

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“APLICACIÓN DE UNA TÉCNICA FOTOTÉRMICA
PARA LA INSPECCIÓN DE PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESO (PCB) FLEXIBLES”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Ing. Oliver Alegría Vázquez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle

CODIRECTOR DE TESIS:

M.C. Ignacio Herrera Aguilar



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Orizaba

FECHA: 21/02/2018
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. OLIVER ALEGRIA VAZQUEZ
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
INGENIERIA ELECTRONICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"APLICACION DE UNA TECNICA FOTOTERMICA PARA LA INSPECCION DE
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO (PCB) FLEXIBLES".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


RUBEN POSADA GOMEZ

JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

C.A. TITULACIÓN



SECRETARIA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA

ggc



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México
Teléfonos: (272) 7 24 40 96 Fax. (272) 7 25 17 28
e-mail: Orizaba@itorizaba.edu.mx www.itorizaba.edu.mx





FECHA : 07/02/2018

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. RUBEN POSADA GOMEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

OLIVER ALEGRIA VAZQUEZ

la cual lleva el título de:

"APLICACION DE UNA TECNICA FOTOTERMICA PARA LA INSPECCION DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO (PCB) FLEXIBLES".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. JOSE DE JESUS AGUSTIN FLORES

FIRMA

SECRETARIO : M.C. IGNACIO HERRERA AGUILAR

FIRMA

VOCAL : DR. GERARDO AGUILA RODRIGUEZ

FIRMA

VOCAL SUP. : DR. MARIO ALBERTO GARCIA MARTINEZ

FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **INGENIERIA ELECTRONICA**

OPCION: I **Tesis**



Agradecimientos.

Al CONACYT por el apoyo económico recibido durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A los Doctores José de Jesús Agustín Flores Cuautle, Ignacio Herrera Aguilar, Gerardo Águila Rodríguez y Mario Alberto García Martínez por la revisión de la presente tesis y sus valiosos comentarios y aportaciones.

A mis compañeros de laboratorio con los que compartí dos años de muchas vivencias: Canek, Jován, Aldo, Patrice, Daniel, Óscar, Rafael, Luis, Jesús y Said.

A las tres mujeres de mi vida que me han acompañado en esta etapa... Mi madre Margarita, mi hermana Ariana y mi compañera de viaje Angélica.

A mi padre Felipe por el cual, todos mis logros toman sentido.

A todas aquellas personas que me han ayudado a concluir esta etapa.

Resumen.

Los circuitos electrónicos flexibles han ido generando más y más interés en la industria de la electrónica por las múltiples aplicaciones que se les han ido adjudicando, esto gracias a sus propiedades eléctricas y mecánicas que contrastan notablemente con las propiedades de placas de circuito impreso rígido.

Aunque existe interés, el campo de aplicabilidad de este tipo de circuitos es aún reducido por la dificultad de integración y combinación con aquellos de sustratos rígidos. El aspecto de su manufactura también causa cierto grado de abstinencia para los desarrolladores de aplicaciones que deben contemplar criterios o estándares especiales para el diseño y selección de este tipo de materiales.

Existen diversos métodos de inspección para conocer la calidad estructural de la manufactura de los diseños creados antes y después de ser sometidos a análisis por aplicación de estrés y así conocer el desgaste obtenido. De entre estos métodos, la técnica de microscopía fototérmica fue utilizada en este estudio para obtener información acerca de la deposición de las capas de cobre sobre el sustrato flexible del circuito.

El efecto fototérmico como fenómeno de estudio en las muestras analizadas, permite obtener mediante su detección con el sensor PVDF y el amplificador Lock-in, imágenes térmicas con las que se es posible determinar parámetros de calidad en la fabricación de pistas flexibles y así corroborar que la manufactura de estas es la correcta. Se obtuvieron imágenes térmicas a partir de muestras de circuitos flexibles, con frecuencias de muestreo calculadas a partir de las propiedades térmicas encontradas en la literatura.

Contenido.

Índice de figuras.	6
Índice de Tablas.	8
Índice de ecuaciones.	8
Introducción.	9
Problemática.	10
Hipótesis.	10
Metodología.	10
Objetivo general.	13
Objetivos específicos.	13
Alcances y limitaciones.	13
Descripción del documento.	13
Capítulo I.	15
Justificación.	15
Estado del Arte.	15
Resumen I.	16
Resumen II.	16
Resumen III.	17
Resumen IV.	17
Resumen V.	18
Resumen VI.	18
Resumen VII.	19
Resumen VIII.	19
Resumen IX.	20
Resumen X.	20
Resumen XI.	21
Estado del campo.	22
Capítulo II.	23
2.1 Luz.	23
2.1.2 Luz láser.	23
2.2 Efecto fototérmico.	24
2.2.1 Formas de transmisión de energía calorífica.	24
2.2.1.1 Radiación.	24

2.2.1.2 Convección.....	25
2.2.1.3 Conducción.....	25
2.3 Materiales transductores.....	25
2.3.1.1 Ferroelectricidad.....	25
2.3.1.2 Piezoelectricidad.	26
2.3.1.3 Piroelectricidad.....	26
2.3.2 Características del sensor de Difluoruro de Polivinilideno (PVDF).....	27
2.3.2.1 Propiedades del film piezoeléctrico.	27
2.4 Técnicas fototérmicas.....	30
2.4.1 Técnica fotopiroeléctrica.....	30
2.4.1.1 Configuración Directa.	30
2.4.1.1 Configuración inversa.	30
2.5 Técnica de microscopía fotopiroeléctrica.	31
2.5.1 Resolución en microscopía Fotopiroeléctrica.	32
2.6 Propiedades térmicas de interés.	32
2.6.1 Calor específico.....	32
2.6.2 Conductividad térmica.	32
2.6.3 Densidad.....	33
2.6.4 Longitud de difusión térmica.	33
2.6.7 Efusividad térmica.....	33
Capítulo III.	34
Desarrollo teórico.	34
3.1 Interfaz gráfica LabVIEW.....	34
3.1.1 Generación de las coordenadas de movimiento.	40
3.1.2 Configuración del instrumento Stanford Research 830.	43
3.1.2.1 Medición con el instrumento Stanford Research 830.	44
3.2 Diseño y Fabricación del mecanismo de posicionamiento en tres dimensiones.....	46
3.3 Diseño de la fuente de polarización para el láser.	48
Capítulo IV.	50
Desarrollo experimental.....	50
4.1 Construcción del sistema de posicionamiento.	50
4.2 Preparación de la muestra.	50

4.3 Pruebas de repetibilidad del mecanismo de posicionamiento.....	52
4.4 Pruebas con el sistema de enfoque.....	60
4.5 Pruebas con circuitos flexibles.....	64
Conclusiones.....	70
Bibliografía.....	71
Anexos.....	72

Índice de figuras.

Figura 1. Metodología de trabajo propuesta.....	12
Figura 2. Efectos físicos del fenómeno fototérmico.....	15
Figura 3. Espectro electromagnético.....	23
Figura 4. Espectro de la típica absorción infrarroja del film PVDF.....	27
Figura 5. Configuración directa en la técnica fotopiroeléctrica.....	30
Figura 6. Configuración inversa en la técnica fotopiroeléctrica.....	30
Figura 7. Menú inicio de la interfaz gráfica LabVIEW.....	34
Figura 8. Pestaña "Dimensiones de la muestra".....	35
Figura 9. Pestaña "Ajuste de posición de inicio".....	36
Figura 10. Pestaña "Estatus".....	36
Figura 11. Configuración puerto serial para el Microcontrolador Arduino Uno.....	37
Figura 12. Evento "Zero Button" Value change.....	38
Figura 13. A) Up Button value change. B) Down Button value change.....	39
Figura 14. A) Previous Button value change. B) Next Button value change.....	39
Figura 15. A) Top Button value change. B) Bottom Button value change.....	39
Figura 16. A) Home value change. B) Enviar comando value change.....	39
Figura 17. Movimiento zigzag sobre la muestra.....	40
Figura 18. Discriminante para el movimiento zigzag.....	41
Figura 19. Envío de coordenadas del movimiento zig por puerto serial.....	42
Figura 20. Envío de coordenadas del movimiento zag por puerto serial.....	42
Figura 21. Configuración instrumento SR-830.....	43
Figura 22. Medición con tiempo de espera para estabilización del SR-830.....	44
Figura 23. Creación de las hojas del libro en Excel.....	45
Figura 24. Medición indexada en el libro Excel.....	45
Figura 25. Marco para la sujeción de los elementos de accionamiento y desplazamiento.....	46
Figura 26. Elementos de accionamiento y desplazamiento fijados al marco.....	46
Figura 27. Ensamble completo de los 3 ejes coordenados.....	47
Figura 28. Sujeción del láser y su base al eje Z.....	47
Figura 29. Ensamblaje completo del mecanismo de posicionamiento.....	48

Figura 30. Diagrama a bloques para la fabricación de los elementos del sistema.	48
Figura 31. Etapas principales de la fuente de luz modulada.	49
Figura 32. Esquemático de la fuente de luz modulada.	49
Figura 33. Armado de los ejes X-Y previo a la manufactura del eje Z.	50
Figura 34. Sistema de posicionamiento con los 3 ejes ensamblados.	50
Figura 35. A) Selección del área de la muestra a analizar. B) Pasta térmica para mejorar contacto muestra-sensor.	51
Figura 36. Aseguramiento de la muestra al sistema de posicionamiento. B) Experimento en ejecución.	51
Figura 37. Calibración del objeto de referencia.	52
Figura 38. Secuencia realizada con desplazamiento de 1 mm.	53
Figura 39. Secuencia realizada con desplazamiento de 2 mm.	54
Figura 40. Secuencia realizada con desplazamiento de 3 mm.	55
Figura 41. Secuencia realizada con desplazamiento de 4 mm.	56
Figura 42. Secuencia realizada con desplazamiento de 5 mm.	56
Figura 43. Secuencia realizada con desplazamiento de 6 mm.	57
Figura 44. Secuencia realizada con desplazamiento de 7 mm.	58
Figura 45. Secuencia realizada con desplazamiento de 8 mm.	58
Figura 46. Secuencia realizada con desplazamiento de 9 mm.	59
Figura 47. Secuencia realizada con desplazamiento de 10 mm.	60
Figura 48. Diámetro del spot generado con punto focal a 50 mm.	60
Figura 49. Diámetro del spot generado con punto focal a 45 mm.	61
Figura 50. Diámetro generado con punto focal a 40mm.	61
Figura 51. Diámetro generado con punto focal a 35mm.	61
Figura 52. Diámetro generado con punto focal a 30 mm.	62
Figura 53. Diámetro generado con punto focal a 25 mm.	62
Figura 54. Diámetro generado con punto focal a 20 mm.	62
Figura 55. Diámetro generado con punto focal a 15 mm.	63
Figura 56. Diámetro generado con punto focal a 10 mm.	63
Figura 57. Diámetro generado con punto focal a 5 mm.	63
Figura 58. Magnitud en 2 dimensiones de la muestra de pista flexible.	65
Figura 59. Fase en dimensiones de la muestra de pista flexible.	65
Figura 60. Sección del circuito en estudio para la prueba 1.	66
Figura 61. Sección del circuito para la prueba 2.	66
Figura 62. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20 Hz.	67
Figura 63. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.1 Hz.	67
Figura 64. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.2 Hz.	67
Figura 65. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.3 Hz.	68

Figura 66. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.4 Hz.	68
Figura 67. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.5 Hz.	68
Figura 68. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 21 Hz.	69
Figura 69. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 21.5 Hz.	69
Figura 70. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 22 Hz.	69

Índice de Tablas.

Tabla 1. Propiedades del film piezoeléctrico.....	28
Tabla 2. Lista de comandos manejados por el Event Case.....	38
Tabla 3. Características de diseño de la fuente de luz.....	48
Tabla 4. Características térmicas de la muestra.....	64

Índice de ecuaciones.

Ecuación 1. Calor específico.	32
Ecuación 2. Conductividad térmica.....	32
Ecuación 3. Longitud de difusión térmica.....	33
Ecuación 4. Difusividad térmica.	33
Ecuación 5. Efusividad térmica.	33
Ecuación 6. Expresión de frecuencia de muestreo a partir de la Ecuación 3.	64

Introducción.

Actualmente existe una tendencia exponencial en el uso de tecnologías para la fabricación y evaluación de prototipos, desde tecnologías aditivas como las impresoras 3D y tecnologías sustractivas como el maquinado de piezas por sistemas de CNC, es decir la adición y remoción de material por capas.

En una categoría muy especial de prototipado, se puede mencionar una placa de circuito impreso o PCB por sus siglas en inglés, que es un plano bidimensional donde componentes electrónicos están eléctricamente interconectados entre sí por vías o pistas.

Una forma rápida y sencilla de clasificar estos prototipos es según el tipo de sustrato que utilizan y el número de capas que emplean en su constitución. Así, por ejemplo, tenemos sustratos rígidos y sólidos, pistas adheridas en una sola cara del sustrato, en ambas o la existencia de multicapas en la región interna del sustrato.

Para nuestros fines de interés, se tomó como objeto de estudio las placas de circuito impreso de sustrato flexible. En empresas e instituciones dedicadas a la fabricación de este tipo de prototipos, existen laboratorios de servicios analíticos que testean muestras para conocer el espesor del revestimiento, las conexiones de las capas internas e incluso toman fotos y radiografías de los circuitos cuando es necesario.

Pero para la mayor parte de los entusiastas de la electrónica, (entra en esta categoría incluso el mismo Instituto Tecnológico de Orizaba, con su departamento de fabricación de placas de circuito impreso), el realizar este tipo de evaluaciones está fuera de alcance. Las inspecciones visuales en la superficie del circuito permiten determinar si la placa cumple o no con los requerimientos necesarios para soldar los componentes en ella.

Para realizar una inspección visual, los humanos emplean el sentido de la vista para recibir información del objeto en cuestión. En una idea muy general, la luz visible para el ojo humano es un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas en el cual, a cada rango de este conjunto se le asocia un color.

Cuando la luz choca contra un objeto, parte de esta es reflejada, transmitida o absorbida. El sistema de la vista percibe esta luz reflejada a través del ojo humano, lo que finalmente es la información de interés para que el cerebro logre procesar imágenes.

Estas imágenes aportan información cualitativa acerca de la superficie del objeto como el color, forma, textura y superficie. Para cantidades cuantitativas como profundidad y distancia, esto no es posible de realizar con una simple inspección visual.

Problemática.

El aplicar una técnica fototérmica, en especial la fotopiroeléctrica, consiste en la absorción por parte de la muestra de energía luminosa de una fuente de luz controlada y mediante el uso de un sensor piroeléctrico, por debajo o por encima de la misma, detectar variaciones de temperatura.

Una rama de las técnicas fototérmicas, es la Microscopía fotopiroeléctrica, en la cual una imagen de la respuesta térmica puede ser obtenida al realizar un barrido en dos dimensiones del haz de luz generado por la fuente, a lo largo de la superficie de la muestra. La frecuencia de modulación del haz de luz dicta la profundidad de escaneado y al ser la placa PCB un plano bidimensional, cambios puntuales en los parámetros obtenidos por medición coordenada indican discontinuidades de la muestra a distintas profundidades.

Estas discontinuidades se pueden ajustar teóricamente para conocer propiedades tales como ancho, espesor y uniformidad de las vías. Mediciones que son en cuestión difíciles de realizar con aparatos especializados tales como multímetros de alta resolución, vernieres y micrómetros cuando la placa PCB es de diseño complejo o multicapa.

Hipótesis.

Es posible aplicar la técnica de Microscopía fotopiroeléctrica a placas PCB, para el control de calidad de placas PCB del tipo flexible y buscar por condiciones específicas de las vías como ancho, espesor y uniformidad según la profundidad fijada por la frecuencia de escaneo.

Metodología.

Para el desarrollo de la metodología, es conveniente dividir todo el proyecto en cinco áreas generales de trabajo para su mejor discernimiento.

a) Revisión y estudio de la información relacionada a técnicas térmicas, en especial las de Microscopía fotopiroeléctrica.

- b) Diseño y construcción del sistema de posicionamiento en tres dimensiones para realizar los barridos sobre la superficie con el haz de luz generado desde la fuente modulada.
- c) Desarrollo e implementación de la técnica fotopiroeléctrica con el sensor PVDF y el amplificador LOCK IN Stanford Research 830.
- d) Interfaz de comunicación y adquisición de datos provenientes del amplificador LOCK IN Stanford Research 830 mediante protocolo de comunicación GPIB.

La Figura 1, desglosa los cuatro puntos principales mencionados para el desarrollo del proyecto.



Figura 1. Metodología de trabajo propuesta.

Objetivo general.

- Implementar de manera adecuada la técnica de microscopía fotopiroeléctrica en tres dimensiones para determinar la existencia o ausencia de discontinuidades estructurales en las placas PCB.

Objetivos específicos.

- Dominar conceptos de técnicas fototérmicas, en especial la fotopiroeléctrica.
- Caracterizar térmicamente el sensor PVDF como referencia de trabajo.
- Analizar las gráficas e imágenes obtenidas en búsqueda de las características de interés en las placas PCB.

Alcances y limitaciones.

Esta técnica, aunque es únicamente aplicable a muestras realmente pequeñas ofrece ventajas operativas en comparación de otros métodos de análisis, como por ejemplo la posibilidad de emplear la misma muestra para realizar ensayos a distintas profundidades. Por el contrario, otros métodos de análisis emplean un mayor número de muestras por cada ensayo realizado.

Descartando del análisis las características conocidas del sensor utilizado se puede determinar de una manera cualitativa el comportamiento térmico de la muestra. Una vez despejado el comportamiento de la muestra en estudio, la representación gráfica de esta información está sujeta a condiciones de umbral en terminología de procesamiento de imágenes, es decir, variación de colores en la imagen obtenida que indican profundidad y discontinuidades en esa sección de la muestra a una frecuencia conocida de muestreo.

Descripción del documento.

La presente tesis aborda el desarrollo de una técnica de microscopía fotopiroeléctrica empleando el sensor de Difluoruro de Polivinilideno (PVDF).

En el capítulo 1, se describen aspectos concernientes a la justificación de la investigación, haciendo una extensa búsqueda de información para sustentar la validez y originalidad del proyecto, identificando características en común que existen en las diferentes metodologías mencionadas y las posibles aportaciones al estado del arte, alcanzables mediante patentes de software y hardware, así como artículos de interés científico.

El capítulo II trata acerca del fundamento teórico de toda la fenomenología sobre la cual se basa el funcionamiento de los materiales fotopiroeléctricos, las técnicas fotopiroeléctricas más usuales y una descripción a detalle de las características peculiares del sensor PVDF.

En el capítulo III, se describe brevemente el proceso de diseño del mecanismo de posicionamiento en el software de diseño SolidWorks®, su modelo como ensamblaje y la generación del código G en el software BobCAD®, para su fabricación. Se incluye también en esta sección, los cálculos y esquemáticos de la fuente de luz modulada, para la polarización del láser. La parte central de este capítulo, es la descripción sección a sección de la interfaz gráfica generada en LabVIEW®, que coordina tanto los movimientos del mecanismo de posicionamiento y la adquisición de la señal proveniente del amplificador LOCK-IN SR-830.

Finalmente, el capítulo IV muestra la obtención de las características del comportamiento térmico de diferentes muestras en estudio mediante experimentos bien delimitados dentro de la metodología de desarrollo y la conversión de las mediciones obtenidas en imágenes térmicas, mediante un Software especializado.

Capítulo I.

Justificación.

Cuando un haz de luz incide sobre un material, parte de su energía se transforma en calor difundándose por él. Si el haz de luz está modulado periódicamente, se generan en el material ondas térmicas y acústicas que provocan diversos efectos físicos, como se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Efectos físicos del fenómeno fototérmico.

Las técnicas fototérmicas se fundamentan en la detección de las ondas térmicas que se generan en un material, como consecuencia de la absorción de un haz de luz de intensidad variable (modulado o pulsado). Las características que definen la onda térmica (longitud de onda y velocidad de fase) están determinadas por las propiedades térmicas del material. Si éste es homogéneo las ondas térmicas se propagan dentro del material de forma amortiguada, pero sufrirán un proceso de dispersión cuando en su avance se encuentren con inhomogeneidades. En consecuencia, las ondas térmicas llevan información sobre las propiedades ópticas y térmicas del material, así como de su estructura interna.

Al extraer esta información mediante la técnica de Microscopía fotopiroeléctrica se puede averiguar de una forma visual la existencia o no de discontinuidades en la superficie de la muestra y también características internas de la misma.

Estado del Arte.

En la literatura existente sobre las técnicas fotopiroeléctricas, se pueden encontrar temas como la elección de la Configuración ideal y el tipo de sensor a utilizar, según las especificaciones de la muestra, entre los cuales destacan:

Resumen I.

Las técnicas fototérmicas han demostrado ser una herramienta útil para la caracterización óptica y térmica de los más diversos materiales, los cuales van desde semiconductores hasta tejido humano.

La señal generada por el detector, en cada configuración ya sea la Directa o Inversa, se puede obtener tanto en modo voltaje como en modo corriente. En este trabajo se enfocan al modo de voltaje. La caracterización térmica de materiales por medio de la técnica fotopiroeléctrica, con ambas configuraciones, principalmente se enfocó a determinar dos parámetros térmicos, la efusividad (e) y difusividad térmica (α).

Desde el punto de vista metrológico, la sensibilidad de una señal experimental A que está en función del parámetro B debe medir la variación que sufre A cuando se ha variado el parámetro B. Comparando la sensibilidad normalizada de varias técnicas con respecto de un parámetro térmico, se puede elegir el método más adecuado para determinar su valor. En el caso de la técnica fotopiroeléctrica, el conocimiento de la sensibilidad permitirá optimizar parcialmente el experimento, donde la sensibilidad normalizada depende también del régimen de frecuencias y de los parámetros electrónicos del experimento[1].

Los resultados ahí mostrados, demuestran que la técnica fotopiroeléctrica en configuración directa es mejor para el caso en el que se quiera medir la difusividad térmica.

Resumen II.

Las propiedades piezoeléctricas de los materiales se presentan en 20 de las 32 clases cristalinas existentes. De esas 20 clases, once poseen un eje polar definido y solo un sentido de polarización, es decir son materiales piroeléctricos. Existen otros materiales que no entran en esta clasificación, pero presentan propiedades similares y son conocidos como polímeros ferroeléctricos con propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas.

Como combinación entre los materiales cerámicos y amorfos (polímeros, vidrios) resultan los materiales compuestos conocidos como composites. En este trabajo se hace un estudio comparativo de las ventajas e inconvenientes de cada una de estas formas de material en las diferentes aplicaciones de los materiales piezoeléctricos. El enorme desarrollo que han experimentado las aplicaciones de los materiales piezoeléctricos en las nuevas tecnologías destaca gracias al descubrimiento de las propiedades ferroeléctricas en los materiales con estructura tipo perovskita de composiciones basadas en el Titanato de Plomo[2].

Resumen III.

Los materiales piezoeléctricos producen una respuesta de carga eléctrica cuando una fuerza es aplicada o se genera movimiento mecánico al ser sujeta a un campo eléctrico. Este tipo de materiales se han vuelto esenciales para la sociedad moderna, especialmente en los campos de información y comunicaciones, automatización industrial y diagnósticos médicos[3].

Por estas razones, los piezoeléctricos han atraído la atención por sus variadas aplicaciones desde hace varias décadas. Pero de los distintos materiales, existe un nanomaterial piezoeléctrico de una dimensión que se ha vuelto de especial interés por su morfología especial y sus excelentes propiedades, catalogadas según las propiedades térmicas que presentan como la temperatura de Curie. También se describen los procesos de síntesis y caracterización, así como los más recientes progresos en las aplicaciones basadas en este tipo de material.

Utilizando el mismo transductor empleado en el presente trabajo de tesis se encuentra:

Resumen IV.

El sensor de Difluoruro de Polivinilideno (PVDF) es utilizado como material principal para un sensor de vibración piezoeléctrico ya que genera carga eléctrica cuando es sometido a cargas mecánicas. Puede ser adherido a superficies y seguirá generando señales eléctricas en proporción a la elongación de la superficie.

Los sensores PVDF pueden ser usados para detectar frecuencias estacionarias como presión hasta aplicaciones de baja frecuencia como el sensado de respiración y ritmo cardiaco. En las aplicaciones de alta frecuencia, el autor destaca la detección de fisuras y el sensado ultrasónico.[4]

Este tipo de sensores son elementos flexibles que pueden ser adheridos a superficies curvas para detectar daños y debido a su propia flexibilidad y ligereza causan muy baja impedancia mecánica, siendo necesaria solo una pequeña fuerza mecánica para causar deformación. Un uso alternativo al sensado de fuerzas por parte de los sensores PVDF, es la utilización de estos como recolectores de energía y de radiación infrarroja.

En cuanto a las técnicas fototérmicas, en específico la de microscopía fototérmica:

Resumen V.

