fatiga.

4.9 Mediciones de resistencia laminar

Se realizaron mediciones de corriente voltaje para calcular la resistencia laminar de la película metálica depositada sobre una oblea de óxido de silicio como se muestra en las Figura 4-19 y Figura 4-20.

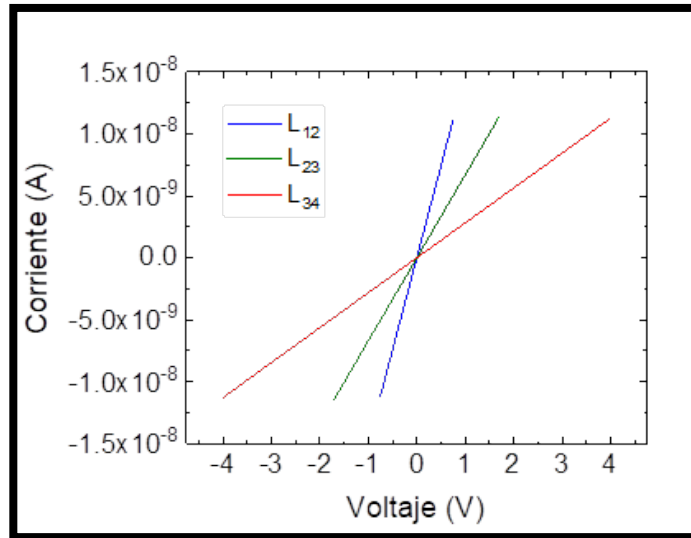


Figura 4-19 Mediciones de Voltaje – Corriente sobre los contactos para pruebas de resistencia laminar.

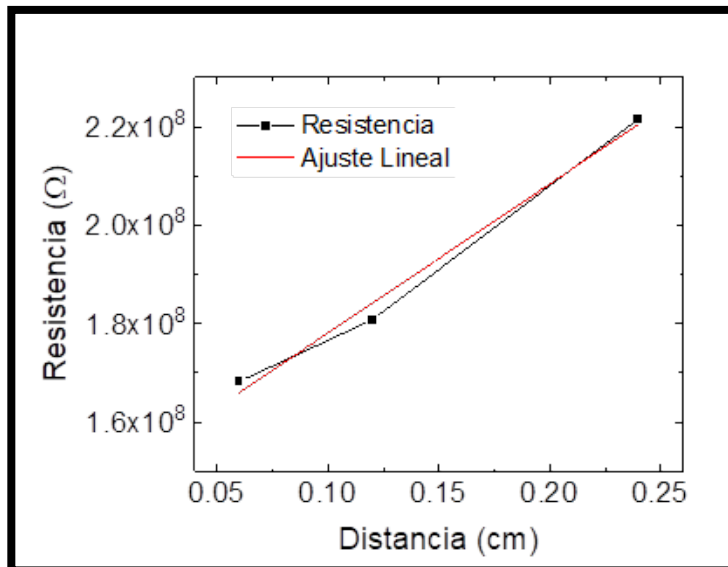


Figura 4-20 Representación de la resistencia laminar de la película.

La Figura 4-19 muestra mediciones C-V en los contactos L1, L2, L3, y L4 que se muestran en la Figura 4-10. Los valores de resistencia obtenidos se grafican en la Figura 4-20. Después de un ajuste lineal se obtiene la resistencia laminar presentado en línea roja.

Capítulo 5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones generales

Se diseñaron electrodos nanoestructurados de geometrías complejas a partir de películas delgadas metálicas mediante micromaquinado 3D sobre sustratos rígidos y flexibles.

Se caracterizó el desempeño eléctrico y mecánico de los electrodos de película delgada en sustratos flexibles.

Se obtuvo la resolución máxima de los equipos de impresión 3D y corte láser CNC para su posterior uso en máscaras para evaporación térmica y fabricación de dispositivos microelectrónicos.

Se obtuvieron electrodos nanoestructurados por medio de técnicas de micromaquinado 3D y RTA.

5.2 Trabajo futuro

- Derivado de los diseños de electrodos, fabricar dispositivos electrónicos basados en los electrodos bicapa fabricados.
- Estudiar más a fondo las propiedades mecánicas de los electrodos fabricados.
- Imágenes de SEM a muestras sometidos a pruebas de flexión
- Estandarizar la medición eléctrica de los contactos.