El aspecto que aquí más destaca, es el enfoque que se le da a la metodología para buscar el parámetro térmico conocido como difusividad térmica. A un microscopio comercial le fue implementado un accesorio para mapear dicho parámetro en la muestra con alta resolución espacial. El sistema, se basa en la técnica de microscopía fototérmica que consiste en la medición con una punta de prueba láser de la curvatura inducida por el calor entregado por una bomba láser. Posteriormente esta perturbación es detectada por un amplificador LOCK-IN, que provee la amplitud y fase de la señal como una función de la modulación de frecuencia. [5]

Destacan también que, el uso de la modulación de láser pulsado para producir ondas térmicas ha evolucionado en técnicas más complejas como aquellas basadas en la emisión infrarroja de la superficie calentada, la técnica del efecto Mirage, la deflexión debida a la deformación de la superficie y la termorreflectancia.

Resumen VI.

Este trabajo trata acerca de otra técnica fototérmica conocida como microscopía de reflectancia y se propone un modelo con una muestra gruesa para describir la señal fototérmica de perturbación introducida por el propio sensor. Validan el modelo basándose en los resultados de la microscopía de reflectancia de las muestras de Fe sintetizados. Se compara además el modelo de resistencia térmica valido únicamente con muestras relativamente delgadas.

En la introducción, relatan la existencia de diversos trabajos que describen la influencia en los procesos de difusión del calor están relacionados con pruebas de calidad no destructivas y la caracterización de propiedades locales de materiales policristalinos[6]. En el primer caso la detección de los defectos como grietas internas usando técnicas fototérmicas es el caso de estudio. En la caracterización de materiales, la atención se centra en el papel que la muestra juega con la difusión de calor, es decir cuantificar de la señal de perturbación en forma, magnitud y fase, características que también se buscan en la técnica de microscopía fototérmica. El origen de estas diferencias reside en la propia naturaleza de la muestra.

Resumen VII.

La técnica de microscopía fototérmica es empleada para la detección de objetos nanometrizados basados en como absorben calor. La extrema sensibilidad del método y la estabilidad de las señales plantea diversas aplicaciones en el campo de la espectroscopia, química analítica y bioimagenología, descritas en [7].

Con el arreglo experimental que se describe se realizan 3 aplicaciones prácticas, pero destaca el seguimiento de una partícula en células vivas para aplicaciones en la imagenología biológica.

Resumen VIII.

Como idea principal, se asume que la perturbación periódica de la temperatura causada por la absorción de la luz modulada en intensidad puede ser recibida por el sensor del microscopio termal utilizado en el arreglo experimental. Para analizar el campo de temperatura en la muestra iluminada por una luz incidente oblicua, se desarrolló un modelo numérico de análisis de elemento finito. Demostrándose así que las mediciones obtenidas pueden proveer información acerca de las propiedades térmicas de la muestra, aunque la resolución espacial de las mediciones sea considerablemente baja.

El rápido desarrollo de micro y nano estructuras aplicables en electrónicos y microsistemas ópticos se ve reflejado en un incremento en el interés por los métodos y técnicas que posibiliten la medición de propiedades térmicas a escalas sub y micro. Entre otras técnicas, la microscopía por escaneo térmico provee alta resolución espacial y sensibilidad a la temperatura permitiendo mediciones bien localizadas de las micro y nano estructuras.

Mencionan dos formas de operación [8], el modo pasivo y el modo activo. En el primero, la punta de prueba térmica es usada para medir la temperatura en la superficie de la muestra, aunque se necesita una forma independiente para calentar/enfriar la muestra. En el modo activo, la punta de prueba térmica actúa como calentador y la distribución espacial de la conductividad térmica puede ser medida en la superficie de la muestra.

Asimismo, se demuestra mediante un análisis, la posibilidad de utilizar el efecto fototérmico para mediciones cuantitativas locales y dependientes del tiempo empleando la misma técnica, aunque con la variante de colocar otra fuente de luz externa. Cuando la muestra es iluminada por el haz de luz modulada aparecen ondas térmicas que desestabilizan el campo de

temperatura como resultado de la absorción de parte del flujo de energía incidente en la muestra y sus alrededores.

Resumen IX.

La microscopía de partícula única permite la detección selectiva de nano- objetos absorbentes basados en su liberación o absorción y en la respuesta termorefractiva del ambiente del objeto. Este trabajo destaca porque permite la identificación de absorbentes, incluso en la presencia de dispersiones, extendiendo el campo de imagen al dominio de las especies de no fluorescentes, pero absorbentes.

Además, mencionan la existencia de diversas variantes de la microscopía fototérmica incluyendo la interferencia por contraste, la detección heterodina en reflexión y transmisión y la detección por deflexión. Todas estas emplean un enfoque de sonda de bombeo. Por lo tanto, requieren el uso de dos láseres separados a diferentes longitudes de onda. Esta diferencia de longitudes hace que el método tienda a aberraciones cromáticas [9] estrechándose en las regiones espectrales. Ambos láseres deben estar superpuestos de manera muy controlada, lo que complica la configuración de la microscopía. La propuesta desarrollada es un esquema de un solo láser para la detección de los absorbentes, aplicada a la detección de nano partículas de oro en un arreglo matricial de polímeros. El uso del láser para la excitación y detección, realmente simplifica el alineamiento y asegura la estabilidad del sistema. Tanto los procesos como los resultados del experimento son comparados con aquellos de la microscopía fototérmica convencional.

Resumen X.

Además de emplear sondas de prueba para técnicas fototérmicas IR y espectroscopía, combinan un láser ajustable con medición de expansión termal, distribuido por una filial comercial de ese mismo instituto de investigación. Sin embargo, esta opción de sondeo remueve la posibilidad de obtener información de profundidad debido a que el campo de mejora está localizado únicamente alrededor de la punta en la superficie[10].

Cuando el método de detección es expansión termal, el tiempo de vuelo de la onda de presión generada por la absorción puede ser usado para obtener información de profundidad proporcionando datos preliminares. Se describe también la plataforma “ideal” para este tipo de muestreos, cuyas características son: La habilidad para alcanzar una alta resolución espacial, la mínima preparación de la muestra y de proveer información de profundidad.

Ahora, en cuanto al instrumento de medición que se va a utilizar en el desarrollo de esta tesis, el amplificador LOCK-IN Stanford Research 830 destaca un trabajo que relata cómo es empleado en una técnica de termografía.

Resumen XI.

La termografía permite una detección rápida y confiable en componentes. Las ondas térmicas son usadas como sondas para revelar inhomogeneidades locales, así como también fallas en capas internas del material examinado.

En [11] resalta, que hay limitaciones básicas concernientes a la detección de defectos ocultos en materiales gruesos con ondas térmicas: la profundidad de penetración y por la tanto el rango de profundidad de las ondas térmicas está limitado y depende de la longitud de difusión térmica, propia del material.

Este conjunto de limitaciones puede ser tornados en una ventaja si varias ondas termales con diferentes longitudes de onda son usadas, pudiéndose así alcanzar la resolución deseada en un componente. La técnica de termografía LOCK-IN usando excitación senoidal de monofrecuencia es comparada contra aquella donde la excitación es transitoria y combinada con evaluación de fase.

Estado del campo.

A partir del trabajo aquí presentado fue posible obtener un modelo de utilidad, considerando que, a elementos de software y hardware ajenos entre sí, se les encontró un nuevo punto de enfoque en cuanto a configuración, estructura y constitución que resultó en una ventaja prácticamente apreciable para la implementación de la técnica de microscopía fototérmica.

En específico, para la construcción del sistema de posicionamiento en tres dimensiones se empleó una configuración de ejes perpendiculares, propia de los sistemas de manufactura de componentes, tanto de adición como de sustracción de material.

El software empleado, involucra el control de los motores a pasos del sistema de posicionamiento físico, mediante la tarjeta Arduino Uno y el Shield para los drivers Pololu que en conjunto con el software GRBL, sirven para establecer el estándar de comunicación para el control numérico por computadora, que destaca porque en su totalidad es de libre acceso (open source) para desarrolladores y colaboradores.

Siendo la aplicación gráfica la parte medular de este trabajo, esta fue desarrollada en el ambiente de programación LabVIEW para la coordinación de las tareas de posicionamiento, medición y registro de las mediciones sobre la muestra en el ensayo. El modelo de utilidad, mencionado en la sección de Anexos al final de este trabajo, cumple cabalmente los requisitos de novedad, actividad inventiva y la posibilidad de aplicaciones múltiples tanto industriales y con fines de investigación.

Capítulo II.

Existen dos conceptos primordiales a partir de los cuales se puede partir para comprender la singularidad de la técnica de microscopía fotopiroeléctrica, como son la luz y sus efectos sobre las propiedades de los materiales.

2.1 Luz.

La luz es un fenómeno de propagación de ondas electromagnéticas en el vacío, las cuales se propagan a una velocidad aproximada de 300000 km/s. Las ondas electromagnéticas se clasifican según su frecuencia destacando que la energía transportada por las ondas es proporcional a su frecuencia, de modo que cuanto mayor es la frecuencia de la onda, mayor es su energía, observable en la Figura 3.

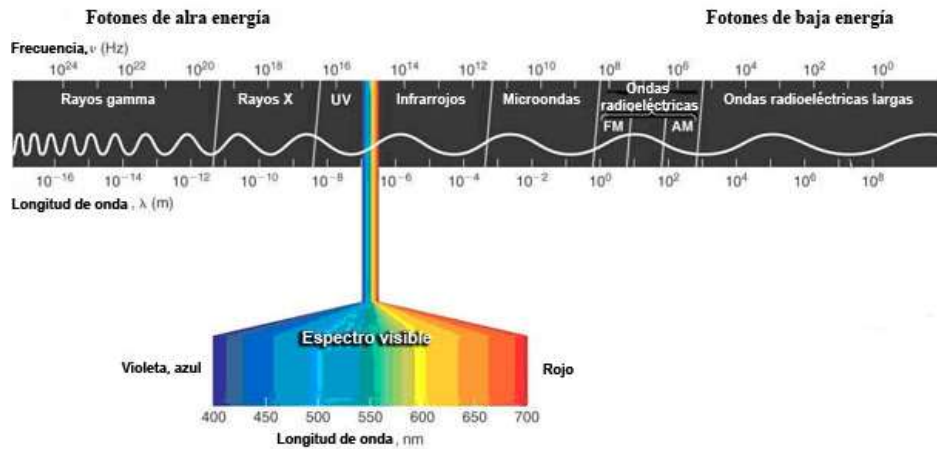


Figura 3. Espectro electromagnético.

Del espectro electromagnético, solo una pequeña porción es luz visible. Ubicándose entre la región de rayos Ultravioleta y Rayos infrarrojos el espectro de luz visible abarca las longitudes de onda desde 400 a 700 nanómetros. La luz roja queda determinada en esa escala, con una longitud de onda entre 650 y 700 nanómetros aproximadamente.

2.1.2 Luz láser.

El dispositivo optoelectrónico que provee de este tipo de luz roja es el láser. La palabra láser es un acrónimo de las palabras inglesas: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, es decir, amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación. La

radiación láser posee todas las propiedades de la luz; sin embargo, se caracteriza por ser: monocromática, coherente y direccional. La principal utilidad práctica de la radiación láser reside en que concentra un gran número de fotones por unidad de superficie.

2.2 Efecto fototérmico.

Cuando un material es iluminado por un haz de luz modulado en frecuencia, se presentan variaciones periódicas de temperatura a las cuales se les denomina ondas térmicas.

El fenómeno fototérmico es la generación de ondas térmicas por medio de un proceso de foto-inducción, dicho de otra forma, la absorción de luz y conversión de esta en energía calorífica. Al incidir los fotones en un cuerpo receptor que tiene la capacidad de absorción, se produce una excitación de los electrones que lo componen. El decaimiento del electrón excitado a su estado normal se produce liberando la energía absorbida generando vibraciones en toda la estructura del material, de este modo, el fotón absorbido es utilizado para aumentar la temperatura del cuerpo a través de las vibraciones de los átomos que lo componen.

2.2.1 Formas de transmisión de energía calorífica.

Existen varias formas en que la energía calorífica se propaga o se transmite entre cuerpos, o partes de un cuerpo los cuales tienen diferente temperatura, en donde el cuerpo con mayor cantidad de energía cederá parte de esta a otro cuerpo, hasta quedar en un equilibrio térmico. Debido a que una de las partes más importantes de este proyecto es la estimulación de la muestra con un haz de luz conocido para cambiar el gradiente de temperatura, es necesario saber cómo el calor se propaga a través del material[12].

2.2.1.1 Radiación.

La transmisión de energía térmica por radiación se lleva a cabo por medio de ondas electromagnéticas, que no requieren necesariamente un medio para transmitirse, en esta forma de transferencia de energía térmica, la fuente de calor emite dichas ondas y estas se propagan a través de un medio o el vacío hasta ser absorbidas por un cuerpo, este al recibir las comenzara a reacomodar sus electrones que son los involucrados en la transferencia de energía y terminara por elevar su temperatura al absorber las ondas de radiación electromagnética, como es el caso de la luz solar, el horno de microondas , etc.

2.2.1.2 Convección.

La convección es el fenómeno de transferencia de calor por medio del movimiento de la materia a causa del calor, donde la materia con mayor cantidad de energía térmica se desplaza, alejándose de la fuente del calor, un claro ejemplo de esto es la evaporación del agua, donde la materia absorbe calor hasta alcanzar el punto de ebullición y al evaporarse, eleva consigo el calor, alejándose así de la fuente que

2.2.1.3 Conducción.

Es el proceso de transferencia de calor por medio del contacto físico (no por movimiento propio de materia), entre dos o más cuerpos a diferentes temperaturas o las partes de un cuerpo que se encuentran a diferentes temperaturas, en la que el cuerpo o parte con mayor cantidad de energía interna le cederá parte de esa energía a los otros cuerpos o a las otras partes con las que se encuentra en contacto hasta que todas alcancen la misma temperatura, lo que se conoce como equilibrio térmico.

2.3 Materiales transductores.

Los materiales transductores convierten una forma de energía en otra y son ampliamente utilizados en aplicaciones de sensado, como la aquí requerida de medir la gradiente de temperatura de dos cuerpos en contacto, cambio generado entre el sensor de Difluoruro de Polivinilideno (PVDF) y la muestra excitada con el haz láser.

2.3.1.1 Ferroelectricidad.

La Ferroelectricidad es la capacidad de ciertos materiales en arreglos cristalinos para retener información en su estructura, sin necesidad de estar conectados a una fuente de energía. La información se almacena gracias a la polarización eléctrica que posee, activada externamente por un voltaje y aún en ausencia de este voltaje la polarización persiste.

Los materiales ferroeléctricos poseen dos estados bases termodinámicamente equivalentes, con una polarización iónica opuesta que puede ser cambiada de un estado al otro por medio de un campo eléctrico externo. La ferroelectricidad de un material depende de la estructura cristalina y de la temperatura.

Se encuentra ferroelectricidad en un sinnúmero de materiales naturales y sintéticos, en los que además se presentan otros fenómenos como la piezoelectricidad y la piroelectricidad.

2.3.1.2 Piezoelectricidad.

La piezoelectricidad, fue descubierta por los hermanos Curie hace más de un siglo, encontrando que el cuarzo cambiaba sus dimensiones cuando era sujeto a un campo eléctrico y viceversa, cuando era mecánicamente deformado generaba carga eléctrica. Además de los materiales cristalinos, algunas cerámicas se comportan como piezoeléctricos cuando son sujetas a un alto voltaje de polarización, un proceso análogo a la magnetización de un material ferroso.

Otros materiales inusuales que presentan piezoelectricidad son el hueso de ballena y tendón, utilizados en la década de los 60 y que desencadenaron la búsqueda de otros materiales tanto orgánicos como sintéticos que exhibieran piezoelectricidad.

2.3.1.3 Piroelectricidad.

Es un proceso análogo a la piezoelectricidad. Aunque este difiere en que al cambiar la temperatura de un arreglo cristalino éste genera una diferencia de potencial e inversamente si se le aplica un potencial en alguna de sus caras se genera un cambio de temperatura. También los hermanos Curie estudiaron este efecto, aunque no se dio una explicación precisa hasta tiempo después.

Ambos procesos están relacionados, por ejemplo, todos los materiales piroeléctricos son además piezoeléctricos, y para que se genere un voltaje o se dé el inverso, ha de cambiar su polarización. Al cambiar la temperatura o dimensiones de un arreglo cristalino, se cambia la posición relativa entre los átomos de cada molécula y esto deriva en un cambio del momento dieléctrico, y en un cambio de la polarización.

2.3.2 Características del sensor de Difluoruro de Polivinilideno (PVDF).

Como algunos otros materiales ferroeléctricos, el PVDF es también piroeléctrico, produciendo carga eléctrica en respuesta a un cambio en la temperatura. Absorbe especialmente bien la energía infrarroja cuando la oscila con una longitud de onda entre los 7 y 20 μm , véase la Figura 4.

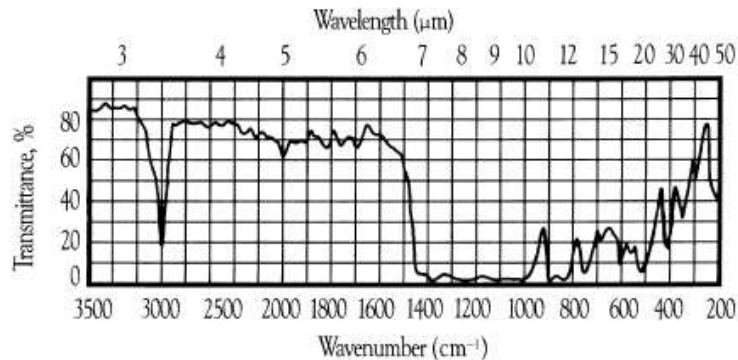


Figura 4. Espectro de la típica absorción infrarroja del film PVDF.

2.3.2.1 Propiedades del film piezoeléctrico.

El film piezoeléctrico es flexible, ligero y disponible en una amplia gama de espesores y dimensiones. Sus propiedades como transductor incluyen:

- Amplio rango de frecuencias: 0.001 Hz a varios Giga Hz.
- Baja impedancia acústica. (Casi coincide con la del agua, tejido humano y sistemas adhesivos)
- Voltaje alto de salida hasta 10 veces más alto comparado con las cerámicas para una misma fuerza de entrada.
- Alto coeficiente dieléctrico. Soportando fuertes campos eléctricos ($75\text{V}/\mu\text{m}$).
- Alta dureza mecánica y resistencia al impacto. ($10^9 - 10^{10}$ del módulo de Pascal).
- Alta estabilidad- resistencia a la humedad ($<0.02\%$ de absorción de humedad).

Para ciertas aplicaciones existen limitaciones importantes a considerar:

- Es un débil transmisor mecánico particularmente en la resonancia y en aplicaciones a muy bajas frecuencias comparado con las cerámicas.
- No es recomendable para operar a temperaturas superiores a los 100°C .

La Tabla 1 enlista las propiedades del film piezoeléctrico.

Tabla 1. Propiedades del film piezoeléctrico.

Símbolo	Parámetro	PVDF.	Copolímero.	Unidades.
t	Espesor	9,28,52,110	<1 a 1200	μm (10^{-6})
d_{31}	Constante de piezo tensión	23	11	$10^{-12} \frac{\text{m}/\text{m}}{\text{V}/\text{m}} \text{ ó } \frac{\text{C}/\text{m}^2}{\text{N}/\text{m}^2}$
d_{33}		-33	-38	
g_{31}	Constante de piezo esfuerzo	216	162	$10^{-3} \frac{\text{V}/\text{m}}{\text{N}/\text{m}^2} \text{ ó } \frac{\text{m}/\text{m}}{\text{C}/\text{m}^2}$
g_{33}		-330	-542	
k_{31}	Factor de acoplamiento electromecánico	12%	20%	
k_t		14%	25-29%	
C	Capacitancia	380 para 28 μm	68 para 100 μm	$\frac{\text{pF}}{\text{cm}^2} @ 1\text{KHz}$
Y	Módulo de Young	2-4	3-5	$10^9 \text{N}/\text{m}^2$
V_0	Velocidad del sonido	Esfuerzo Espesor 1.5 2.2	2.3 2.4	$10^3 \text{m}/\text{s}$
ρ	Coefficiente piroeléctrico	30	40	
ϵ	Permitividad	106-113	65-75	$10^{-12} \text{F}/\text{m}$
ϵ/ϵ_0	Permitividad relativa	12-13	7-8	
ρ_m	Densidad de masa	1.78	1.82	$10^3 \text{kg}/\text{m}$
ρ_e	Resistividad volumétrica	$>10^{13}$	$>10^{14}$	Ohm
R		<3.0	<3.0	Ohms/cuadrados para NiAl

R	Resistividad superficial metalizada	0.1	0.1	Ohms/cuadrados para tinta de Ag
$\tan \delta_0$	Tangente de pérdida	0.02	0.015	@ 1KHz
	Límite de elasticidad	45-55	20-30	$10^6 N/m^2$ (Eje de estiramiento)
	Rango de temperatura	-40 a 80...100	-40 a 115...145	$^{\circ}C$
	Absorción de agua	<0.02	<0.02	$\%H_2O$
	Máximo voltaje de operación	750(30)	750(30)	$V/mil(V/\mu m)$, DC, @25 $^{\circ}C$
	Voltaje de ruptura	2000(80)	2000(80)	$V/mil(V/\mu m)$, DC, @25 $^{\circ}C$

2.4 Técnicas fototérmicas.

A través del uso de sensores como el PVDF, se han desarrollado diferentes técnicas capaces de detectar estas repercusiones físicas debidas a las ondas térmicas en el material. Se profundizará en lo posible en la técnica fotopiroeléctrica por ser la elegida a utilizar y también se mencionarán aspectos de otras igual de populares:

2.4.1 Técnica fotopiroeléctrica.

Por medio de un transductor piroeléctrico se detectan las variaciones de la temperatura de la muestra esto es debido a que el sensor piroeléctrico experimenta cambios en su polarización espontánea en respuesta a variaciones de temperatura, lo que se traduce en una señal de voltaje.

2.4.1.1 Configuración Directa.

La radiación electromagnética producida por el efecto fototérmico, incide directamente sobre la muestra, para determinar el parámetro térmico de la difusividad térmica (α). Como se aprecia en la Figura 5.



Figura 5. Configuración directa en la técnica fotopiroeléctrica.

2.4.1.1 Configuración inversa.

Cuando el haz incide directamente sobre el sensor se denomina configuración inversa en la Figura 6 y se puede utilizar para determinar la efusividad térmica (e).



Figura 6. Configuración inversa en la técnica fotopiroeléctrica.

Otras técnicas que destacan son [13]:

- La radiometría infrarroja, en la que con un detector de infrarrojos se miden las variaciones de la emisividad infrarroja de la muestra.
- La fotodeformación, con la que se mide la desviación periódica sufrida por un haz de luz que se refleja en la superficie del material como consecuencia de las deformaciones que surgen por efecto de la dilatación.
- La fotoacústica, en la que un micrófono o un transductor piezoeléctrico detectan respectivamente las variaciones en la presión del gas que rodea la muestra o la onda acústica que se propaga por el sólido.
- La termorreflectancia, con la que se miden las variaciones de intensidad de un haz de láser que se refleja en la superficie de la muestra debido a la variación del coeficiente de reflexión.
- La técnica *mirage*, que detecta la desviación periódica de un haz de láser como consecuencia de la variación del índice de refracción de la muestra o del gas que la rodea.

2.5 Técnica de microscopía fotopiroeléctrica.

En ambas variantes, la de la configuración directa o inversa, si se hace un barrido de la superficie de la muestra o del sensor y para cada punto de incidencia de luz se monitorea la señal fotopiroeléctrica, se puede hacer un registro de la amplitud y la fase de la señal en función de la posición del haz incidente durante el barrido.

Este registro, puede ser interpretado como una imagen que dependerá de la distribución de las propiedades térmicas del material a través de su espesor y en el caso de la configuración de detección directa también de sus propiedades ópticas.

La existencia de defectos, impurezas, huecos, delaminaciones entre otras puede reflejarse en cambios en estas propiedades. La ventaja de esta técnica en comparación de otros métodos de análisis es que es una manera no invasiva de ver al interior del material sin necesidad de remover capas[14].

2.5.1 Resolución en microscopía Fotopiroeléctrica.

La resolución obtenible en la imagen con ondas térmicas está determinada por su longitud de onda. Por otra parte, la longitud de penetración óptica viene dada por el inverso del coeficiente de absorción óptico del material a la longitud de onda de la radiación usada para la excitación de ondas térmicas. Tanto la longitud de onda como la de penetración son fijadas previamente para facilitar la correcta interpretación de los datos experimentales.

Si la muestra es ópticamente opaca se fija la penetración en micras y además se utiliza un objetivo de microscopio para enfocar el haz de luz incidente hasta obtener un diámetro también del haz del orden de micras. Esto para garantizar que el diámetro del haz incidente y la distancia entre los puntos de incidencia de la luz sean mucho mayores que la longitud de difusión térmica para evitar que las ondas térmicas se superpongan.

2.6 Propiedades térmicas de interés.

2.6.1 Calor específico.

El calor específico es la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa para elevar la temperatura un grado Celsius. La relación entre calor y cambio de temperatura, se expresa normalmente en la Ecuación 1 que se muestra abajo:

$$Q = cm\Delta T$$

Ecuación 1. Calor específico.

Donde el calor se puede definir como la energía de tránsito desde un objeto con alta temperatura a un objeto con menor temperatura.

2.6.2 Conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad dependiente del medio, que relaciona la velocidad de pérdida de calor por unidad de área, con la velocidad de cambio de la temperatura. La tasa de transferencia de calor depende del gradiente de temperatura y la conductividad térmica del material queda expresada en la Ecuación 2.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 2. Conductividad térmica.

2.6.3 Densidad.

La densidad de un objeto es una relación que representa cuántos gramos o kilogramos hay por unidad de volumen. Aún en sus diferentes estados de fase ya sea líquido, sólido o gaseoso es posible indicar dicha concentración en los materiales.

2.6.4 Longitud de difusión térmica.

El parámetro es definido como la distancia que la onda térmica viaja dentro de la muestra, en materiales homogéneos antes de que la variación de temperatura decaiga 63%. La Ecuación 3 define este parámetro:

$$\mu = \sqrt{\alpha/2\pi f}$$

Ecuación 3. Longitud de difusión térmica.

2.6.6 Difusividad térmica.

Es el cociente entre la conductividad térmica y el producto de la densidad y el calor específico: Cuanto más alta sea la difusividad térmica de un material, más rápida es su capacidad de calentamiento. La Ecuación 4 representa lo anterior.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * C_e}$$

Ecuación 4. Difusividad térmica.

2.6.7 Efusividad térmica.

Es la raíz cuadrada del producto de la densidad, del calor específico y de la conductividad térmica: Cuanto más alta sea la efusividad térmica de un material, más rápida es su capacidad de acumulación de calor. La Ecuación 5 define lo anterior.

$$e = \sqrt{\rho * C_e * \lambda}$$

Ecuación 5. Efusividad térmica.

Estos son algunos de los conceptos básicos que sientan las bases de la interacción entre la materia y energía luminosa, que permiten una mejor comprensión acerca de los fenómenos fototérmicos que ocurren durante el proceso de fotoinducción. Teniendo en consideración la existencia del efecto fototérmico como fenómeno de estudio, en el capítulo siguiente todo el desarrollo generado para la creación de la interfaz gráfica en LabVIEW se centra en la medición y registro de este fenómeno por medio de software.

Capítulo III.

Desarrollo teórico.

3.1 Interfaz gráfica LabVIEW.

LabVIEW es una potente herramienta de la empresa National Instruments, para desarrollar aplicaciones gráficas de propósito general en forma de diagramas de bloque, donde el flujo de datos es el paradigma de programación que predomina. Esta herramienta es ampliamente aceptada tanto en el ámbito educativo como el industrial, principalmente por sus capacidades de modificación de parámetros de un proceso antes y durante el tiempo de ejecución del programa.

Existen dos tareas principales que la interfaz se encarga de realizar. Por una parte, genera las coordenadas para que el mecanismo se posicione y secuencialmente, cuando se alcanza dicha posición iniciar la medición en el punto indicado. La Figura 7, muestra el menú inicial del panel frontal cuyas pestañas corresponden a la configuración de los instrumentos de medición, las dimensiones de la muestra, ajuste de posición de inicio, el estatus de la operación y una sección adicional de código G.

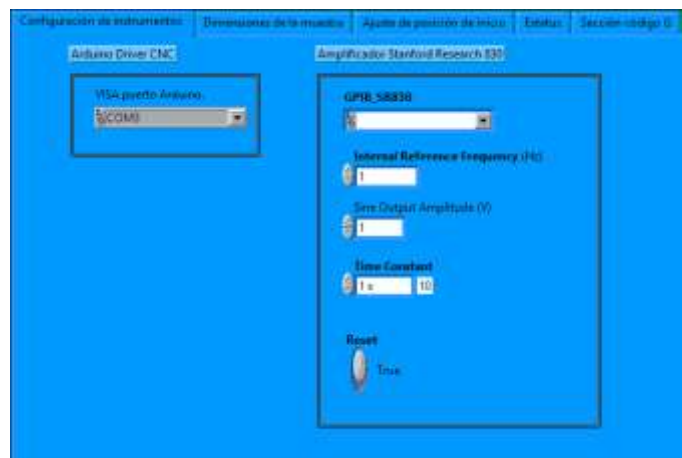


Figura 7. Menú inicio de la interfaz gráfica LabVIEW.

En la pestaña “Configuración de instrumentos”, se configuran las conexiones disponibles tanto para el Arduino Uno, cargado con el firmware GRBL para el control mediante CNC de motores a pasos y la comunicación mediante protocolo GPIB del amplificador LOCK-IN Stanford Research 830.

En la Figura 7, los parámetros que se modifican en cada medición para el uso del instrumento SR-830 son:

- *Internal Reference Frequency*: Dicta la profundidad de muestreo en la muestra.
- *Time Constant*: Configura el filtro pasabajas del instrumento.
- *Sine Output Amplitude (I V)*: Es un parámetro de la señal de referencia que excita la fuente de luz modulada.

La Figura 8, correspondiente a la pestaña “Dimensiones de la muestra”, permite al usuario indicar las unidades del sistema de referencia a utilizar tanto para el mecanismo y la muestra, así como también ancho y largo respectivamente. La resolución de avance dictamina la distancia que, iteración a iteración cada medición mantendrá entre si sobre la superficie de la muestra, desde unidad a unidad hasta décima de unidad a décima de unidad.



Figura 8. Pestaña “Dimensiones de la muestra”.

Para el archivo de Excel, se puede indicar el nombre del experimento a realizar y su ubicación de guardado, ya sea la misma en la que se encuentra el Virtual Instrument de la aplicación o en una diferente, con la desventaja de tener que crear antes el archivo en blanco y guardarlo en esa ubicación.

Una característica común de cualquier interfaz de control CNC, es la posibilidad de fijar una posición inicial para completar las pruebas o trabajos que le competan, por ejemplo, maquinados, fresados o barridos sobre la superficie de la muestra. En la pestaña “Ajuste de posición de inicio” de la Figura 9, existen 2 botones por eje que corresponden a desplazamientos positivos y negativos sobre el eje con el avance seleccionado.

Una vez posicionado el sistema, con el botón “Set Zero” se ajusta la nueva ubicación de inicio para los tres ejes coordinados. En la caja de texto “Comando”, se pueden indicar otras líneas de código para el control CNC, que no son de uso muy frecuente y de acciones

específicas, como deshabilitar los motores y checar los estados de los switches de límite de los ejes.



Figura 9. Pestaña "Ajuste de posición de inicio".

La pestaña “Estatus”, que corresponde a la Figura 10, muestra algunos datos de interés antes y durante el proceso de medición, como son el número de mediciones por hacer, las mediciones hechas, la posición coordinada del haz de luz sobre la muestra. Además, los cuatro indicadores son los valores promedio de cada parámetro promediado, para posteriormente ser almacenados en el archivo Excel. Los botones “Iniciar” y “STOP” controlan el inicio y la finalización abrupta del proceso.



Figura 10. Pestaña "Estatus".

Para la descripción del diagrama a bloques, debido a su extensión total, cada Figura mostrada en adelante corresponde a las secciones principales de la misma. Iniciando en la parte superior izquierda del diagrama, la Figura 11 muestra los Virtual Instruments (VI's en

adelante), que establecen la comunicación serial de la interfaz gráfica con el Microcontrolador Arduino.

El VI *VISA Configure Serial Port*, inicializa el puerto serial especificado por el control en la terminal *VISA resource name* con las configuraciones iniciales especificadas como *Baud rate* a 9600. El VI *Discard Events*, descarta todas las ocurrencias pendientes en el tipo de evento especificado por el cable *VISA resource name* conectado al previo VI. Antes de entrar al ciclo *while loop*, el VI *VISA enable event* habilita las notificaciones en un tipo de evento especificado, en este caso un carácter serial.

El *property node*, lee las propiedades indicadas con una referencia, en este caso “Bytes at port” retorna el número de bytes que están en ese momento disponibles en el puerto serial usado en esa sesión. El VI *serial Read*, lee este número específico de bytes y los retorna en el indicador “Recibido”. Esta sección del código es una simple notificación de recepción de los caracteres en el puerto serial.

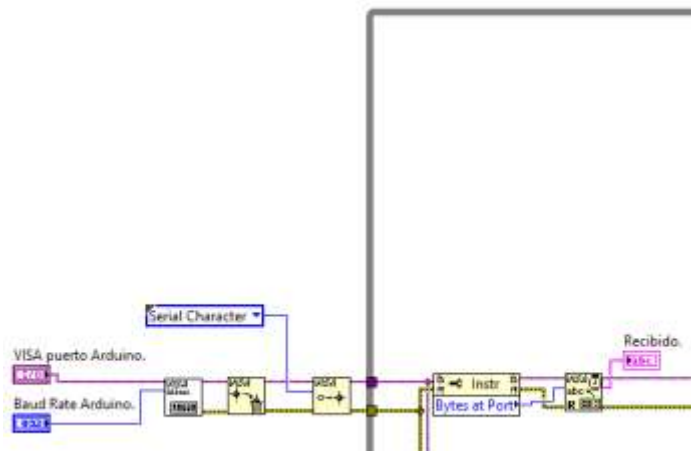


Figura 11. Configuración puerto serial para el Microcontrolador Arduino Uno.

En la parte central superior del diagrama a bloques, existe un “event case” que maneja los cambios de valor de cada botón existente en el panel frontal. La Figura 12, muestra el evento “Zero Button” que, además de establecer las coordenadas para la posición de inicio del dispositivo, carga la configuración de las unidades en las que se moverá el dispositivo, milímetros o pulgadas.

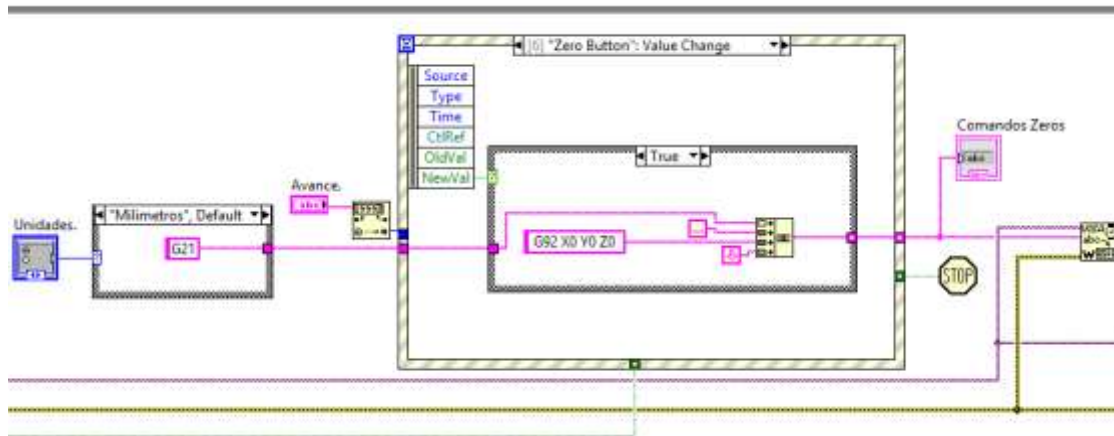


Figura 12. Evento "Zero Button" Value change.

A continuación, en la Tabla 2 se muestran las líneas de código que son enviadas a través del puerto serial al Arduino Uno. El valor de avance que será enviado para cada eje, es obtenido del “String indicator” identificado como Avance, por default el valor es una unidad, aunque se puede modificar a cualquier valor deseado.

Tabla 2. Lista de comandos manejados por el Event Case.

Evento.	Comando en Código g.	Figura.	Descripción.
Up Button value change.	G91 Y-1	13) A	Mueve el eje Y 1 unidad en sentido negativo.
Down Button value change	G91 Y1	13) B	Mueve el eje Y 1 unidad en sentido positivo.
Previous Button value change.	G91 X-1	14) A	Mueve el eje X 1 unidad en sentido negativo.
Next Button value change.	G91 X1	14) B	Mueve el eje X 1 unidad en sentido positivo.
Top Button value change.	G91 Z1	15) A	Mueve el eje Z 1 unidad en sentido positivo.
Top Button value change.	G91 Z-1	15) B	Mueve el eje Z 1 unidad en sentido negativo.
Home Button value change.	G90 G0 X0 Y0 Z0	16) A	Establece las coordenadas de inicio del dispositivo.
Enviar comando value change.	-----	16) B	Permite escribir directamente al puerto serial el comando deseado.

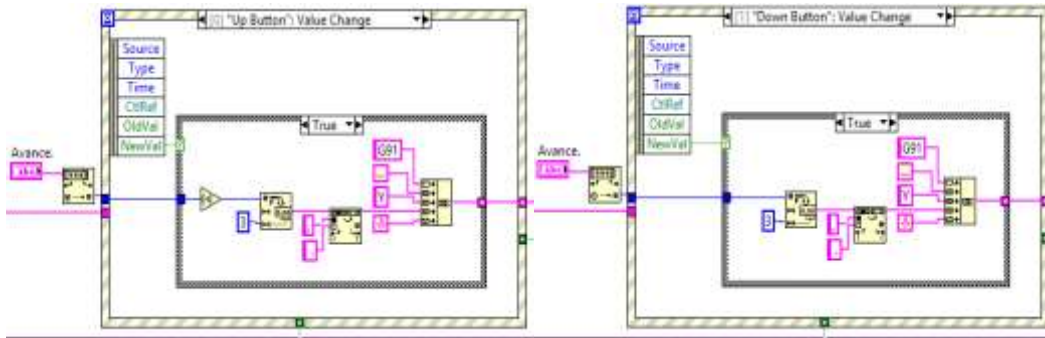


Figura 13. A) Up Button value change. B) Down Button value change.

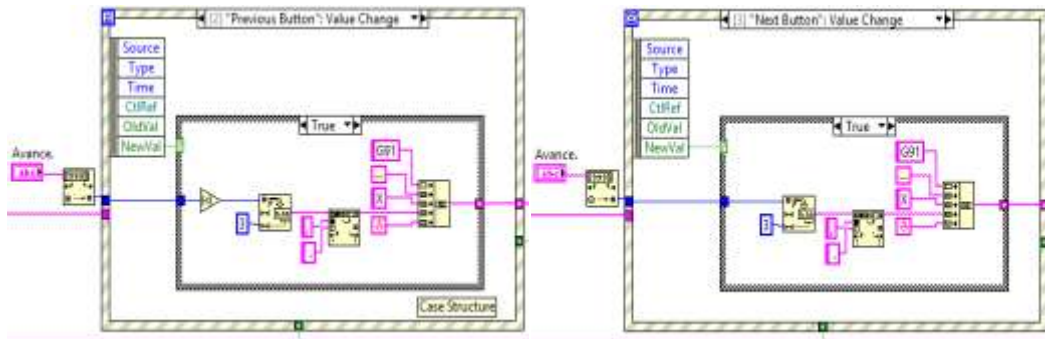


Figura 14. A) Previous Button value change. B) Next Button value change.

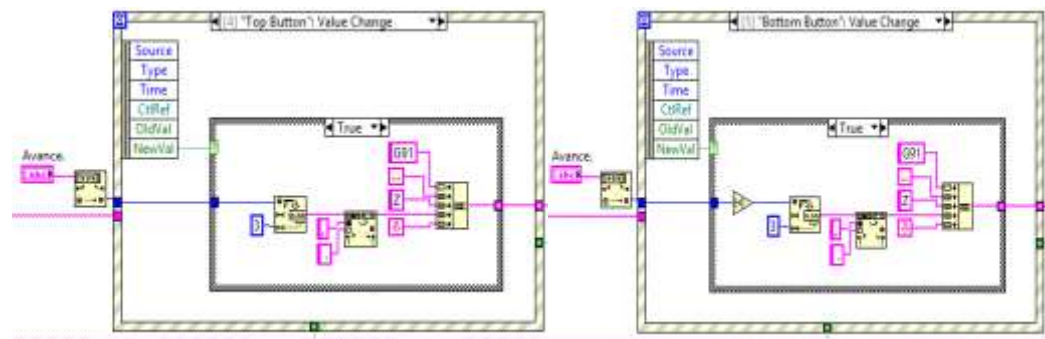


Figura 15. A) Top Button value change. B) Bottom Button value change.

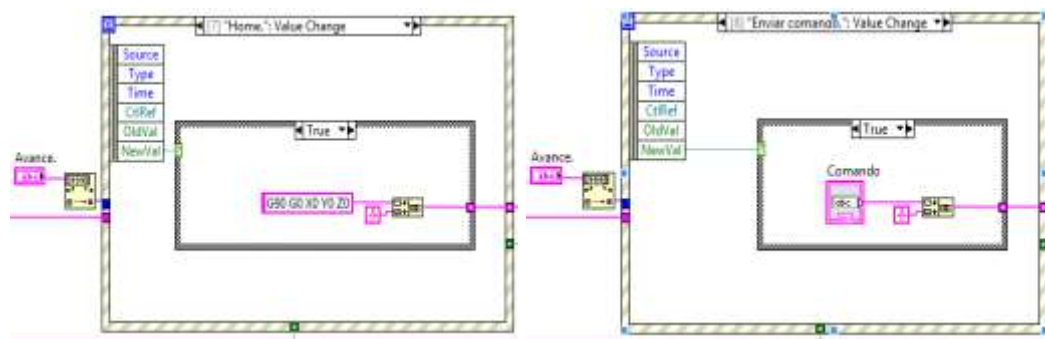


Figura 16. A) Home value change. B) Enviar comando value change.

3.1.1 Generación de las coordenadas de movimiento.

Una parte fundamental del diagrama a bloques de la aplicación trata acerca de la generación de las coordenadas de movimiento, a partir de las dimensiones de la muestra. Cuando el evento “Iniciar” se dispara, primero se convierten los valores de las cadenas de datos identificadas como Ancho (Eje X), Resolución y Largo (Eje Y) en valores numéricos y así poder utilizarlos.

La idea expresada en la Figura 17 es simple, generar el número de iteraciones necesarias para los ejes X y Y, con los que se pueda realizar el barrido en zigzag sobre la superficie de la muestra. La justificación matemática de este arreglo, es la creación de una matriz de elementos indexados, en la cual los índices de cada elemento indiquen las coordenadas en las que se posiciona el láser sobre la muestra.

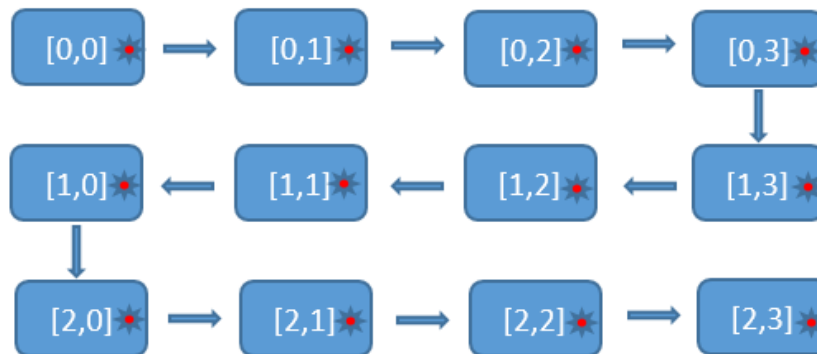


Figura 17. Movimiento zigzag sobre la muestra.

Una de las maneras más comunes de crear arreglos matriciales en LabVIEW y en cualquier ambiente de programación, es la de anidar dos ciclos For o, dicho de otra manera, colocar un ciclo dentro de otro para poder generar los elementos con sus índices en cada casilla. El número de iteraciones para cada ciclo se calcula sumando al ancho y largo de la muestra el valor de la resolución de avance y posteriormente dividiendo dicho valor entre la misma resolución de avance, lo que permite asegurar que la medición se iniciará en el valor [0,0] de la muestra. Al multiplicar dichos coeficientes de las iteraciones para ambos ciclos, se puede calcular cuantas mediciones se realizarán con el instrumento de medición SR-830.

Para realizar el barrido sobre la superficie de la muestra con el menor número de movimientos posibles, la secuencia zigzag es la indicada. Compréndase el movimiento zigzag como la

secuencia de “ir y venir” representada en la Figura 17 de este mismo capítulo. Existe una discriminante en la Figura 18 que dictamina que acción realizar.

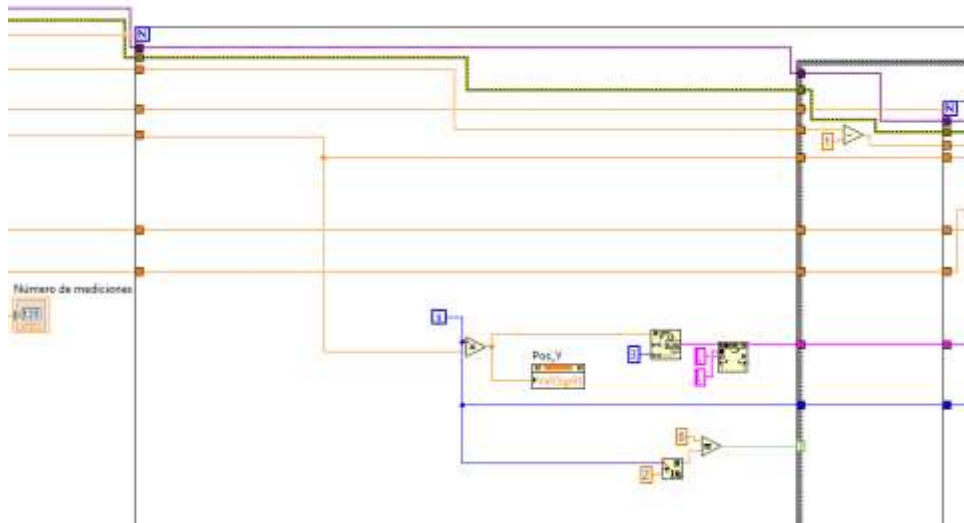


Figura 18. Discriminante para el movimiento zigzag.

La discriminante funciona de la siguiente manera: mediante el bloque “Quotient and Remainder”, se calculan el cociente entero y el residuo de las entradas definidas por la iteración en que se encuentra el ciclo For del eje Y entre una constante “2”, redondeando al entero inferior más cercano. Si el residuo es cero, el estado del case selector, es verdadero y se efectúa la generación de coordenadas para el movimiento zig. Por el contrario, si el residuo es diferente de cero, la secuencia de coordenadas que se genera es la del movimiento zag.

Una vez seleccionado el caso de la discriminante, se forma el comando con las coordenadas que serán escritas en el puerto serial para su recepción en el Arduino Uno. Cada ciclo, corresponde a un eje, Y y X respectivamente. Por lo que el valor de cada iteración multiplicado por el valor de la resolución representa la coordenada real que se adjunta a la cadena de datos. Estos datos también se actualizan en los indicadores de posición. El comando formado, es una cadena de datos de seis elementos que se envía de manera indexada por otro ciclo For anidado, mostrado en la Figura 19. Siendo el orden el siguiente, el identificador de movimiento rápido sin corte “G01”, estándar de los movimientos CNC seguido de un espacio vacío, la posición del eje X, seguida de otro espacio vacío, la posición del eje Y para finalizar con el estándar de salto de línea.

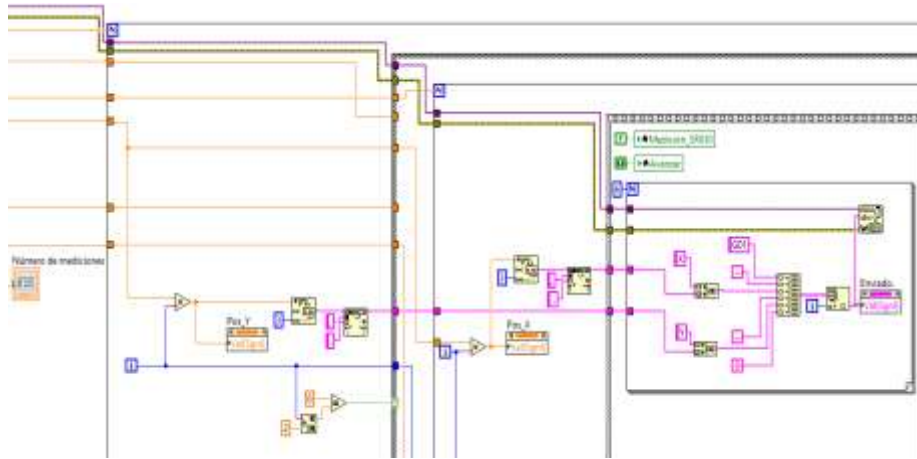


Figura 19. Envío de coordenadas del movimiento zig por puerto serial.

Cuando el caso de la discriminante es falso, se efectúan los cálculos necesarios para generar el comando con las coordenadas del movimiento zag. En el caso de la Figura 20, el armado de la cadena de datos cambia de acuerdo a la resolución seleccionada, afectando los índices con los cuales se guarda la medición adquirida.