Referencias

- [1] Landeros, O. P., Nedev, N., Alvarez, M. C., Salas, B. V., Barajas, A., Anzaldo, D. M., ... & Leon, A. A. (2018). Gold, copper and gold/copper bimetallic nanoparticles obtained by focused ion beam sputter deposition and rapid thermal annealing. *Vacuum*, 157, (pp. 166-172).
- [2] Bravo Marmolejo, V. O., & Diosdado De la Peña, J. Ángel. (2017). MANUFACTURA ADITIVA PARA PROTOTIPADO RÁPIDO. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 3(2), 2675–2679. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2100>
- [3] Zhang, B., Li, S., Zhang, Z., Meng, Z., He, J., Ramakrishna, S., & Zhang, C. (2023). Intelligent biomaterials for micro and nanoscale 3D printing. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 26, 100454.
- [4] Gobierno de México (s.f.). Data México, Mexicali. Economía y Educación. Recuperado de: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/mexicali>
- [5] Servytur, C. (s. f.). Concanaco Servytur - CONSIDERAN a MÉXICO CLAVE PARA INDUSTRIA DE SEMICONDUCTORES EN NORTEAMÉRICA. Concanaco Servytur. Recuperado a partir de <https://www.concanaco.com.mx/prensa/tepuedeinteresar/consideran-a-mexico-clave-para-industria-de-semiconductores-en-norteamerica>
- [6] Khan, S. M., Nassar, J. M., & Hussain, M. M. (2021). Paper as a Substrate and an Active Material in Paper Electronics. *ACS Applied Electronic Materials*, 3(1), (pp. 30-52). <https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00484>
- [7] Tobjörk, D., & Österbacka, R. (2011). Paper electronics. *Advanced materials*, 23(17), 1935-1961.

- [8] Chen, J., Wen, Y., Guo, Y., Wu, B., Huang, L., Xue, Y., ... & Liu, Y. (2011). Oxygen-aided synthesis of polycrystalline graphene on silicon dioxide substrates. *Journal of the American Chemical Society*, 133(44), 17548-17551.
- [9] Yan, X., Zhou, Z., Zhao, J., Liu, Q., Wang, H., Yuan, G., & Chen, J. (2018). Flexible memristors as electronic synapses for neuro-inspired computation based on scotch tape-exfoliated mica substrates. *Nano Research*, 11(3), (pp. 1183-1192).
- [10] Lu, Q.-H., & Zheng, F. (2018). Polyimides for Electronic Applications. En *Advanced Polyimide Materials* (pp. 195-255). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812640-0.00005-6>
- [11] Diahm, S. (2021). Polyimide in electronics: Applications and processability overview. *Polyimide for Electronic and Electrical Engineering Applications*, 2020-2021.
- [12] Ghodsian, B., Jung, C., Cetiner, B. A., & De Flaviis, F. (2005). Development of RF-MEMS switch on PCB substrates with polyimide planarization. *IEEE sensors journal*, 5(5), 950-955.
- [13] Chen, C.-K., Lin, Y.-C., Miyane, S., Ando, S., Ueda, M., & Chen, W.-C. (2020). Thermally and Mechanically Stable Polyimides as Flexible Substrates for Organic Field-Effect Transistors. *ACS Applied Polymer Materials*, 2(8), (pp. 3422-3432). <https://doi.org/10.1021/acsapm.0c00488>
- [14] Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2017). *Callister's materials science and engineering*. John Wiley & Sons.
- [15] Servicio Geologico Mexicano (s.f.). - Precio Internacional de los metales. https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/precio_metales.jsp
- [16] Song, P. P., Qi, Y. M., & Cai, D. C. (2018). Research and Application of Autodesk Fusion360 in Industrial Design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 359, 012037. doi:10.1088/1757-899x/359/1/012037