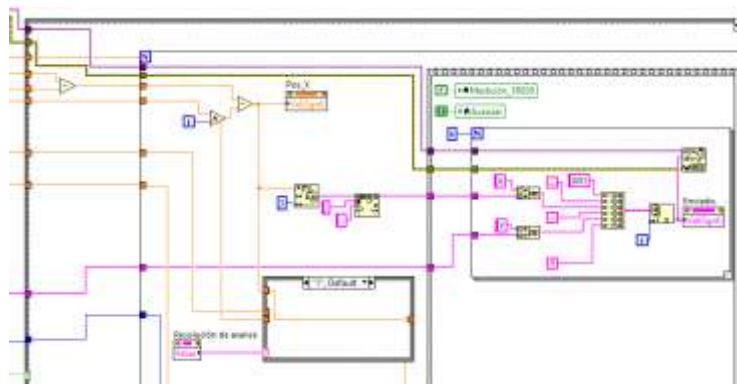


Figura 20. Envío de coordenadas del movimiento zag por puerto serial.

3.1.2 Configuración del instrumento Stanford Research 830.

Una parte fundamental del diagrama de bloques de la aplicación trata acerca de la configuración del instrumento de medición Stanford Research 830. La Figura 21 muestra los principales controles e indicadores junto a los VI's que establecen las condiciones para realizar las mediciones en el experimento.

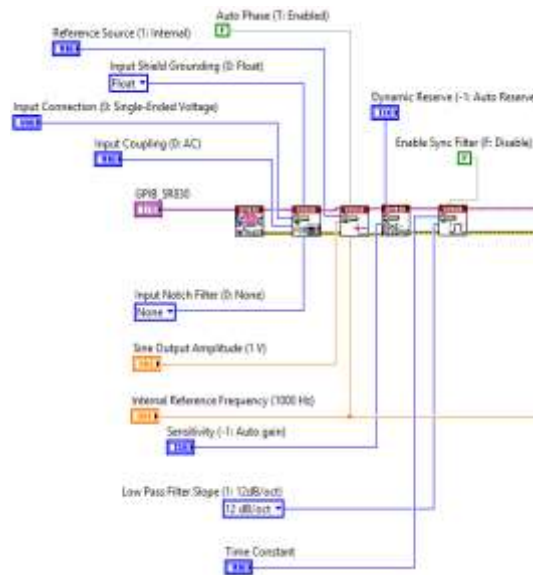


Figura 21. Configuración instrumento SR-830.

El VI *Initialize Stanford Research 830*, establece la comunicación con el instrumento y opcionalmente desempeña la identificación del instrumento o su reseteo. También coloca al instrumento en un estado de default, necesario para posibles operaciones realizadas por otros instrumentos. Este VI es únicamente utilizado al inicio de la aplicación. Para configurar la señal de entrada, el VI *Configure Input Signal Stanford Research 830* hace uso de los controles Input Connection (0: Single- Ended Voltage), Input Coupling (0: AC) e Input Notch Filter (0: None) como parámetros de entrada de la señal.

Es necesario configurar también una fuente de referencia y el oscilador interno, con los parámetros del VI *Configure Reference* como son Manual Phase (0 Degree), Auto Phase (T: Enabled), Reference source (1: Internal), Sine Output Amplitude (1 V), Detection Harmonic number (1), Internal Reference Frequency y External Reference Trigger.

El VI *Configure Sensitivity and Reserve* mediante los parámetros Dynamic Reserve (-1: Auto Reserve) y Sensitivity (Auto gain) fijan las características con el mismo nombre en el instrumento de medición. Así mismo, el VI *Configure Filter* establece los parámetros que

hacen referencia a los controles Time Constant (8: 100 ms) y Low Pass Filter Slope (1:12 db/oct).

3.1.2.1 Medición con el instrumento Stanford Research 830.

Mediante la estructura Flat Sequence dividida en 3 marcos, que corresponden a la escritura del comando de movimiento en el puerto serial, un tiempo de espera entre las acciones y la medición del instrumento se puede asegurar un proceso bien definido y secuencial. La Figura 22, muestra el último de dichos marcos, donde la medición es iniciada, cuando el *VI Express Time Delay* habilita al *VI Stanford Research 830 Read (All Parameters)* después de cinco veces el recíproco de la frecuencia interna de referencia, valor expresado en segundos.

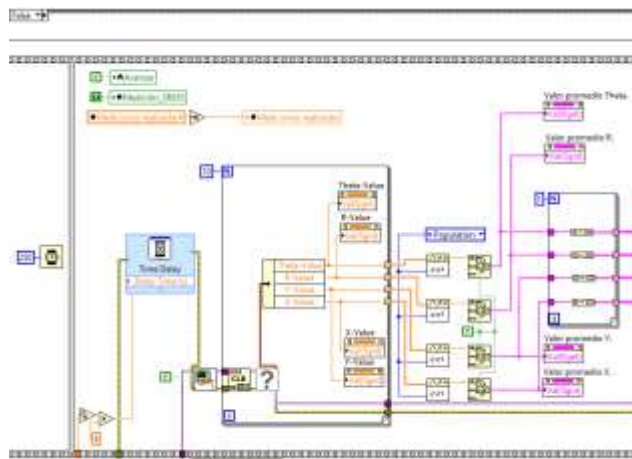


Figura 22. Medición con tiempo de espera para estabilización del SR-830.

Los parámetros que se obtienen al separar el clúster dentro del ciclo de 10 iteraciones se promedian para posteriormente convertirse a una cadena de caracteres y finalmente con el ciclo de una sola iteración, se crea un arreglo de dos dimensiones de tipo cadena de caracteres.

3.1.3 Grabar las mediciones en el archivo Excel.

En la parte inferior del diagrama a bloques de la aplicación se puede apreciar la creación del documento de Excel, con sus respectivas hojas mostradas en la Figura 23, mediante los *VI New Report, Save Report y Excel Add worksheet*.

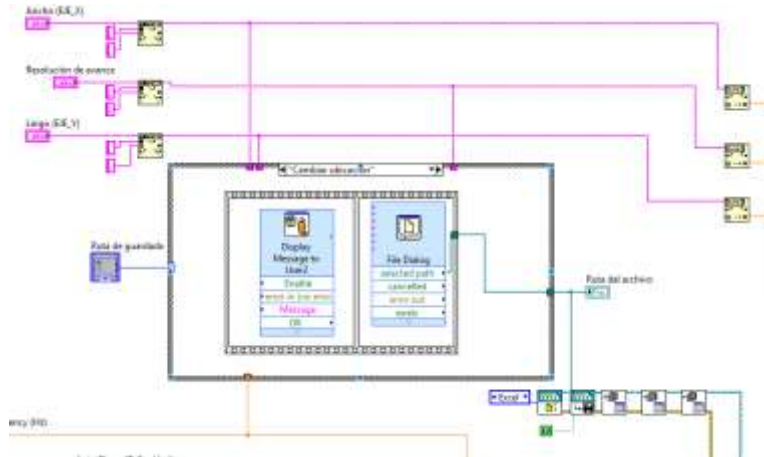


Figura 23. Creación de las hojas del libro en Excel.

La Figura 24 muestra la forma en que cada medición realizada es anexada al libro de Excel, en sus respectivas hojas, que corresponde a la parte inferior derecha del diagrama a bloques. Los índices con los que se guardan dichas mediciones son equivalentes a las iteraciones en las que se encuentran los ciclos For anidados. El *VI Excel Easy Table*, hace uso de estos índices, primero formando un arreglo que después es convertido en un clúster para insertar en la Tabla de Excel, en su respectiva hoja definida por los *VI Excel Rename Worksheet* y el *Excel Get Worksheet*. Una vez terminadas todas las iteraciones de los ciclos, el libro de Excel es guardado con *VI Save Report to File*.

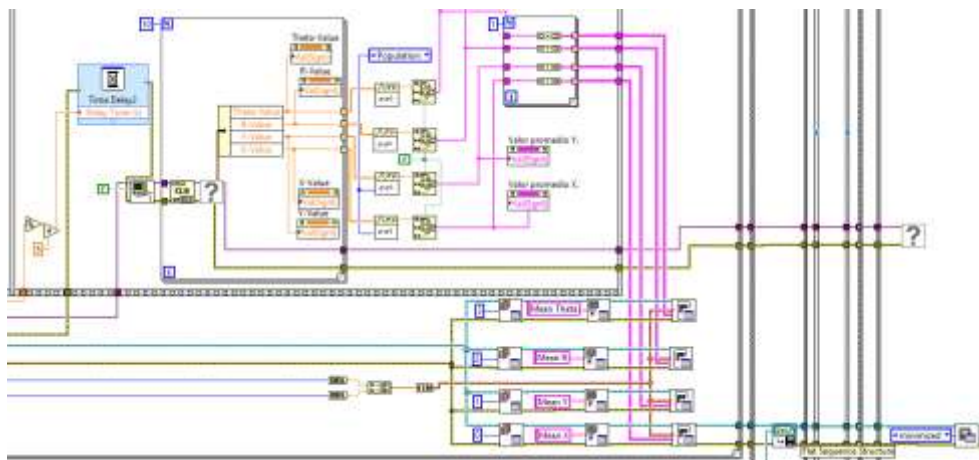


Figura 24. Medición indexada en el libro Excel.

3.2 Diseño y Fabricación del mecanismo de posicionamiento en tres dimensiones.

Esta fase compete al diseño de los componentes del sistema de posicionamiento antes de su manufactura. Las muestras en estudio, requieren movimientos coordinados en tres dimensiones para su análisis, por lo que el sistema concebido contiene los elementos de accionamiento que permitan cumplir dicho objetivo. La Figura 25, muestra los elementos diseñados en el Software SolidWorks®, que forman el marco básico para la sujeción de los elementos de accionamiento y desplazamiento. Denotados en azul y naranja, los baleros y bujes de latón respectivamente y que son usados para reducir los esfuerzos por fricción.

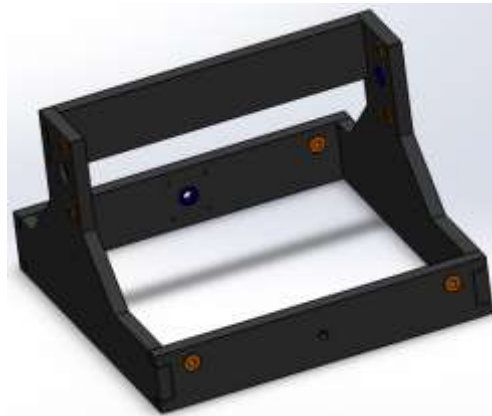


Figura 25. Marco para la sujeción de los elementos de accionamiento y desplazamiento.

Los elementos de accionamiento, fijación y desplazamiento hacen referencia a los motores Nema 17 con sus coples, los tornillos de avance tipo ACME, las varillas cromadas de 8 mm de diámetro y los sujetadores para los motores, mostrados en el Figura 26.

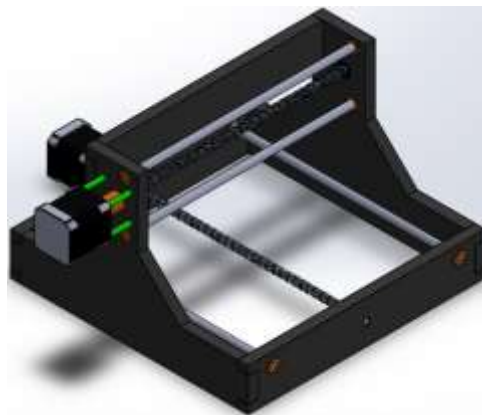


Figura 26. Elementos de accionamiento y desplazamiento fijados al marco.

En la Figura 27, se puede observar como el mecanismo toma forma al integrar la mesa de trabajo para los movimientos X-Y, con sus respectivos baleros de desplazamiento y el eje Z para el posicionamiento del láser.

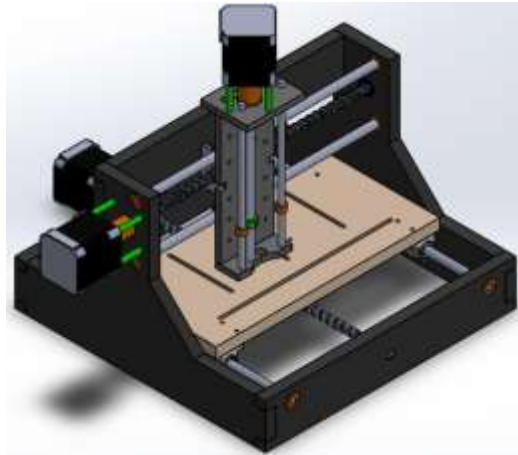


Figura 27. Ensamble completo de los 3 ejes coordenados.

Para poder sujetar el láser al eje Z, se diseñó una base que sirviera para unir dos elementos ya fabricados: las lentes de aumento para fotografía panorámica y el módulo láser KY-008 del fabricante Keyes, Figura 28.

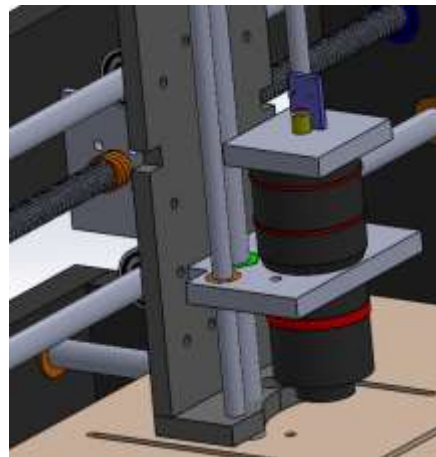


Figura 28. Sujeción del láser y su base al eje Z.

La Figura 29 muestra una vista completa del ensamblaje final, antes del proceso individual de manufactura de cada pieza del marco y el eje Z en la máquina CNC existente en el laboratorio a partir del código G generado con el software BobCAD®.

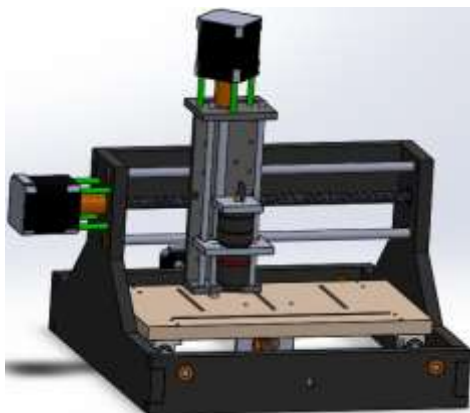


Figura 29. Ensamblaje completo del mecanismo de posicionamiento.

El proceso de fabricación para cada pieza es reiterativo y se puede resumir con el diagrama a bloques de la Figura 30, que incluye los parámetros de diseño en los que coinciden las piezas.



Figura 30. Diagrama a bloques para la fabricación de los elementos del sistema.

3.3 Diseño de la fuente de polarización para el láser.

La técnica de microscopía fotopiroeléctrica hace uso de una fuente de luz modulada en frecuencia para polarizar el láser, que sirve como excitación física sobre la superficie de la muestra en estudio. En la Tabla 3, se enuncian las características contempladas para el diseño del circuito de excitación del láser.

Tabla 3. Características de diseño de la fuente de luz.

Fuente de alimentación interna.	Simétrica ± 12 volts
Corriente de mantenimiento del láser.	30 miliamperes.
Voltaje de alimentación del láser.	5 volts.
Potencia suministrada al láser.	150 miliwatts.

Mientras que el diagrama a bloques de la Figura 31, resalta las etapas y los componentes principales del circuito en cuestión.

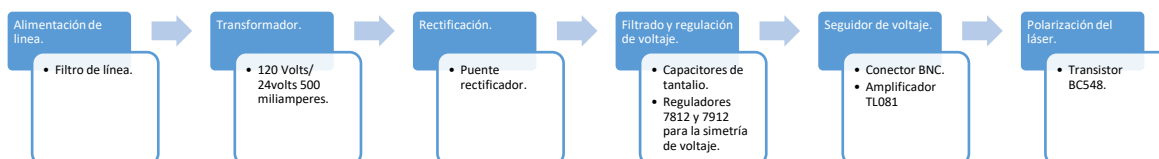


Figura 31. Etapas principales de la fuente de luz modulada.

El diseño del esquemático queda representado por la Figura 32.

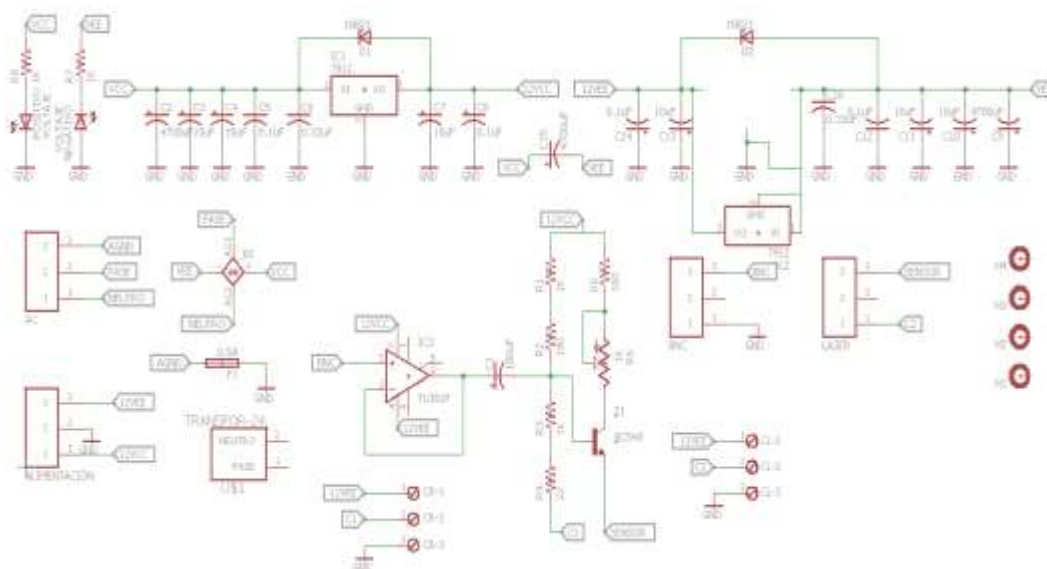


Figura 32. Esquemático de la fuente de luz modulada.

En base a lo anteriormente mostrado en este capítulo se puede afirmar que, con el proceso de manufactura para el sistema de posicionamiento en tres dimensiones, a pesar de ser un prototipo completamente austero, se cumple con las expectativas de diseño: Posibilitar movimientos coordinados en un espacio tridimensional, resolución espacial de avance fina y robustez.

Mientras que, para la fuente de luz modulada el criterio de evaluación es un poco diferente. Aproximarse a las consideraciones de diseño es vital, teniendo en cuenta que la potencia emitida por el diodo láser, si es demasiada puede llegar a dañar la muestra en estudio. He de allí, la importancia de restringir los parámetros de funcionamiento.

Capítulo IV.

Desarrollo experimental.

4.1 Construcción del sistema de posicionamiento.

A partir del diseño realizado en SolidWorks y descrito en el capítulo III, se procedió a la manufactura de las piezas para el sostén en madera de cada eje coordinado. En la Figura 33, se aprecian los ejes X y Y terminados, a espera de colocar el eje Z.



Figura 33. Armado de los ejes X-Y previo a la manufactura del eje Z.

El eje Z, tiene un poco más de complejidad ya que porta también, el sistema de enfoque con el haz láser, como se observa en la Figura 34.

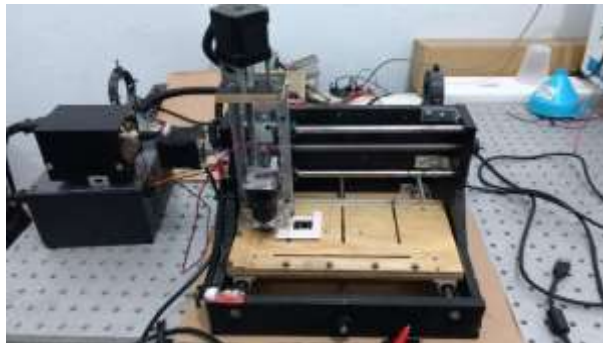


Figura 34. Sistema de posicionamiento con los 3 ejes ensamblados.

4.2 Preparación de la muestra.

La aplicación de esta técnica fotopiroeléctrica encaja perfectamente en la implementación de un método de ensayo no destructivo, ya que es utilizado para detectar discontinuidades internas y/o superficiales o para determinar propiedades selectas en materiales, soldaduras, partes y componentes, sin alterar el estado físico o constitución química de la muestra o su completa destrucción.

A continuación, se describirá una de las ventajas de este método, que es la mínima preparación de la muestra. Una vez seleccionada la sección a analizar, como en la Figura 35, se debe acondicionar la porta muestra que incluye al Sensor PVDF y la muestra en sí, agregándole pasta térmica para mejorar el contacto entre la muestra y el sensor.

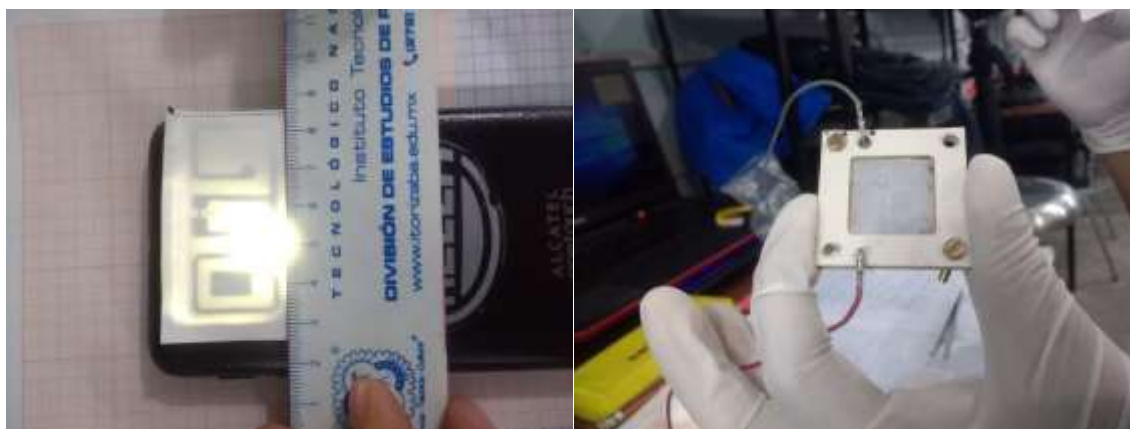


Figura 35. A) Selección del área de la muestra a analizar. B) Pasta térmica para mejorar contacto muestra-sensor.

Después de colocar la muestra en la base, se asegura con un cubre objeto, equivalente a aquellos utilizados en los microscopios y se fija a la base del eje Y del sistema de posicionamiento en 3 dimensiones, como en la Figura 36.



Figura 36. Aseguramiento de la muestra al sistema de posicionamiento. B) Experimento en ejecución.

4.3 Pruebas de repetibilidad del mecanismo de posicionamiento.

Para corroborar si los comandos de código G para los movimientos de los ejes corresponden realmente a los desplazamientos realizados por el haz de luz, se optó por fijar una cámara USB cerca de la plataforma del prototipo, para medir en cada intervalo de desplazamiento del haz de luz la distancia de los trayectos recorridos.

Se capturó la secuencia de imágenes para después, hacer uso de una herramienta de Matlab y así conocer las distancias recorridas en cada desplazamiento. Esta herramienta, permite colocar un objeto patrón y escalarlo como referencia. Es decir, una equivalencia entre número de pixeles y milímetros.

La Figura número 37, muestra este procedimiento. El objeto a escalar, está en contraste con una hoja de papel cuadriculado para hacer más evidente la equivalencia.

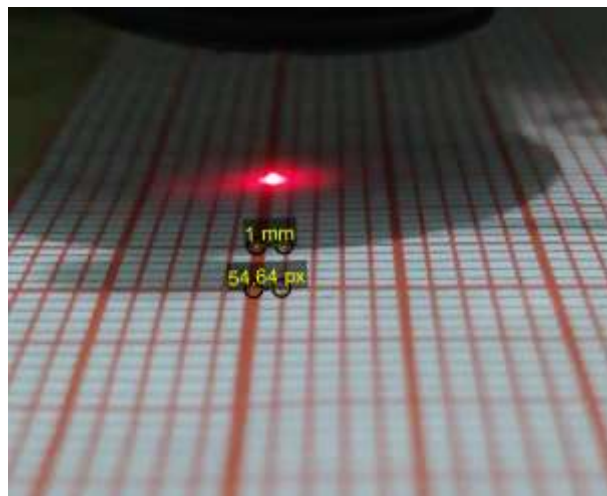
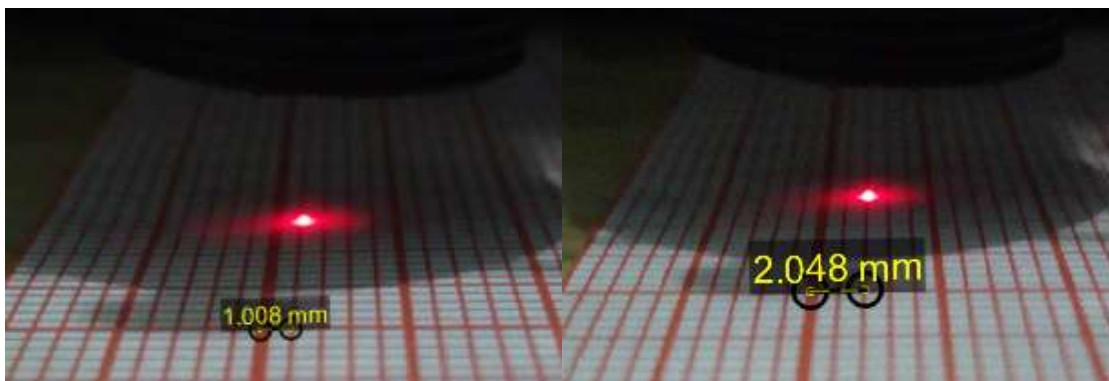


Figura 37. Calibración del objeto de referencia.

La siguiente secuencia en la Figura 38, representa movimientos lineales de 1 milímetro por iteración aproximadamente.



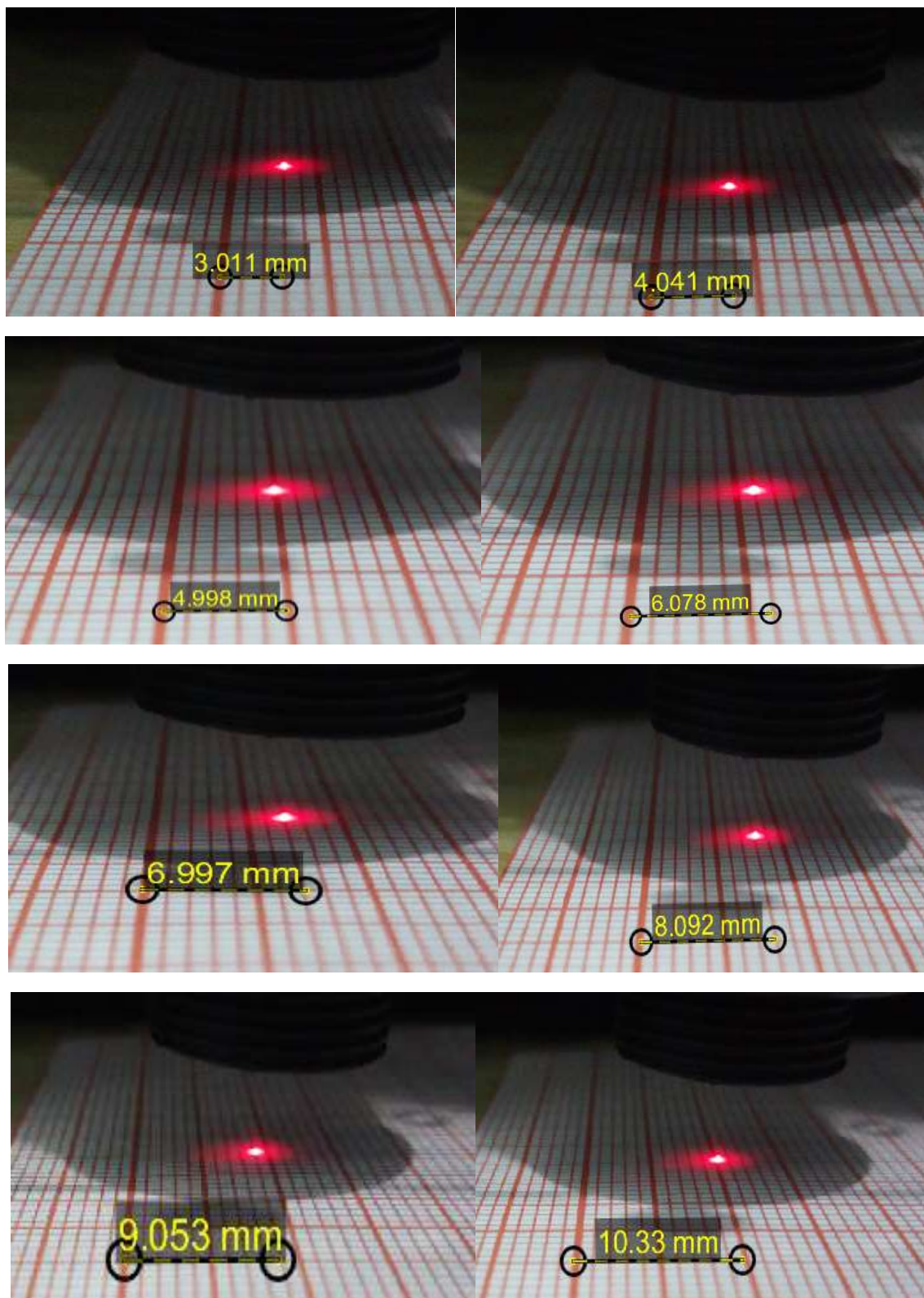


Figura 38. Secuencia realizada con desplazamiento de 1 mm.

La secuencia en la Figura 39, representa movimientos lineales de 2 milímetros por iteración aproximadamente.

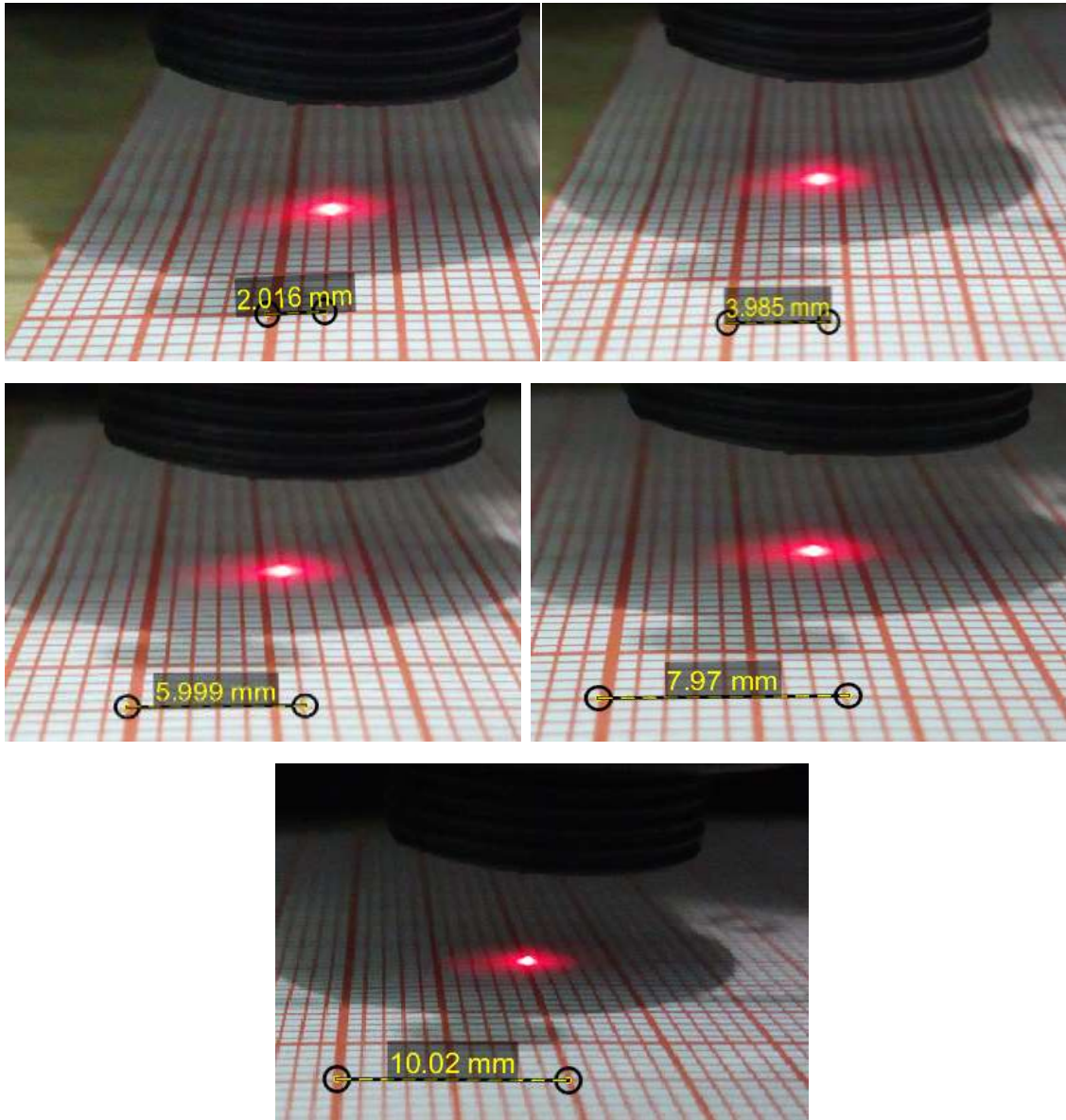


Figura 39. Secuencia realizada con desplazamiento de 2 mm.

La secuencia en la Figura 40, representa movimientos lineales de 3 milímetros por iteración aproximadamente.

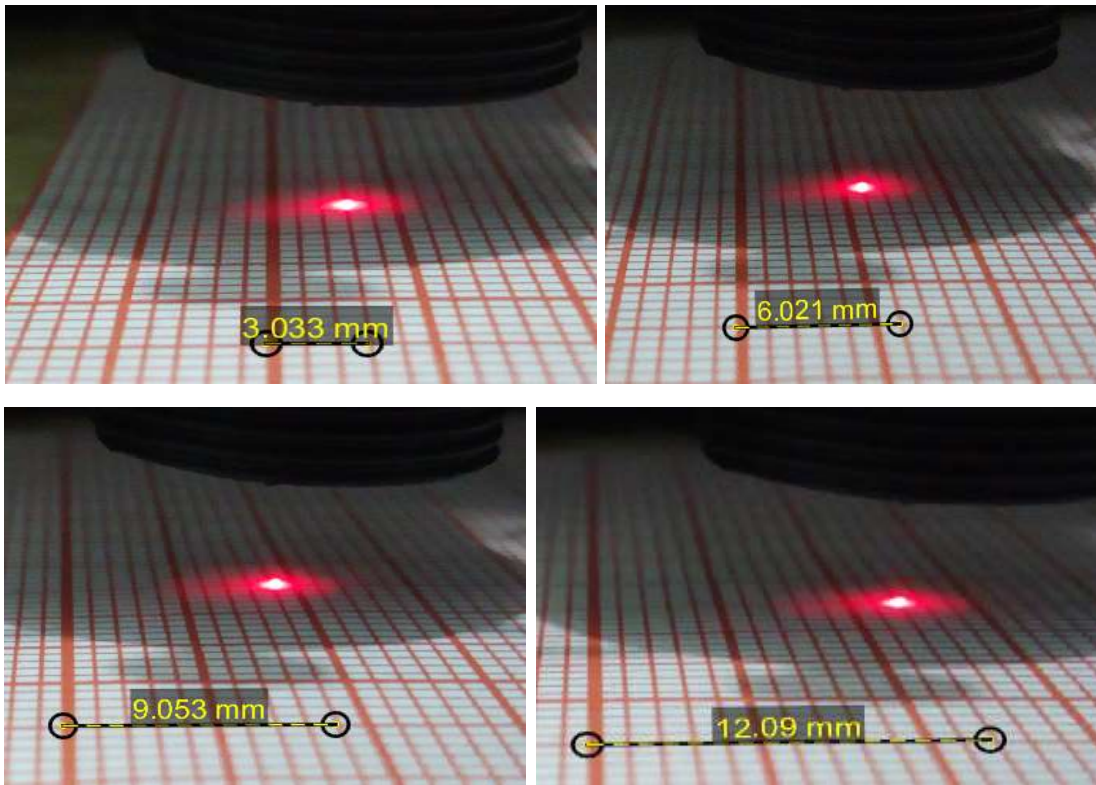
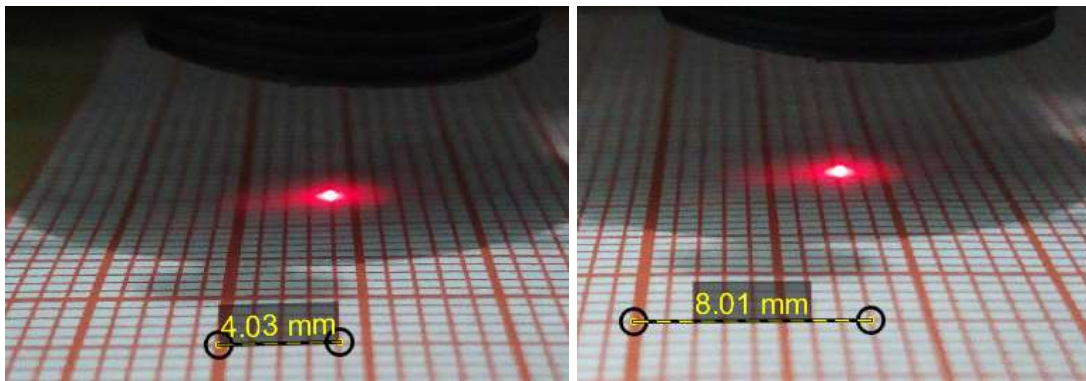


Figura 40. Secuencia realizada con desplazamiento de 3 mm.

La secuencia en la Figura 41, representa movimientos lineales de 4 milímetros por iteración aproximadamente.



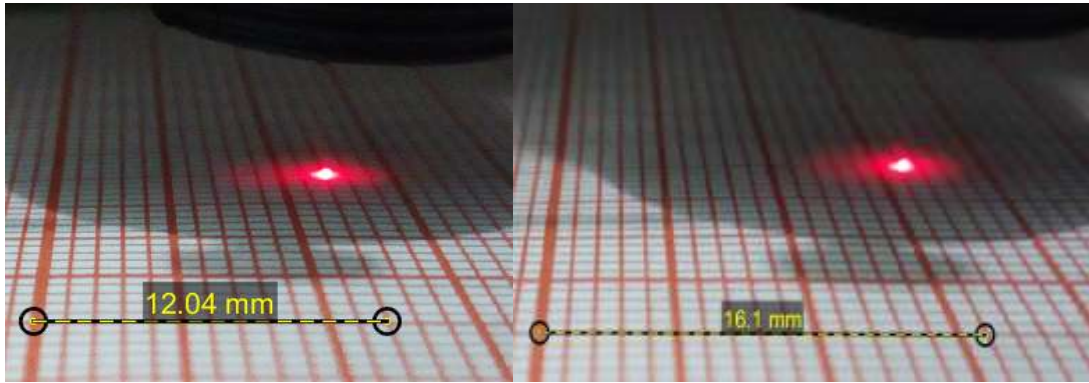


Figura 41. Secuencia realizada con desplazamiento de 4 mm.

La secuencia en la Figura 42, representa movimientos lineales de 5 milímetros por iteración aproximadamente.

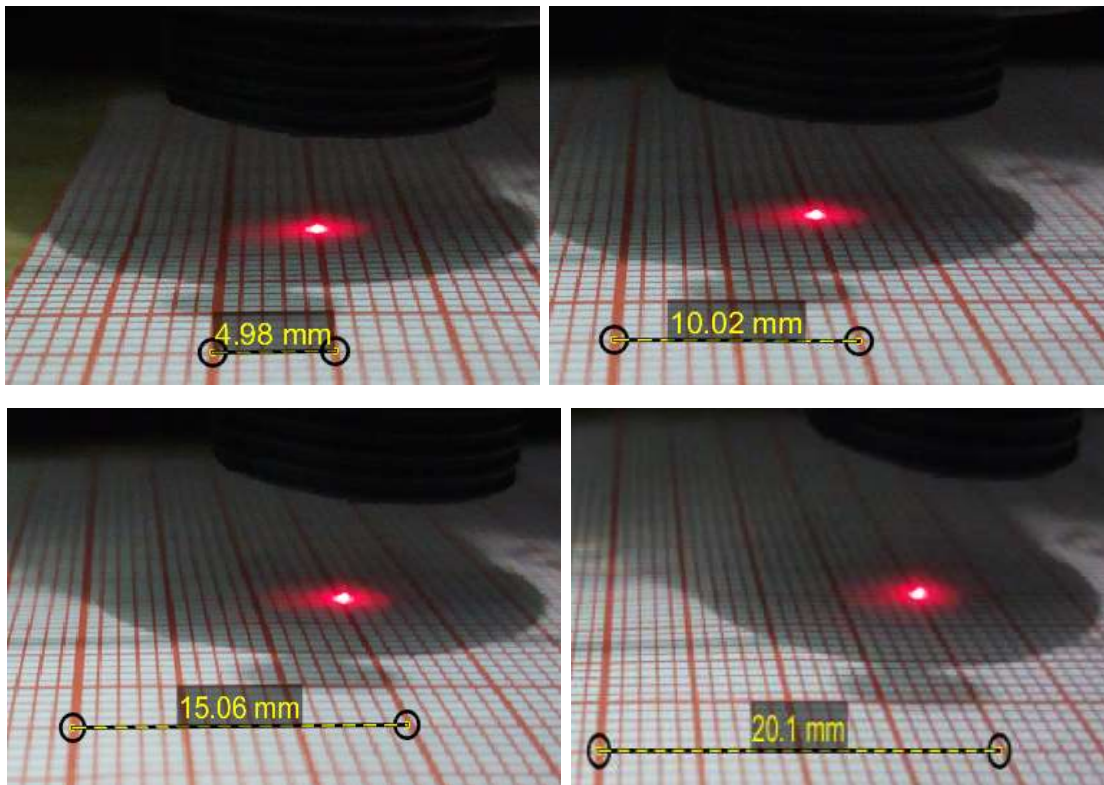


Figura 42. Secuencia realizada con desplazamiento de 5 mm.

La secuencia en la Figura 43, representa movimientos lineales de 6 milímetros por iteración aproximadamente.

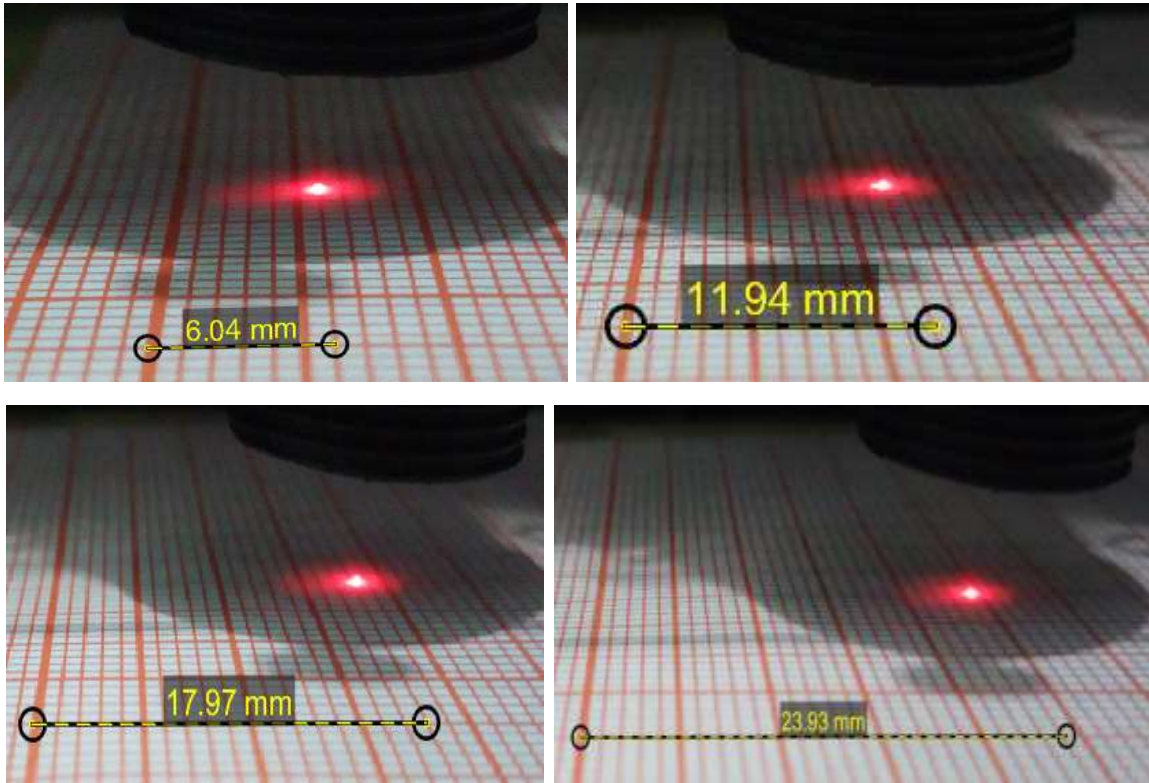
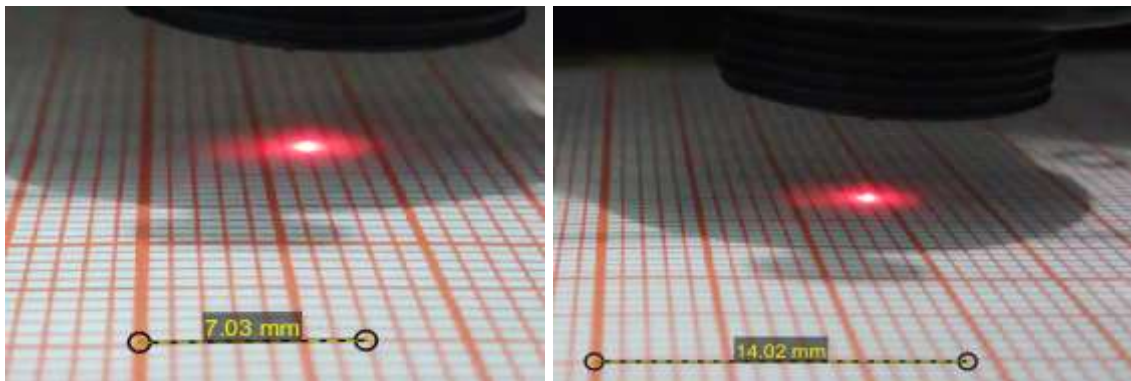


Figura 43. Secuencia realizada con desplazamiento de 6 mm.

La secuencia en la Figura 44, representa movimientos lineales de 7 milímetros por iteración aproximadamente.



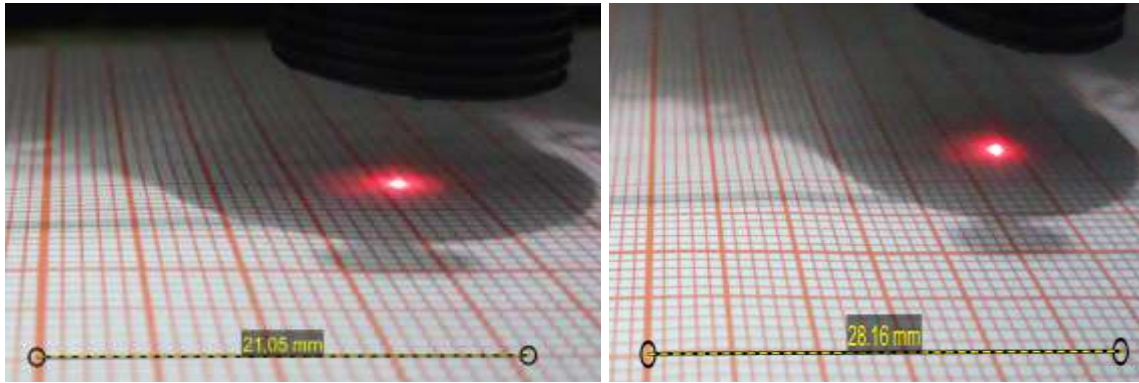


Figura 44. Secuencia realizada con desplazamiento de 7 mm.

La secuencia en la Figura 45, representa movimientos lineales de 8 milímetros por iteración aproximadamente.