- [17] Bryła, J., & Martowicz, A. (2021). Study on the importance of a slicer selection for the 3d printing process parameters via the investigation of g-code readings. *Machines*, 9(8), 163.
- [18] Raikar, R., Bhanushali, J., Takarkhede, N., Shah, S., & Varma, D. (2021, June). Open source LaserGRBL–Arduino based laser engraver. In *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Science & Technology (ICAST2021)*.
- [19] Pham, Q. P., & Thuat, T. M. (2021). Design and Fabrication of Mini 5 Axis CNC Machine for Gemstone Carving. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(6).
- [20] Maluf, N. (2002). An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. *Measurement Science and Technology*, 13(2), (pp. 229-229).
- [21] Lobontiu, N. (2005). *Mechanics of Microelectromechanical Systems*, (pp. 343-353).
- [22] Arias Delgado, L. M. (2019). Diseño y fabricación de una máquina CNC de corte láser multipropósito.
- [23] Jayachandraiah, B., Krishna, O. V., Khan, P. A., & Reddy, R. A. (2014). Fabrication of low cost 3-Axis CNC router. *International Journal of Engineering Science Invention*, 3(6), 1-10.
- [24] Osgood, R. M., & Gilgen, H. H. (1985). Laser direct writing of materials. *Annual Review of Materials Science*, 15(1), (pp. 549-576).
- [25] Arnold, C. B., Serra, P., & Piqué, A. (2007). Laser direct-write techniques for printing of complex materials. *Mrs Bulletin*, 32(1), (pp. 23-31).
- [26] Thakar, C. M., Parkhe, S. S., Jain, A., Phasinam, K., Murugesan, G., & Ventayen, R. J. M. (2021). 3d Printing: Basic principals and applications. *Materials Today: Proceedings*.
- [27] Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639-649.

- [28] Mohamed, M. G., Kumar, H., Wang, Z., Martin, N., Mills, B., & Kim, K. (2019). Rapid and inexpensive fabrication of multi-depth microfluidic device using high-resolution LCD stereolithographic 3D printing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(1), 26.
- [29] Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (evaporación térmica) processing*. William Andrew.
- [30] Savale, P. A. (2016). Physical vapor deposition (evaporación térmica) methods for synthesis of thin films: A comparative study. *Arch. Appl. Sci. Res*, 1-8.
- [31] Zhang, X., Zhang, T. Y., Wong, M., & Zohar, Y. (1998). Residual-stress relaxation in polysilicon thin films by high-temperature rapid thermal annealing. *Sensors and Actuators A: Physical*, 64(1), (pp.109-115).
- [32] Jaeger, R. C. (1987). *Introduction to microelectronic fabrication*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc..
- [33] Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., & Joy, D. (2006). *Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM)*. *Scanning Microscopy for Nanotechnology*, (pp. 1–40).
- [34] Woollam, J. A., & Snyder, P. G. (1990). Fundamentals and applications of variable angle spectroscopic ellipsometry. *Materials Science and Engineering: B*, 5(2), (pp. 279–283).
- [35] Berthomieu, C., & Hienerwadel, R. (2009). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis Research*, 101(2-3), (pp. 157–170).
- [36] Hodoroaba, V.-D. (2020). Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). *En Characterization of Nanoparticles* (pp. 397–417). Elsevier.
- Collins, T. J. (2007). ImageJ for microscopy. *Biotechniques*, 43(S1), (pp. S25-S30).
- [37] Schroder, D. K. (2015). *Semiconductor material and device characterization*. John Wiley & Sons.
- [38] Susan, D. F., Beck, D. F., Sorensen, N. R., & Thayer, G. E. (2008). *Fatigue Behavior of Thin Cu Foils and Cu/Kapton Flexible Circuits* (No. SAND2008-4293C). Sandia National Lab.(SNL-NM),

- [39] Saleh, R., Barth, M., Eberhardt, W., & Zimmermann, A. (2021). Bending setups for reliability investigation of flexible electronics. *Advanced Electronic Materials*.
- [40] Huang, S., Liu, Y., Zhao, Y., Ren, Z., & Guo, C. F. (2019). Flexible electronics: stretchable electrodes and their future. *Advanced Functional Materials*, 29(6), 1805924.
- [41] Landeros, O. P., Nedev, N., Alvarez, M. C., Salas, B. V., Barajas, A., Anzaldo, D. M., ... Leon, A. A. (2018). Gold, copper and gold/copper bimetallic nanoparticles obtained by focused ion beam sputter deposition and rapid thermal annealing. *Vacuum*.
- [42] Hummel, R.E., Dehoff, R.T. and Geier, H.J. 1976. Activation Energy for Electrotransport in Thin Aluminum Films by Resistance Measurements. *J. Phys. Chem. Solids*, 37: 73 – 80.
- [43] Olliges, S., Frank, S., Gruber, P. A., Auzelyte, V., Solak, H., & Spolenak, R. (2011). Thermo mechanical properties and plastic deformation of gold nanolines and gold thin films. *Materials Science and Engineering: A*, 528(19-20), 6203-6209.
- [44] Napari, M., Huq, T. N., Hoyer, R. L., & MacManus-Driscoll, J. L. (2021). Nickel oxide thin films grown by chemical deposition techniques: Potential and challenges in next-generation rigid and flexible device applications. *InfoMat*, 3(5), 536-576.