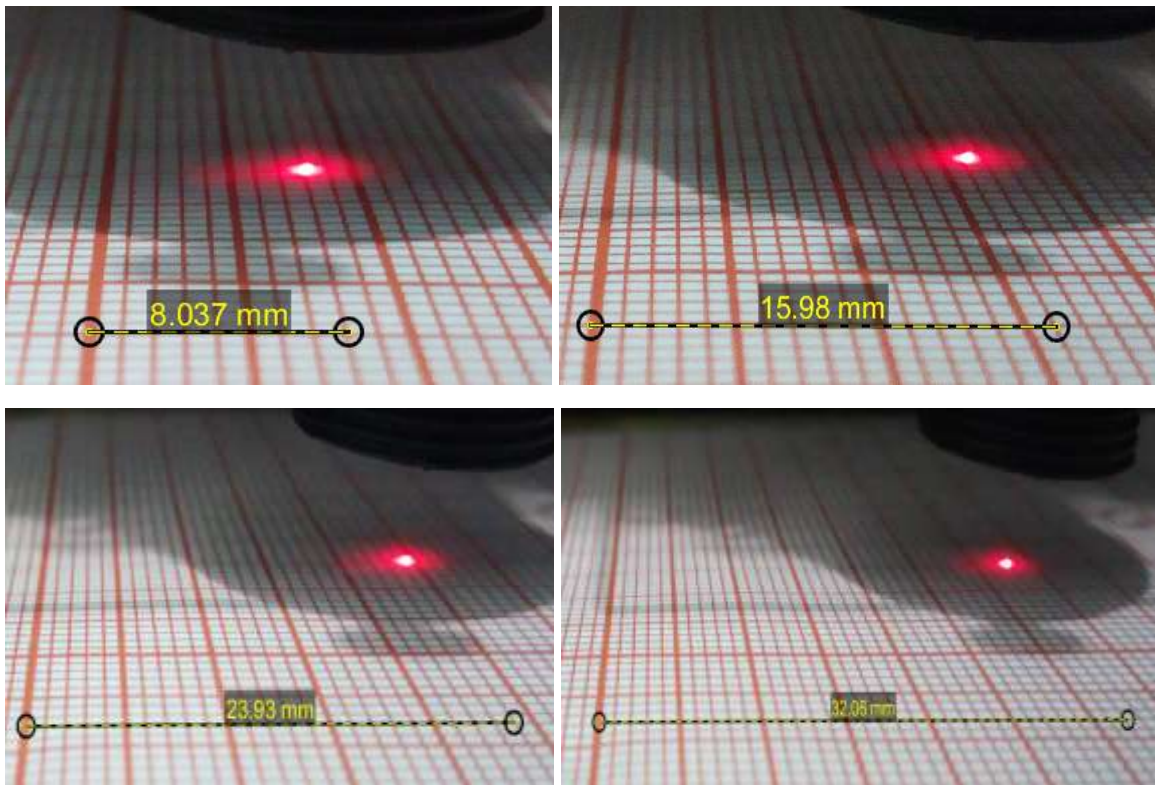


Figura 45. Secuencia realizada con desplazamiento de 8 mm.

La secuencia en la Figura 46, representa movimientos lineales de 9 milímetros por iteración aproximadamente.

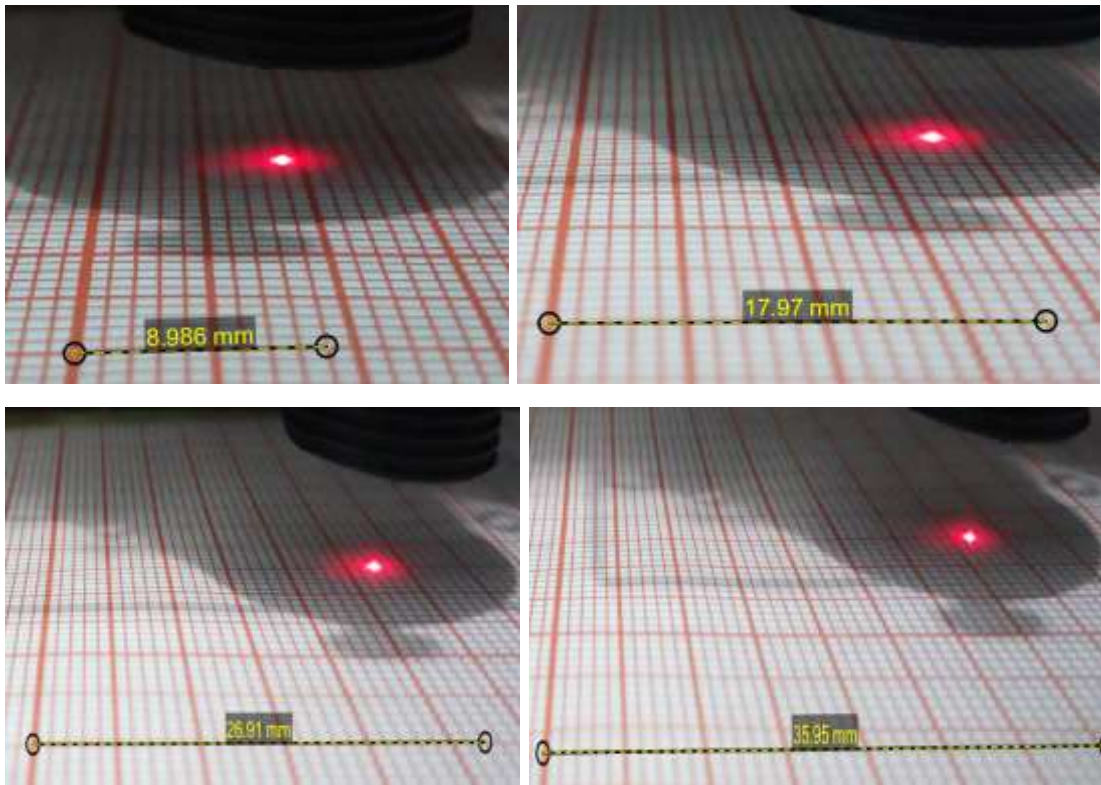
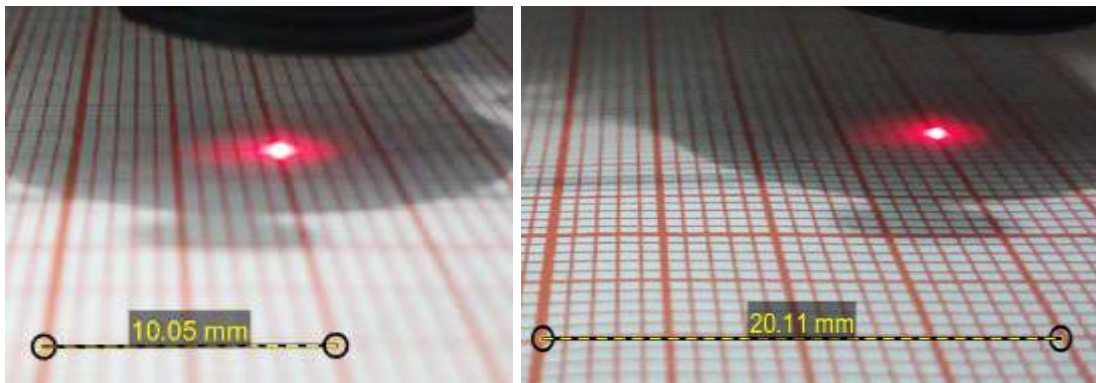


Figura 46. Secuencia realizada con desplazamiento de 9 mm.

La secuencia en la Figura 47, representa movimientos lineales de 10 milímetros por iteración aproximadamente.



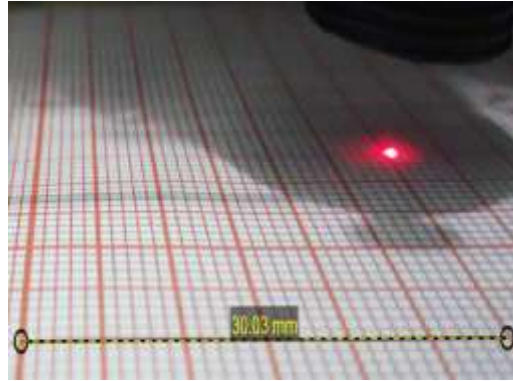


Figura 47. Secuencia realizada con desplazamiento de 10 mm.

4.4 Pruebas con el sistema de enfoque.

En el eje Z del mecanismo de posicionamiento se encuentra colocado un sistema de enfoque, con una lente convexa utilizada normalmente en fotografía panorámica para cámaras de celulares. Esta disposición de la lente, permite que el haz de luz láser producido por el módulo KEYES este concentrado en un solo punto focal sobre la muestra.

La lente convexa, viene integrada como se observa en la Figura 48 (A) en la parte derecha del contenedor negro y se ubica exactamente en la zona donde inicia la rosca y donde aumenta de diámetro el contenedor. La parte roscada es mera protección para no dañar la lente.

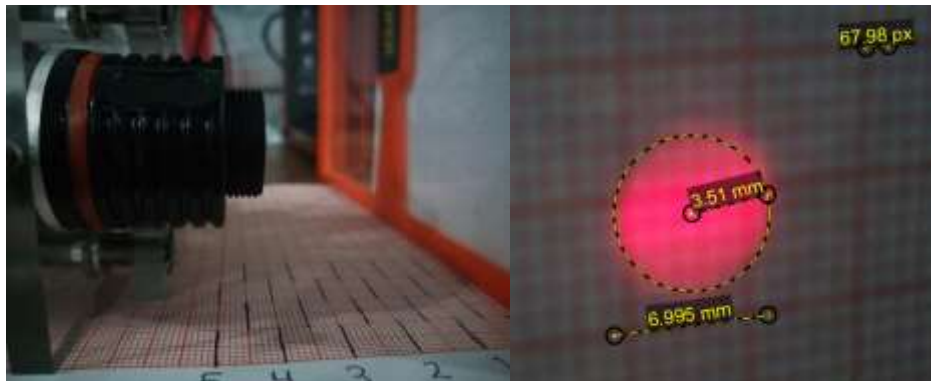


Figura 48. Diámetro del spot generado con punto focal a 50 mm.

Al acercar el contenedor de la lente hacia la muestra, lo que realmente se está haciendo es reducir la distancia del punto focal, que se refleja directamente la reducción del diámetro del spot del haz de luz láser. En adelante desde la Figura 49 hasta la Figura 57, se mostrará la expresado anteriormente en la sentencia previa.

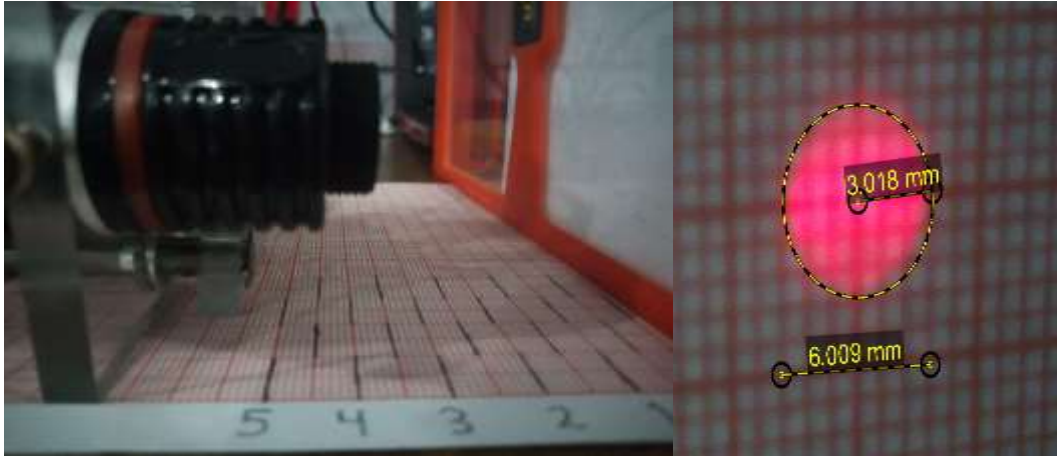


Figura 49. Diámetro del spot generado con punto focal a 45 mm.

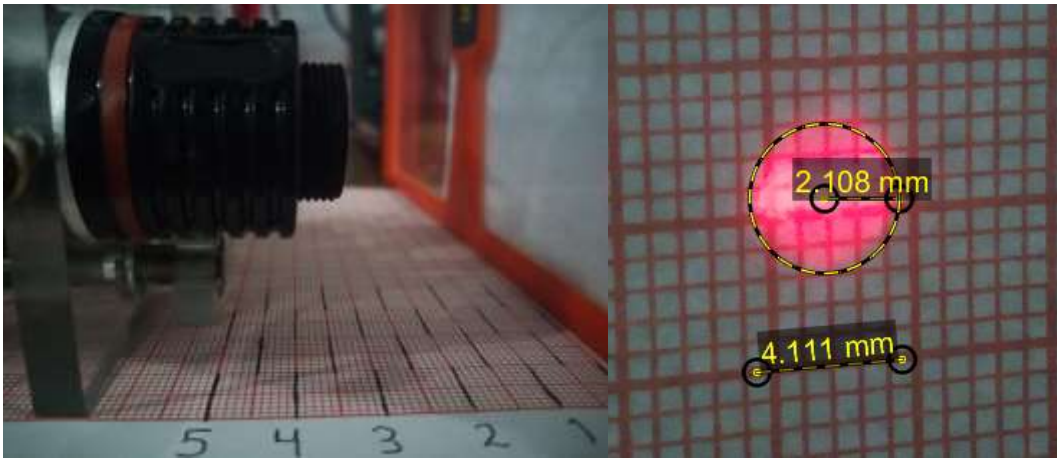


Figura 50. Diámetro generado con punto focal a 40mm.

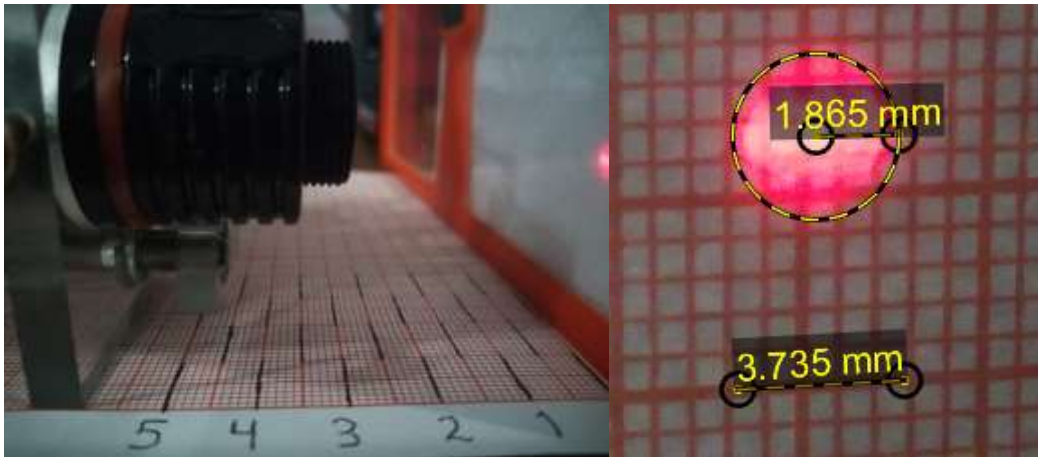


Figura 51. Diámetro generado con punto focal a 35mm.

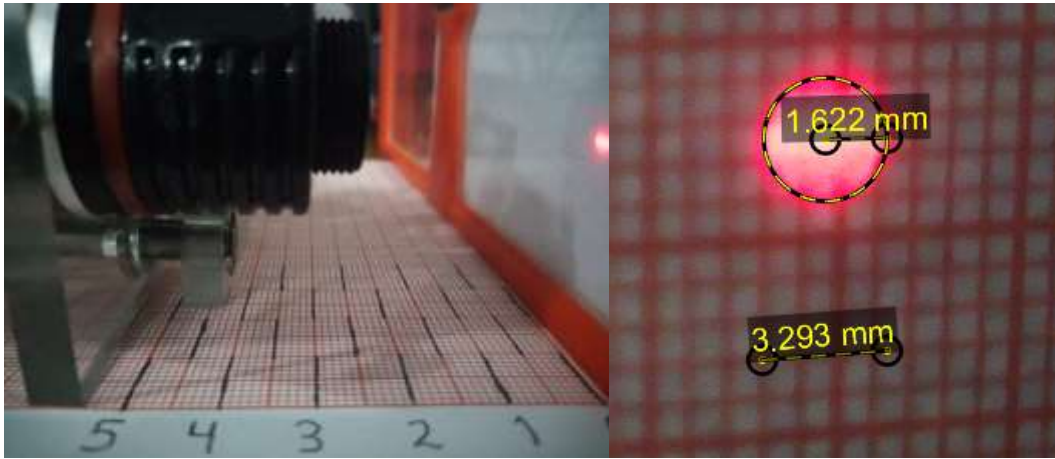


Figura 52. Diámetro generado con punto focal a 30 mm.

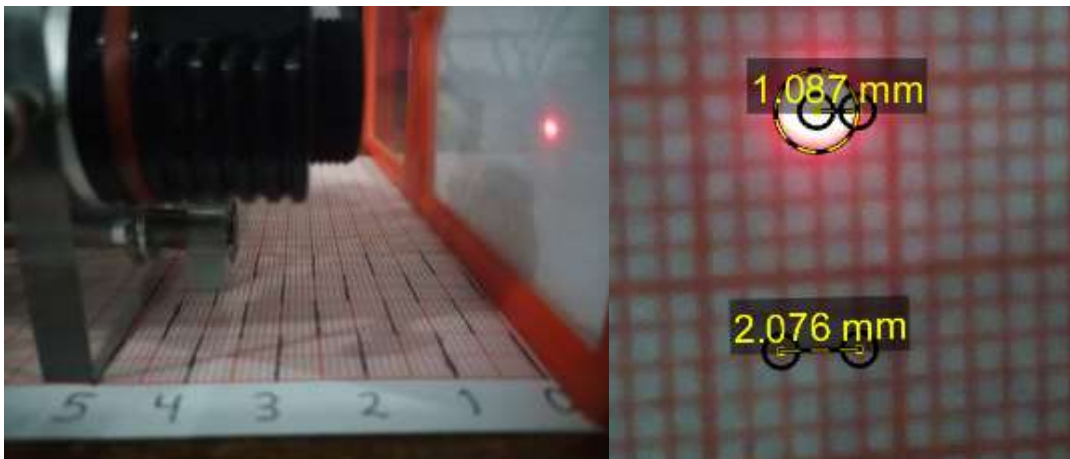


Figura 53. Diámetro generado con punto focal a 25 mm.

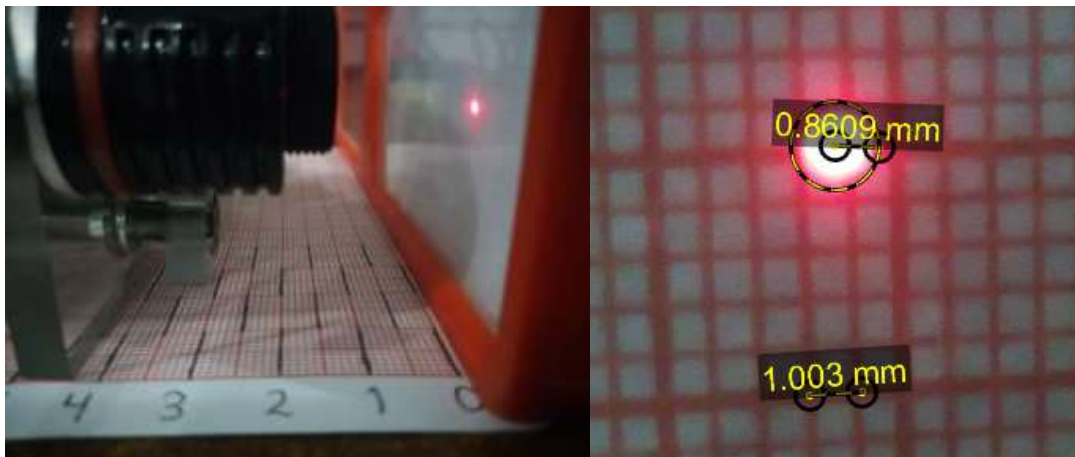


Figura 54. Diámetro generado con punto focal a 20 mm.

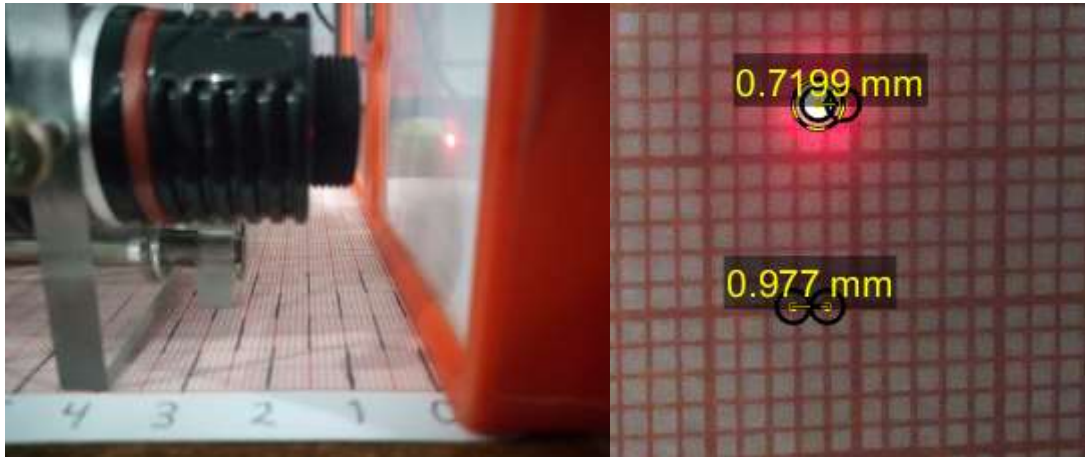


Figura 55. Diámetro generado con punto focal a 15 mm.



Figura 56. Diámetro generado con punto focal a 10 mm.

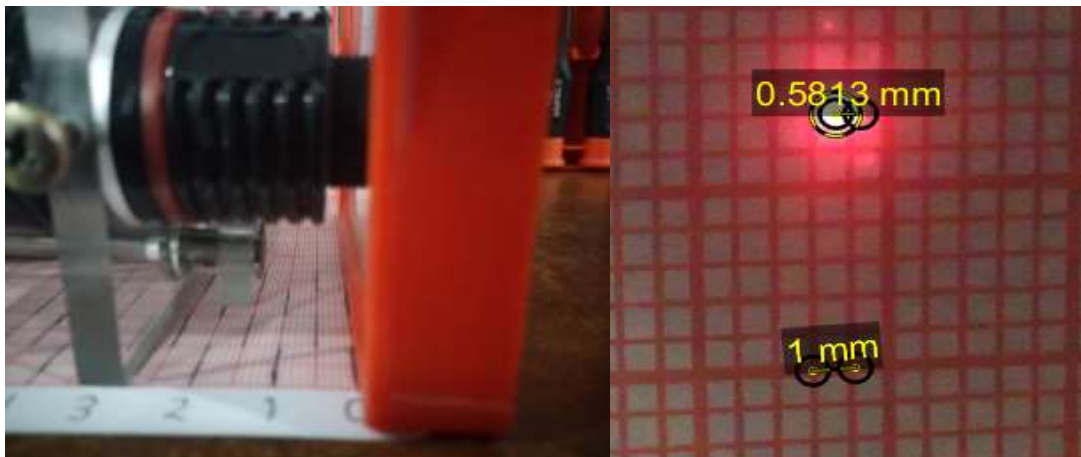


Figura 57. Diámetro generado con punto focal a 5 mm.

4.5 Pruebas con circuitos flexibles.

Existen limitaciones básicas, concernientes a la detección de defectos ocultos en materiales con ondas térmicas: la profundidad de penetración está limitada por la longitud de difusión térmica siendo esta, una característica propia del material en estudio.

Los datos obtenidos de la hoja de datos del material de la muestra mostrados en la Tabla 4, se relacionan con las ecuaciones mencionadas en el Capítulo II para poder encontrar la frecuencia de muestreo adecuada para un análisis superficial.

Tabla 4. Características térmicas de la muestra.

Conductividad térmica	Densidad	Calor específico
$2.887 \times 10^{-4} \frac{\text{Cal}}{\text{cm} * \text{sec} * ^\circ\text{C}}$	$1.42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$0.261 \frac{\text{Cal}}{\text{g} * ^\circ\text{C}}$

$$\mu = \sqrt{\alpha / 2\pi f}$$

Despejando de la Ecuación 3 (Ecuación de la longitud de difusión térmica), la expresión de frecuencia queda definida por la Ecuación 6:

$$f = \alpha / 2\pi\mu^2$$

Ecuación 6. Expresión de frecuencia de muestreo a partir de la Ecuación 3.

Sustituyendo los valores de la Tabla 4, se obtiene la frecuencia de muestreo a utilizar en la fuente de luz modulada para una profundidad aproximada de $2.36687 \times 10^{-3} \text{cm}$, que representa la sección de la muestra comprendida entre el sustrato y la pista de cobre. Obteniéndose una frecuencia de muestreo de 22 Hz para realizar el barrido superficial.

En la caracterización de materiales, la atención se centra en el papel que la muestra juega con la difusión de calor, es decir cuantificar la señal de perturbación en magnitud y fase, características que se muestran en la técnica de microscopía fototérmica como imágenes térmicas.

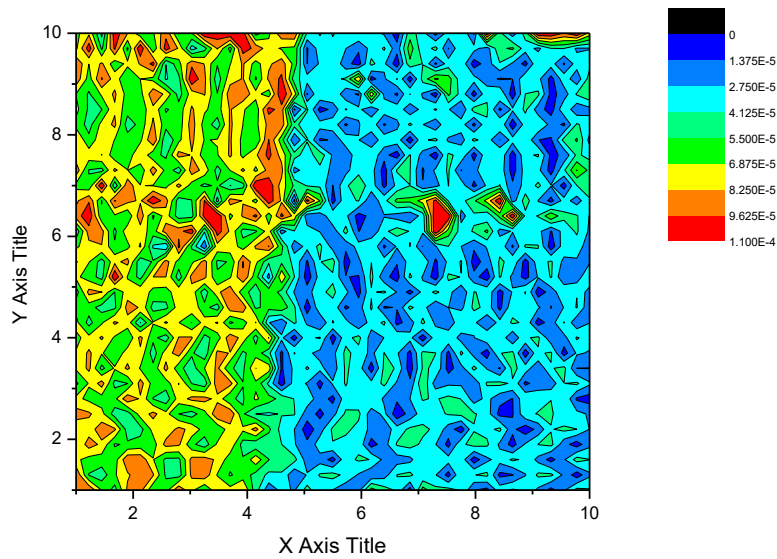


Figura 58. Magnitud en 2 dimensiones de la muestra de pista flexible.

La escala de colores en la Figura 59, indica la amplitud de la señal, que representa las distintas zonas de absorción de la muestra. La parte azulada da una señal del sensor PVDF muy baja. La parte roja representa zonas donde existe la mayor absorción de luz en la muestra.

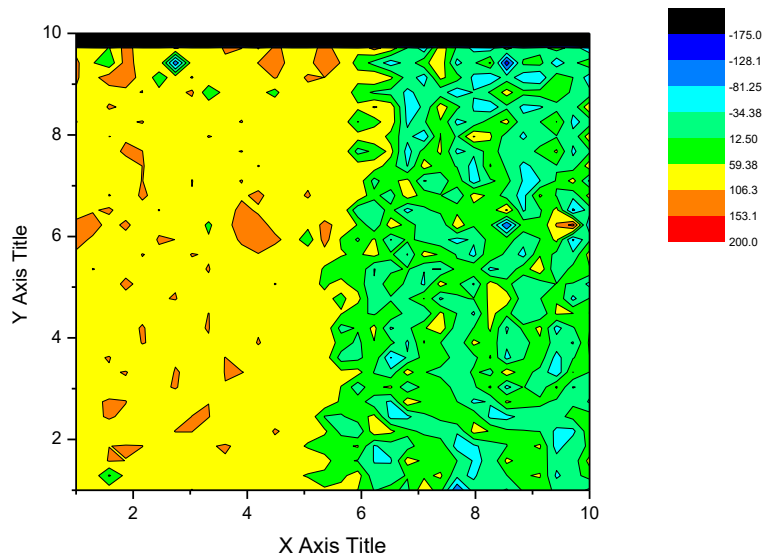


Figura 59. Fase en dimensiones de la muestra de pista flexible.

En las imágenes obtenidas, las ondas térmicas fueron usadas como sondas para revelar discontinuidades locales, es decir fallas en la capa examinada del material, siendo la Figura

60, la muestra real, con dimensiones físicas de 10 mm x 8 mm, dichas fallas, son difíciles de detectar por métodos de inspección visual convencionales.

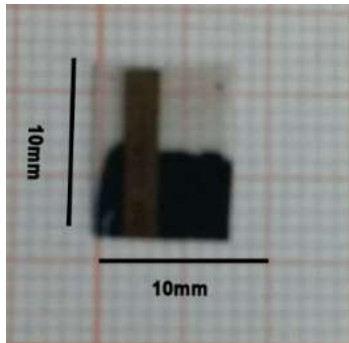


Figura 60. Sección del circuito en estudio para la prueba 1.

Para contrastar los resultados obtenidos, se realizó una segunda prueba con una muestra de otro tipo de circuito flexible visto desde el microscopio, donde es posible observar daño en el recubrimiento, el cual se muestra en la Figura 61.

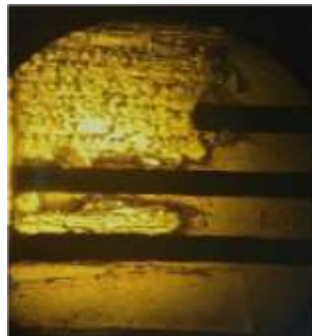


Figura 61. Sección del circuito para la prueba 2.

Debido a la capa adicional que cubre el sustrato y las pistas, fue necesario cambiar la frecuencia de muestreo en la muestra con dimensiones de 5mm x 5 mm, para localizar la sección de las tres pistas paralelas ubicadas en un nivel diferente de profundidad comparadas con la muestra 1, cuya imagen de respuesta en amplitud, se aprecia en las siguientes Figuras:

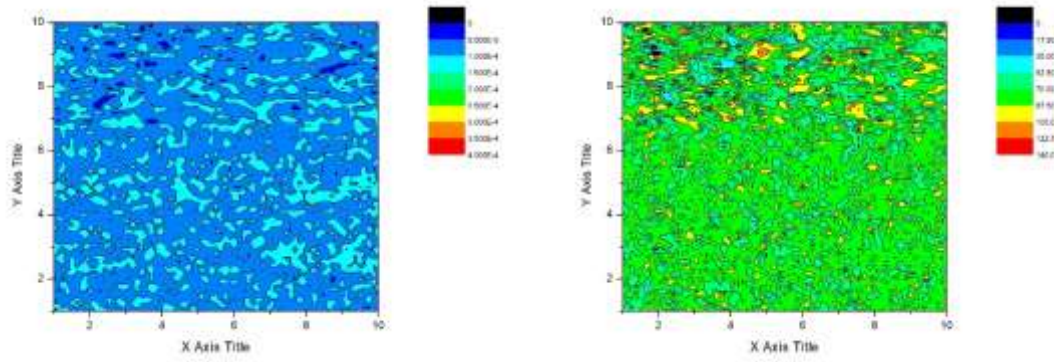


Figura 62. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20 Hz.

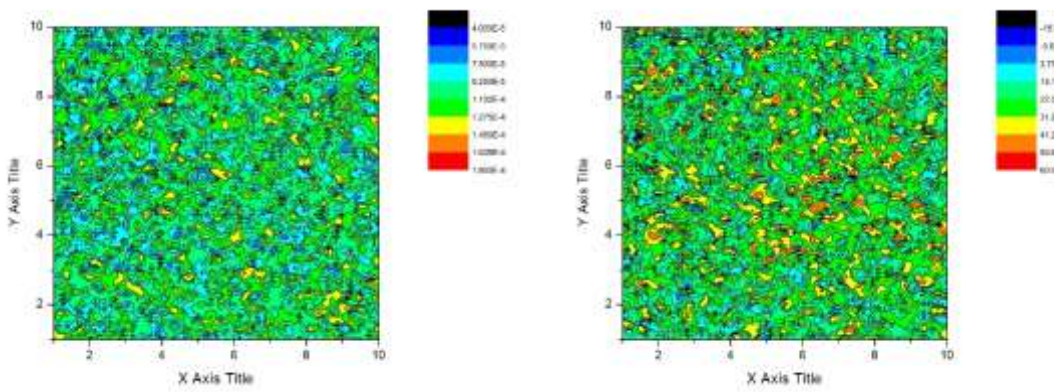


Figura 63. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.1 Hz.

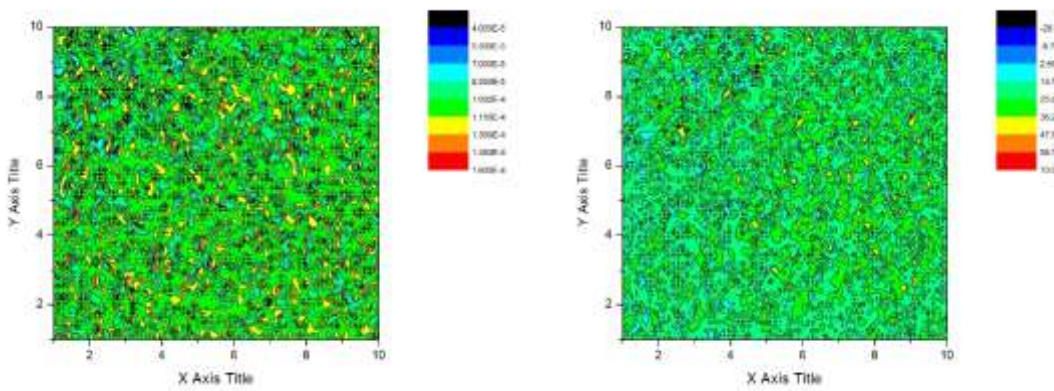


Figura 64. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.2 Hz.

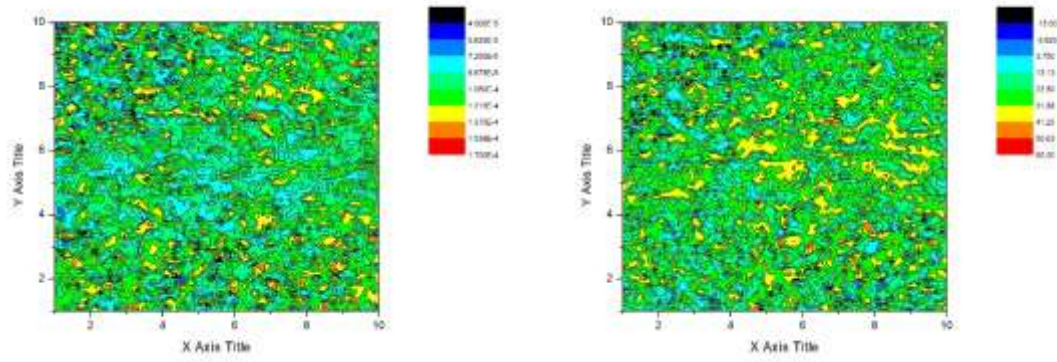


Figura 65. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.3 Hz.

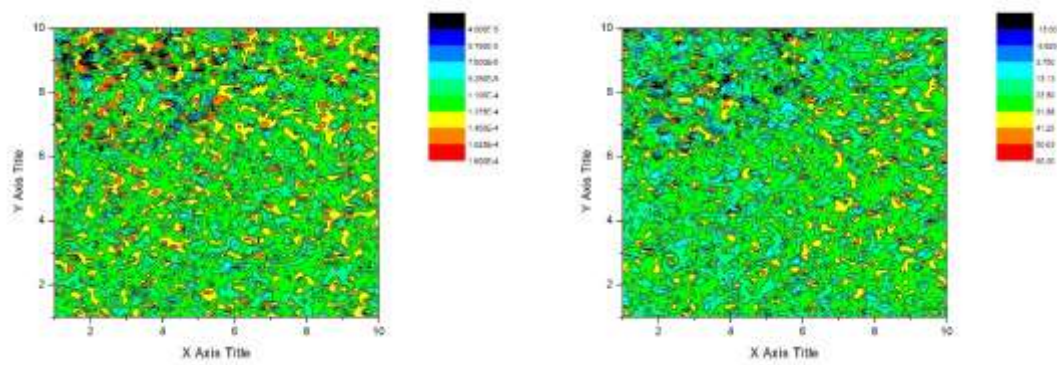


Figura 66. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.4 Hz.

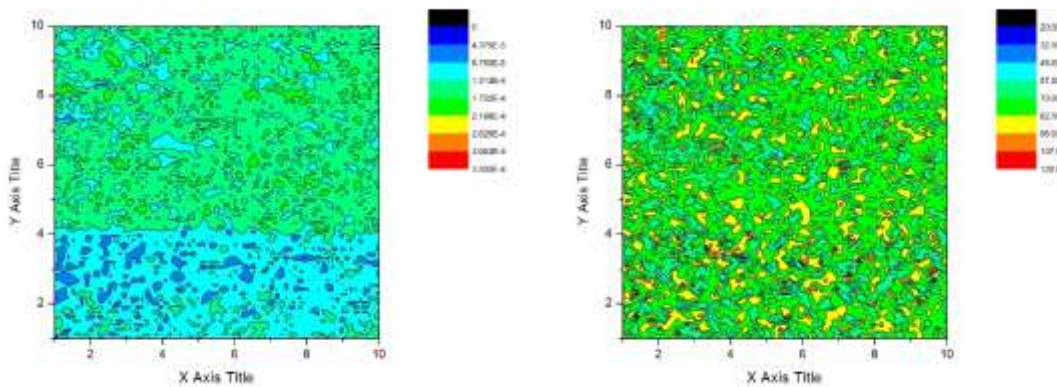


Figura 67. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 20.5 Hz.

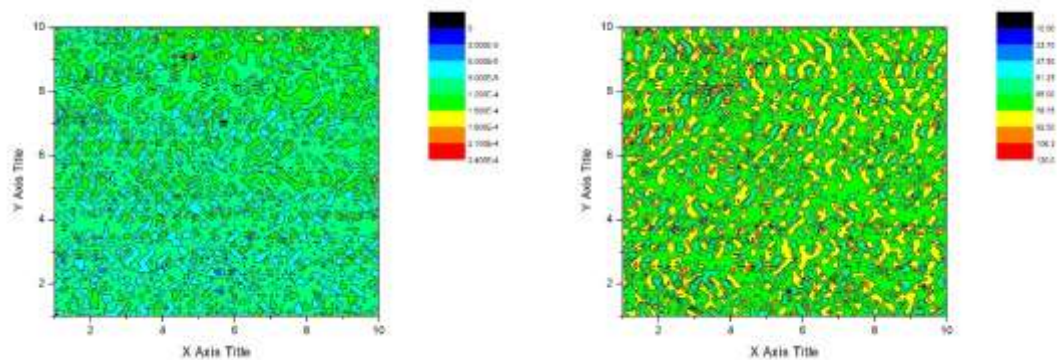


Figura 68. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 21 Hz.

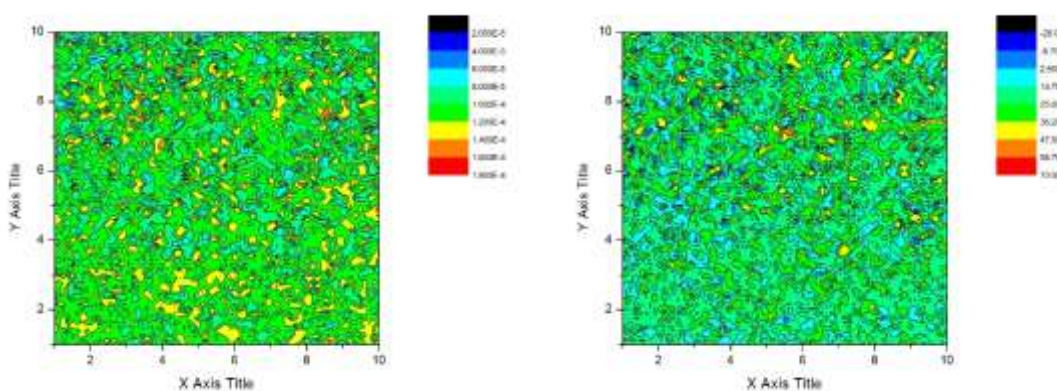


Figura 69. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 21.5 Hz.

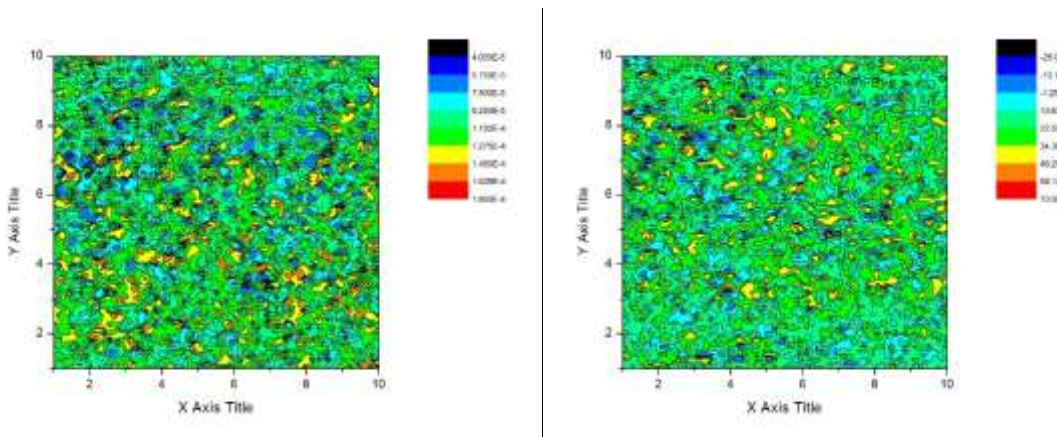


Figura 70. Representación de Magnitud y Fase en 2 dimensiones a una frecuencia de 22 Hz.

De las Figuras 62 a la 70, en la columna izquierda es posible distinguir las tres zonas de líneas paralelas que representan las pistas del circuito, por los diferentes rangos de absorción generados.

Conclusiones.

El grado de aceptación para la deposición de cobre, lejos de basarse en una cantidad meramente cualitativa, involucra cuestiones más estadísticas que en este trabajo en particular, fueron abordados con la implementación de la técnica de microscopía fotopiroeléctrica.

Para la muestra del segundo circuito flexible afectado “mecánicamente” por una raspadura en su capa externa, se demostró que es posible realizar el mismo ensayo para conocer características internas de la muestra en cuestión. Cuyas figuras, si bien no arrojaron imágenes claramente bien definidas, marcaban la tendencia de deposición en paralelo correspondiente a las pistas reales.

La presencia de discontinuidades en la sección de cobre, indica un posible error de manufactura en cuanto al proceso de revelado por ataque químico y, siendo esta una pequeña sección del circuito flexible original, se puede llegar a estimar en términos cualitativos la calidad promedio de todo el circuito.

En base a los resultados obtenidos en las pruebas, se demostró que es posible detectar imperfecciones no solo superficiales, sino internas de la muestra analizada mediante la obtención de imágenes térmicas. Basándose en las imágenes obtenidas, es posible hacer una afirmación de que la muestra 1, tiene una mejor deposición de cobre en comparación de la muestra 2.

Como trabajo a futuro, en cuanto al desarrollo del prototipo una opción de mejora sería sustituir los tornillos de avance tipo ACME por tornillos micrométricos similares a los utilizados en los instrumentos de precisión conocidos como micrómetros, para hacer aún más fino y estable el desplazamiento entre ejes.

La desventaja de esta mejoría, sería la reducción del área de trabajo, pero teniendo en cuenta que las dimensiones de la muestra en estudio no son mayores a 7 mm por lado, es obvio que el espacio tridimensional de trabajo del prototipo actual esta excedido, pero aun así es funcional.

Esto gracias a que es una plataforma multipropósito y teniendo la certeza de que los comandos enviados desde la interfaz al prototipo corresponden a aquellos del estándar de comunicación CNC, se puede utilizar como tecnología aditiva y sustractiva sin realizar grandes cambios considerables, tema que sin embargo que no se trata en esta tesis.

Bibliografía.

- [1] M. I. Ivanov R., Pichardo Molina J.L., Gutiérrez Juárez G., Vargas Luna M., "Elección de técnica adecuada y optimización parcial de un experimento fotopiroeléctrico," *Superficies y vacío*, vol. 18, pp. 18-20, 2005.
- [2] B. Jiménez, "Materiales piezoeléctricos: formas de presentación, ventajas y desventajas en las aplicaciones," *Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio*, vol. 34, pp. 272-276, 1995.
- [3] J.-F. L. Li-Qian Cheng, "A review on one dimensional perovskite nanocrystals for piezoelectric applications," *Journal of materiomics*, vol. 2, pp. 25-36, 2016.
- [4] D. Z. Klaas Hauke Baumgärtel, Karl-Ludwig Krieger, "Classification and simulation method for piezoelectric PVDF sensors," *Procedia Technology*, vol. 26, pp. 491-498, 2016.
- [5] D. K. Facundo Zaldivar Escola, Oscar Eduardo Martínez, Nélica Mingolo, "Photothermal Microscopy," *Procedia Materials Science*, vol. 8, pp. 665-673, 2013.
- [6] Z. B. A. Mansanares, T. Velinov, D. Fournier, A. Boccara, "Photothermal reflectance microscopy: signal contrast of thick and thin grain interfaces in solids," *Journal de Physique*, vol. 4, pp. 575-578, 1994.
- [7] L. G. Pierre Vermeulen, Brahim Lounis, "Photothermal microscopy: optical detection of small absorbers in scattering environments," *Journal of microscopy*, 2014.
- [8] J. J. Jerzy Bodzenta, Anna Kazmierczak-Balata, Grzegorz Wielgoszewski, "Photothermal Measurement by the Use of Scanning Thermal Microscopy," *International Journal Thermophysics*, pp. 316-327, 2014.
- [9] A. H. Markus Selmke, Marco Braun, Frank Cichos, "Photothermal single particle microscopy using a single laser beam," *Applied Physics Letters*, vol. 105, 2014.
- [10] A. H. M. Reading, H. M. Pollock, C. Rankl, J. Rice, S. Capponi, "Two new scanning probe microscopy techniques for photothermal IR imaging and spectroscopy," *Royal Society of Chemistry Thermal Methods* 1 April 2015 2015.
- [11] D. W. A. Dillenz, K. Breitrück, G. Busse, "Lock-in thermography for depth resolved defect characterisation," in *15th WCNDT*, Roma, Italy, 2000.
- [12] N. A. García, "Caracterización de propiedades térmicas de tejidos biológicos por deflexión fototérmica," *Ingeniería en comunicaciones, Facultad e ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*, México, 2014.
- [13] M. M. Pérez, "Desarrollo y aplicación de la calorimetría fotopiroeléctrica al estudio de transiciones de fase," *Doctora en ciencias físicas, Departamento de Física aplicada I, Universidad del país vasco*, España, 2008.
- [14] B. R. B. Tepepa, "Técnica fotopiroeléctrica: Microscopía y medición de difusividad térmica en líquidos," *Doctor en Tecnología Avanzada, CICATA-IPN Unidad Legaria, Instituto Politécnico Nacional*, México, 2010.



Certificate of Publication - Research Journal



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANIA - SHERPA
UNIVERSIA - E-Ravistas - Google Scholar - DOI - REDIB - Mendelley - DIALNET - ROAD - ORCID

CDMX-Mexico, December 30 - 2017

GARCÍA-MARTÍNEZ, Mario Alberto, HERRERA-AGUILAR, Ignacio, REYES-NICOLÁS, Rafael, ALEGRIA-VÁZQUEZ, Oliver
Instituto Tecnológico de Orizaba
PRESENT:

Through this letter we state that **GARCÍA-MARTÍNEZ, Mario Alberto, HERRERA-AGUILAR, Ignacio, REYES-NICOLÁS, Rafael, ALEGRIA-VÁZQUEZ, Oliver** has been published in *Revista de Sistemas Computacionales y TIC's*, with an article entitled "Diseño novedoso de un sistema doméstico e inalámbrico basado en Raspberry-Pi y Arduino", in Volume 3 Number 9 with ISSN: 2444-5002, at pages 25-34 segment.

License: Creative Commons Attribution-No commercial 2.5 Mexico and GNU/GPL

The Research Journal is Arbitrated by peer review is Indexed and deposited in Databases:

- 19502 For indexing in Latin America and the Caribbean
- 20-281 HB9 For indexing Latin American Dating in Social Sciences and Humanities
- 671 For indexing in scientific journals Electronic Spanish and Latin America
- 7045008 For disclosure and publication in the Ministry of Education and Culture-Spain
- 25409 For repository in the Library University-Madrid
- 16258 For indexing Dialnet Foundation-University of La Rioja
- 20589 For indexing in journals published in the countries of Latin America and the Caribbean-IJNAM
- 15048 For international registration of Congresses and Symposia-International
- 2007-1582 For registration to the International Index in print
- 2007-3682 For registration to the International Index in electronic format

This research is published in:

http://www.ecorfan.org/revistas/computacionales_y_tic/volumen3_numero9/Revista_de_Sistemas_Computacionales_y_TICs_V3_N9_Aglo

We issue this certificate for the purposes of science, technology and innovation

Regards,

María Ramos-Escamilla, PhD.
CEO-ECORFAN-México, S.C.
CONACYT-RENIECYT: 2015-20795

ECORFAN-México, S.C.
244 - 2 Itzopan Street
La Florida, Scatepec Municipality
Mexico State, 50100 Zorongo
Phone: +52 1 55 6159 2296
Store: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: EcorfanMexico S.C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings			
Bolivia	Honduras	China	Hungary
Canada	Indonesia	France	Republic of the Congo
El Salvador	Colombia	Ecuador	Dominica
Peru	Spain	Cuba	Haiti
Argentina	Paraguay	Costa Rica	Venezuela
Czech Republic			

FORMATO DE ARBITRAJE

La Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez y la revista UTCI Theorema, agradecen el tiempo que le dedica a la evaluación del presente escrito.

Título del Artículo: Control de Temperatura para Espacios Reducidos Basados en Celdas Peltier

Autores: L. A. Naranjo Rosas, O. Alegría Vázquez, J.J. Hernández Pino y J.J.A. Flores Cuetle

DICTAMEN

(Información que sí conocerán los autores)

- Clasificación recomendada: Artículo de investigación aplicada
- Nivel de relevancia e interés: Alta Media Baja
- Calidad de la escritura: Excelente Intermedia Baja
- Opinión global del árbitro/visor: Rechazado Aceptado con cambios mayores (no habrá nueva revisión) Aceptado con cambios menores (no habrá nueva revisión)

COMENTARIOS Y SUGERENCIAS PARA LOS AUTORES

En el siguiente campo emita respetuosamente y anónimamente los comentarios y sugerencias para los autores que les permitan mejorar su artículo y que reflejen su impresión al texto que ha evaluado.