Apéndice

1. Código de postprocesador CNC para Fusion 360

<pre> description = "GCode for Fusion360"; vendor = "Marlin"; vendorUrl = "https://github.com/MarlinFirmware/Marlin"; extension = "gcode"; setCodePage("ascii"); capabilities = CAPABILITY_MILLING CAPABILITY_JET; tolerance = spatial(0.002, MM); minimumChordLength = spatial(0.01, MM); minimumCircularRadius = spatial(0.01, MM); maximumCircularRadius = spatial(1000, MM); minimumCircularSweep = toRad(0.01); maximumCircularSweep = toRad(180); allowHelicalMoves = true; allowedCircularPlanes = undefined; // allow any circular motion // user-defined properties properties = { Inicio_Home_X: false, Inicio_Home_Y: false, Inicio_Home_Z: false, Posicion_Inicial_Z: "Z", Fin_Home_X: false, Posicion_Final_Y: "", Posicion_Final_Z: "", Beep_Final: false, Viaje_Rapido_XY: 2500, Viaje_Rapido_Z: 300, Encendido_Router: "200", Apagado_Router: "0", Marcado_Laser: "128", Vaporizar_Laser: "255", Atravesar_Laser: "192", Apagado_Laser: "0", Movimiento_en_Z: true }; var xyzFormat = createFormat({decimals:3}); var feedFormat = createFormat({decimals:0}); var xOutput = createVariable({prefix:"X"}, xyzFormat); var yOutput = createVariable({prefix:"Y"}, xyzFormat); var zOutput = createVariable({prefix:"Z"}, xyzFormat); var feedOutput = createVariable({prefix:"F"}, feedFormat); var planeOutput = createVariable({prefix:"G"}, feedFormat); // circular output var iOutput = createReferenceVariable({prefix:"I"}, xyzFormat); var jOutput = createReferenceVariable({prefix:"J"}, xyzFormat); var kOutput = createReferenceVariable({prefix:"K"}, xyzFormat); var cuttingMode; function formatComment(text) { return String(text).replace(/[\n]/g, ""); } function writeComment(text) { writeWords(formatComment(text)); } function onOpen() { } </pre>	<pre> /** Force output of X, Y, and Z. */ function forceXYZ() { xOutput.reset(); yOutput.reset(); zOutput.reset(); } /** Force output of X, Y, Z, and F on next output. */ function forceAny() { forceXYZ(); feedOutput.reset(); } function onSection() { writeLn(""); writeWords("M03 S"+properties.Apagado_Laser, " ;Laser/Fan OFF"); writeWords("G21", " ;Metric Values"); writeWords(planeOutput.format(17), " ;Plane XY"); writeWords("G90", " ;Absolute Positioning"); if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == true) { writeWords("G92 X0 Y0 Z0", " ;Set XYZ Positions"); } if (currentSection.getType() == TYPE_JET properties.Movimiento_en_Z == false) { writeWords("G92 X0 Y0", " ;Set XY Positions"); writeWords("G0", feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_XY)); } if (properties.Inicio_Home_X) { writeWords("G28 X", " ;Home X"); } if (properties.Inicio_Home_Y) { writeWords("G28 Y", " ;Home Y"); } if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == true) { if (properties.Inicio_Home_Z) { writeWords("G28 Z", feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_Z), " ;Home Z"); } if (properties.Posicion_Inicial_Z) { writeWords("G0 Z" + properties.Posicion_Inicial_Z, feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_Z), " ;Position Z"); } } if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING) { if (properties.Movimiento_en_Z == true) { cuttingMode = properties.Encendido_Router } if (properties.Movimiento_en_Z == false) { cuttingMode = properties.Marcado_Laser } } if (currentSection.jetMode == TYPE_JET) { if (currentSection.jetMode == 0) { cuttingMode = properties.Atravesar_Laser } else if (currentSection.jetMode == 1) { cuttingMode = properties.Marcado_Laser } else if (currentSection.jetMode == 2) { cuttingMode = properties.Vaporizar_Laser } else { cuttingMode = ("M03 S"+properties.Apagado_Laser + " ;Unknown Laser Cutting Mode") } } if (hasParameter("operation-comment")) { var comment = getParameter("operation-comment"); if (comment) { writeLn(""); } } } </pre>	<pre> function onDwell(seconds) { if (seconds > 99999.999) { warning(localize("Dwelling time is out of range.")); } seconds = clamp(0.001, seconds, 99999.999); writeWords("G4 S" + seconds, " ;Dwell time"); } function onPower(power) { if (power) { writeWords(cuttingMode) } else { writeWords("M03 S"+properties.Apagado_Laser) } if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING) { writeWords(cuttingMode) } } function onRapid(x, y, z) { var x = xOutput.format(x); var y = yOutput.format(y); var z = zOutput.format(z); if (x y) { writeWords(""); writeWords("M03 S"+properties.Apagado_Laser); writeWords(" "); writeWords("G0", x, y, feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_XY)); } if (properties.Movimiento_en_Z == false) { writeWords("M03 S"+properties.Marcado_Laser); } if (properties.Movimiento_en_Z == true) { writeWords("M03 S"+properties.Encendido_Router); } if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == true) { if (z) { writeWords("G0", z, feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_Z)); } } } function onLinear(x, y, z, feed) { var x = xOutput.format(x); var y = yOutput.format(y); var z = zOutput.format(z); var f = feedOutput.format(feed); if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == true) { if (x y z) { writeWords("G1", x, y, z, f); } else if (f) { writeWords("G1", f); } } if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == false) { if (x y z) { writeWords("G1", x, y, z, f); } else if (f) { writeWords("G1", f); } } if (currentSection.getType() == TYPE_JET) { if (x y) { writeWords("G1", x, y, f); } else if (f) { writeWords("G1", f); } } } </pre>	<pre> function onCircular(clockwise, cx, cy, cz, x, y, z, feed) { // one of X/Y and I/J are required and likewise var start = getCurrentPosition(); switch (getCurrentPlane()) { case PLANE_XY: if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == true) { writeWords(planeOutput.format(17), (clockwise ? "G2":"G3"), xOutput.format(x), yOutput.format(y), zOutput.format(z), iOutput.format(cx - start.x, 0), jOutput.format(cy - start.y, 0), feedOutput.format(feed)); } if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == false) { writeWords(planeOutput.format(17), (clockwise ? "G2":"G3"), xOutput.format(x), yOutput.format(y), iOutput.format(cx - start.x, 0), jOutput.format(cy - start.y, 0), kOutput.format(cz - start.z, 0), feedOutput.format(feed)); } break; case PLANE_ZX: if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == true) { writeWords(planeOutput.format(18), (clockwise ? "G2":"G3"), xOutput.format(x), yOutput.format(y), zOutput.format(z), iOutput.format(cx - start.x, 0), kOutput.format(cz - start.z, 0), feedOutput.format(feed)); } if (currentSection.getType() == TYPE_MILLING && properties.Movimiento_en_Z == false) { writeWords(planeOutput.format(18), (clockwise ? "G2":"G3"), xOutput.format(x), yOutput.format(y), iOutput.format(cx - start.x, 0), feedOutput.format(feed)); } break; case PLANE_YZ: writeWords(planeOutput.format(19), (clockwise ? "G2":"G3"), xOutput.format(x), yOutput.format(y), zOutput.format(z), jOutput.format(cy - start.y, 0), kOutput.format(cz - start.z, 0), feedOutput.format(feed)); break; default: linearize(tolerance); } } function onSectionEnd() { writeWords(planeOutput.format(17)); forceAny(); } function onClose() { writeLn(""); writeWords("M03 S"+properties.Apagado_Laser, " ;Laser/Fan OFF"); if (properties.Posicion_Final_Z) { writeWords("G0 Z" + properties.Posicion_Final_Z, feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_Z), " ;Position Z"); } writeWords("G0 X0 Y0", feedOutput.format(properties.Viaje_Rapido_XY)); if (properties.Fin_Home_X) { writeWords("G28 X", " ;Home X"); } if (properties.Posicion_Final_Y) { writeWords("G0 Y" + properties.Posicion_Final_Y, " ;Position Y"); } if (properties.Beep_Final) { writeWords("M300 S800 P300"); } } </pre>
---	--	--	---