Agregar los nombres completos de los autores, agregar palabras clave en inglés.

Resumen demasiado breve y generalizado, es recomendable ampliarlo para proporcionarle información pertinente al lector de tal manera que lo invite a leer el artículo completo.

El artículo carece de citas en el cuerpo del documento, donde claramente se leen párrafos que fueron obtenidos de otros autores los cuales, sin embargo, no son citados (colocar las citas como superíndices no es adecuado para el estilo de la revista UTCI Theorema).

En la metodología se menciona que se aplicó una función escalón para el modelo matemático, justificar la razón por la cual se seleccionó esta función matemática (citar a un autor que recomiende esta función).

En la sección de control, es necesario proporcionar más trasfondo teórico al modelo del sistema de control propuesto.

Incrementar el número de referencias.

Desarrollo de una interfaz gráfica en Labview para realizar microscopía fototérmica en circuitos eléctricos flexibles.

O. Alegría Vázquez^{1*}, I. Herrera Aguilar², G. Águila Rodríguez², B. E. González Sánchez², J.J.A. Flores Cuautle².

¹Maestría en Ingeniería Electrónica, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Oriente 9 Emiliano Zapata Sur, CP. 94320, Orizaba Veracruz, México

²División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, CP. 94320, Orizaba Veracruz, México

*ova_520@hotmail.com

Área de participación: Ingeniería Electrónica.

Resumen

En la actualidad, los circuitos impresos flexibles han adquirido mayor importancia en diversos campos de innovación como el de sensores y tecnologías utilizables en vestimentas. Existen diversos métodos de inspección para conocer la calidad estructural de la manufactura de los diseños creados antes y después de ser sometidos a análisis por aplicación de estrés y así conocer el desgaste obtenido. De entre estos métodos, la técnica de microscopía fototérmica fue utilizada en este estudio para obtener información acerca de la deposición de las capas de cobre sobre el sustrato flexible del circuito. Se desarrolló una interfaz gráfica en el software Labview que, en comunicación con el instrumento de precisión Stanford Research 830 permitió adquirir y almacenar señales provenientes de un sensor piroeléctrico en contacto con la muestra en estudio. Se utilizó el efecto fototérmico para valorar cualitativamente las discontinuidades que se hacen presentes mediante la obtención de imágenes térmicas.

Palabras clave: Circuitos flexibles, Efecto fotopiroeléctrico, microscopía fotopiroeléctrica.

Abstract

Nowadays, flexible printed circuits have acquired greater importance in many fields of innovation such as sensors and technologies that can be used in clothing. There are several methods of inspection to know the structural quality of the created designs manufacture before and after of being subjected to analysis by application of stress and thus, to know the damage obtained. Among these methods, the photothermic microscopy technique was used in this study to obtain information about the deposition of the copper layers on the flexible substrate of the circuit. A graphical interface was developed in the Labview software which, in communication with the Stanford Research 830 precision instrument, allowed to acquire and store signals from a pyroelectric sensor in contact with the sample under study. The photothermal effect was used to qualitatively assess the discontinuities that are present in the thermal images.

Key words: Flexible circuit, photopyroelectric effect, photopyroelectric microscopy.

Introducción

El desarrollo de software en un entorno de desarrollo gráfico como Labview, aumenta la productividad al crear soluciones de prueba, medida y automatización a través de adquisición, análisis y visualización de datos. La automatización de un proceso de medida reduce el fallo de origen humano, minimizando el daño catastrófico sobre la instrumentación, que provoca una mala gestión en el uso de la misma. La automatización posibilita trabajar con más de un instrumento de manera simultánea y permite realizar procesos de forma continua por medio de secuencias programadas, lo que añade robustez al sistema.

Por otra parte, se reducen los tiempos de recopilación y procesamiento de la información obtenida, permitiendo un conocimiento más detallado del proceso de medida.

En la automatización de este proceso de medida, se involucra un instrumento de precisión que en particular, es capaz de detectar con el correcto sensor [Jiménez, 1995] las variaciones que produce el efecto fototérmico cuando un haz de luz modulado en frecuencia se incide sobre la muestra.

El fenómeno fototérmico es la generación de ondas térmicas por medio de un proceso de fotoinducción, es decir, absorción de luz y conversión de ésta en energía calorífica. Durante el proceso de foto-inducción, se trasfiere energía en forma de calor al sistema a través de distintas formas. El proceso en conjunto provoca cambios en el sistema y su entorno, tales como la variación de temperatura, presión y densidad, los cuales ocurren como consecuencia de los procesos de difusión térmica. Cuando el material es iluminado se genera una gran diversidad de fenómenos, que generan calor [García, 2014]. Cuando un material es iluminado por un haz de luz en amplitud, se presentan variaciones periódicas de temperatura a las cuales se les denomina ondas térmicas. Esto se debe a que muestran el comportamiento análogo de una onda.

Al incidir los fotones en un cuerpo receptor que tiene la capacidad de absorción, se produce una excitación de los electrones que lo componen. El decaimiento del electrón excitado a su estado normal se produce liberando la energía absorbida, es decir, generan vibraciones en toda la estructura del sólido, de este modo, el fotón absorbido es utilizado para aumentar la temperatura del cuerpo a través de las vibraciones de los átomos que lo componen. Así, la energía luminosa es convertida en energía térmica al incidir sobre una superficie absorbente, ilustrado en la Figura 1.

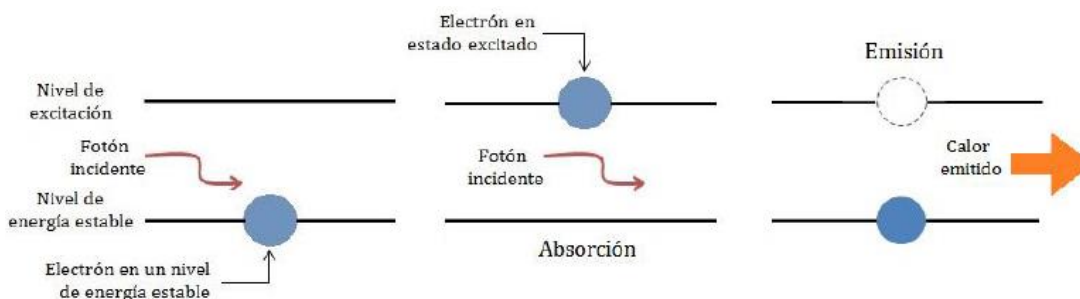


Figura 1. Efecto fototérmico.

Las técnicas fototérmicas, permiten analizar diversos fenómenos de transporte de calor. Se pueden analizar vibraciones en sólidos, líquidos y gases. Otra de las ventajas de las técnicas fototérmicas, radica en que este fenómeno se puede detectar de muy diversas formas. Dependiendo del sistema de detección se da el nombre a la técnica, en el caso concreto de este artículo, el detector o sensor piroeléctrico utilizado es una lámina de Difluoruro de Polivinilideno.

Uno de los propósitos fundamentales de las técnicas fototérmicas es el de evaluar propiedades térmicas y ópticas de los materiales [Flores Cuautle y col., 2012] dispuestos en pequeñas muestras para su análisis. Este efecto fototérmico de absorción de luz se combina con el uso de un sensor piroeléctrico, ubicado por debajo de la muestra como se indica en la Figura 2 en configuración directa [Ivanov R. y col., 2005] para detectar variaciones de temperatura que se correlacionan con las discontinuidades de fabricación buscadas.

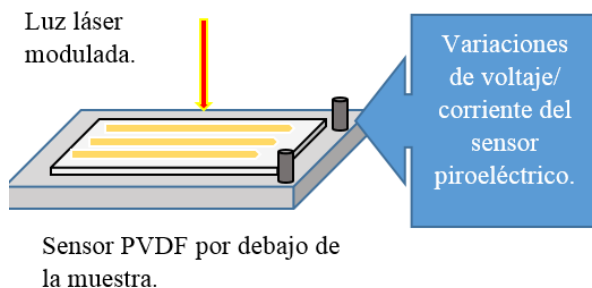


Figura 2. Sensor piroeléctrico en configuración directa.

En la industria de los circuitos impresos de cobre, las discontinuidades de fabricación son un factor de vital importancia a evitar. Existen aquellas imperfecciones que son propias de la fijación del cobre sobre el sustrato según el método de deposición. Para los sustratos rígidos es Electrodeposición de Cobre (Electrodeposited) y para los de sustrato flexible es Laminado recocido (rolled-annealed).

Tradicionalmente, las propiedades eléctricas de los materiales flexibles no eran consideradas “críticas” debido a que la flexibilidad y la adhesión de cobre era las preocupaciones primordiales [Oliver, 2014]. El incremento

dramático en los requerimientos de ancho de banda y la miniaturización de dispositivos puso en evidencia la importancia de las propiedades como la constante dieléctrica y el espesor de la pista de cobre, que dictaminan la integridad de la señal que es detectada o producida a través del circuito flexible.

Metodología

En su descripción más simple, para poder hacer microscopía fototérmica se necesita una mesa de trabajo en tres dimensiones que permita generar los movimientos para el barrido superficial con el láser. El esquema completo del montaje empleado para dicha técnica que se observa en la Figura 3, integra además elementos como la fuente de luz modulada, el sensor PVDF [Baumgärtel y col., 2016], el driver para los motores, el amplificador Lock-In Stanford Research SR-830 y una computadora para el registro de las mediciones.

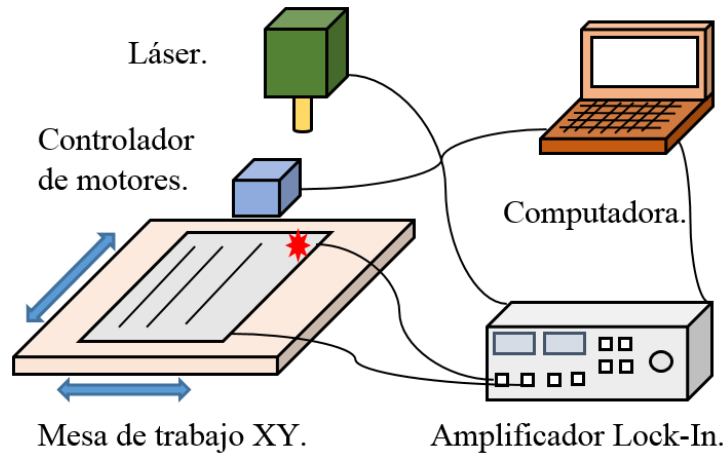


Figura 3. Esquema del equipo para microscopía fototérmica.

La aplicación fue desarrollada en Labview® para permitirle al usuario indicar las dimensiones de la muestra, la resolución de avance, la frecuencia de muestreo y que esta mostrase el conteo de mediciones calculadas y realizadas y una estimación de la duración de la prueba, lo que se aprecia en la Figura 4.

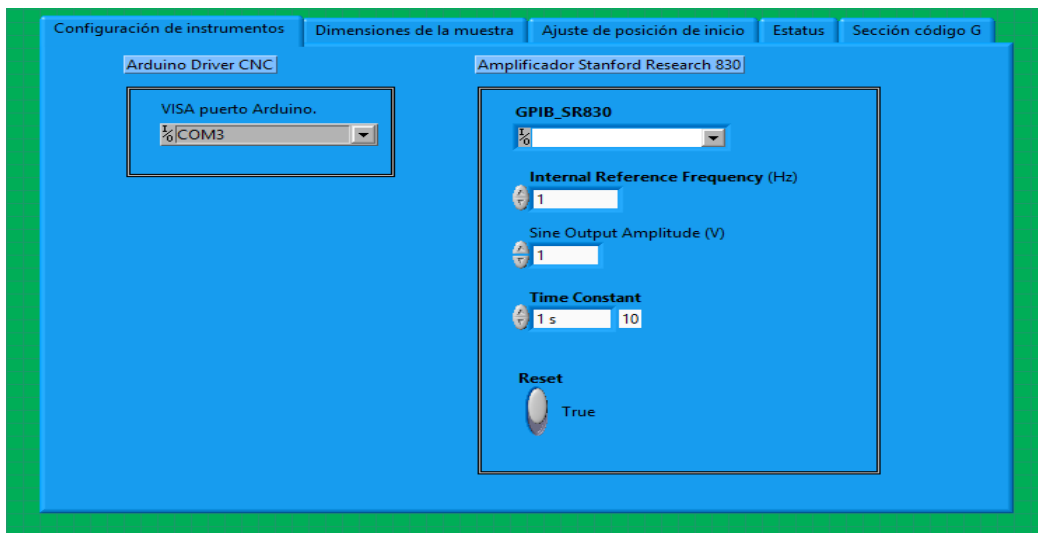


Figura 4. Vista de la interfaz gráfica para la técnica fotopiroeléctrica.

El papel fundamental de la aplicación se basa en establecer la comunicación entre el instrumento de medición mediante protocolo GPIB con la computadora al proporcionarle los parámetros de interés que su configuración necesita, como son la frecuencia de referencia interna o frecuencia de muestreo y el puerto de comunicación. Además de esta conexión, es necesario que se generen las coordenadas en las cuales el haz de luz se debe posicionar. Acorde a las dimensiones de la muestra y la resolución espacial de avance, se generan los comandos necesarios para que el driver CNC de Arduino los interprete mediante comunicación serial. Este proceso de generación de coordenadas y medición puntual es coordinado por la aplicación, como se observa en la Figura 5.

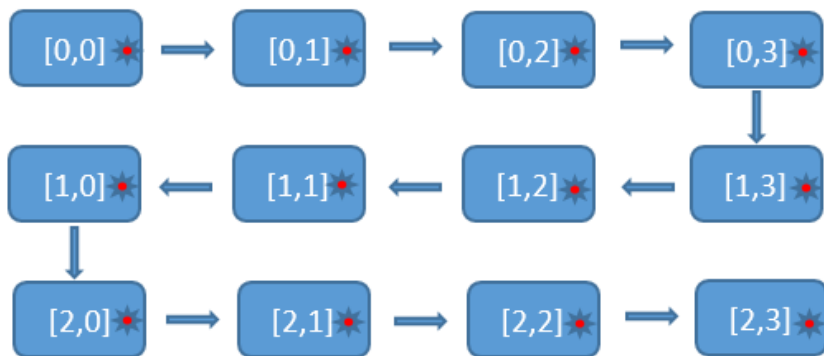


Figura 5. Esquema de generación de movimientos y adquisición de señal.

Al posicionarse en la coordenada deseada, se almacena el promedio de diez mediciones en una tabla de Excel, para su posterior conversión a información gráfica, lo que se aprecia en la Figura 6.

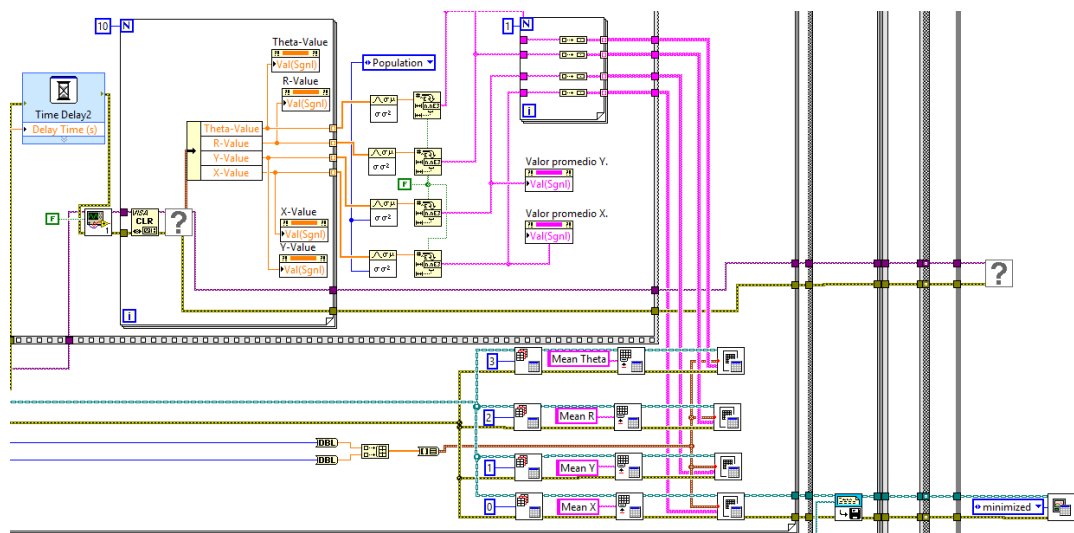


Figura 6. Programación por flujo de datos para el almacenamiento de las mediciones en Excel.

Resultados y discusión

A continuación, se muestran imágenes ópticas e imágenes térmicas de una muestra de circuito impreso flexible a la cual se le aplicó microscopía fototérmica. Para la conversión de los datos almacenados en las tablas de Excel, se utilizó el software OriginPro 8®, generando dos imágenes para cada frecuencia de muestreo, correspondientes a las Magnitud y Fase de la señal medida.

En la Figura 7 se muestra una imagen óptica obtenida desde un microscopio, del impreso flexible sobre el cual se realizó un desplazamiento en un área de 7x7 mm, con una resolución en los movimientos de los motores de 100 micras en un rango de frecuencias de 19 a 21 Hertz. La imagen muestra las tres capas del circuito flexible, la capa externa protectora, las pistas de cobre internas y el sustrato plástico sobre el cual se adhieren las pistas.

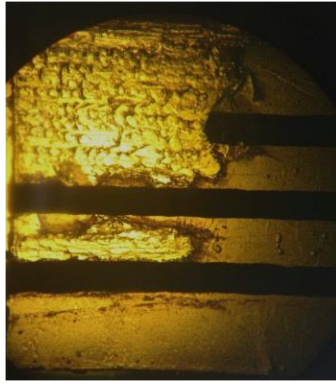


Figura 7. Imagen de la muestra vista desde el microscopio.

La escala de colores en la parte superior derecha de las Figuras 8, 9, 10, 11 y 12 indica la amplitud de la señal fotopiroeléctrica, siendo esta una representación de las distintas zonas de absorción de la muestra. La parte azulada da una señal de absorción muy baja. La parte roja representa zonas donde existe la mayor absorción de luz en la muestra en la cual se encuentra la pista.

Específicamente, la representación gráfica de Magnitud de la señal fotopiroeléctrica depende de las propiedades térmicas y ópticas, mientras que la representación de Fase proporciona una imagen puramente térmica.

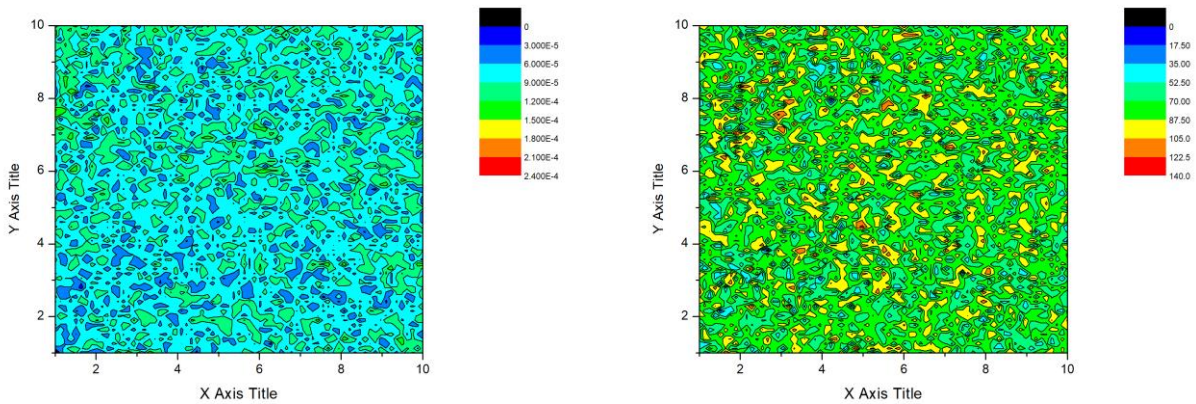


Figura 8. Representación de Magnitud y Fase con una frecuencia de muestreo de 19 Hz.

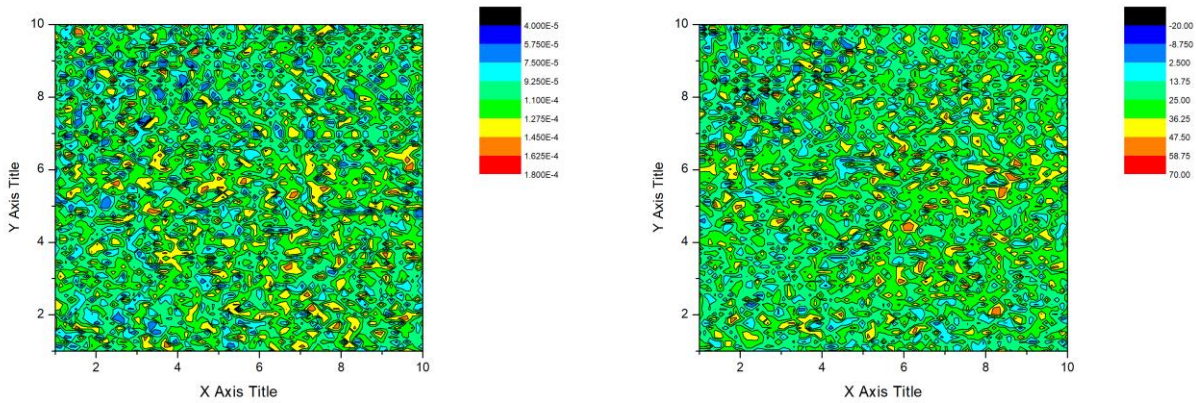


Figura 9. Representación de Magnitud y Fase con una frecuencia de muestreo de 19.5 Hz.

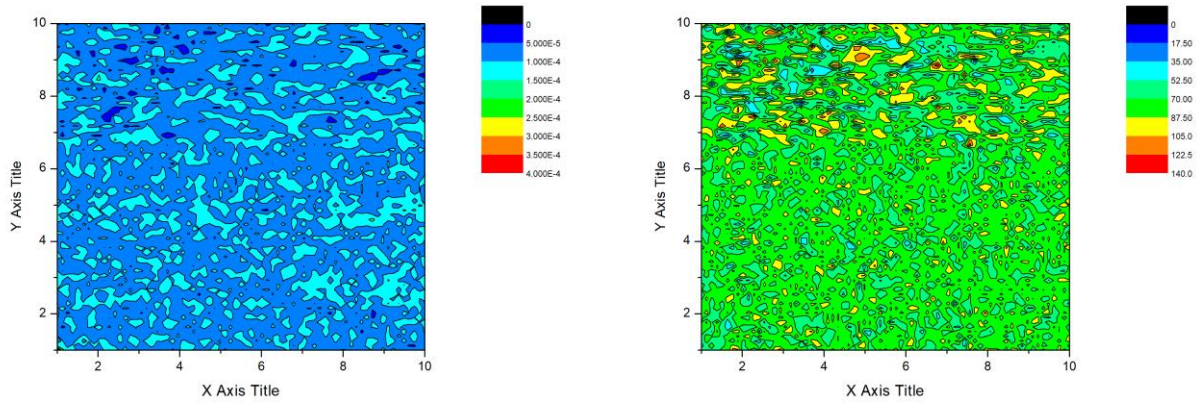


Figura 10. Representación de Magnitud y Fase con una frecuencia de muestreo de 20 Hz.

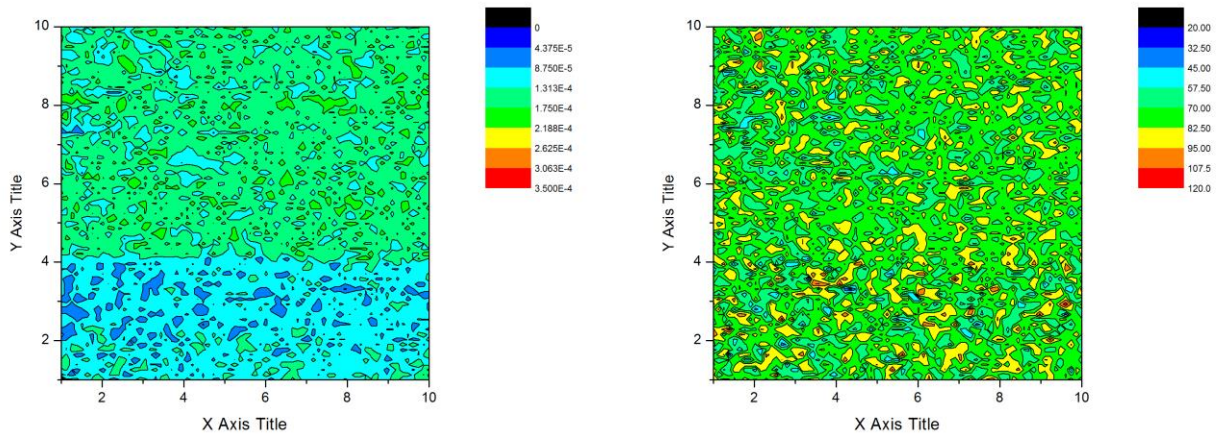


Figura 11. Representación de Magnitud y Fase con una frecuencia de muestreo de 20.5 Hz.

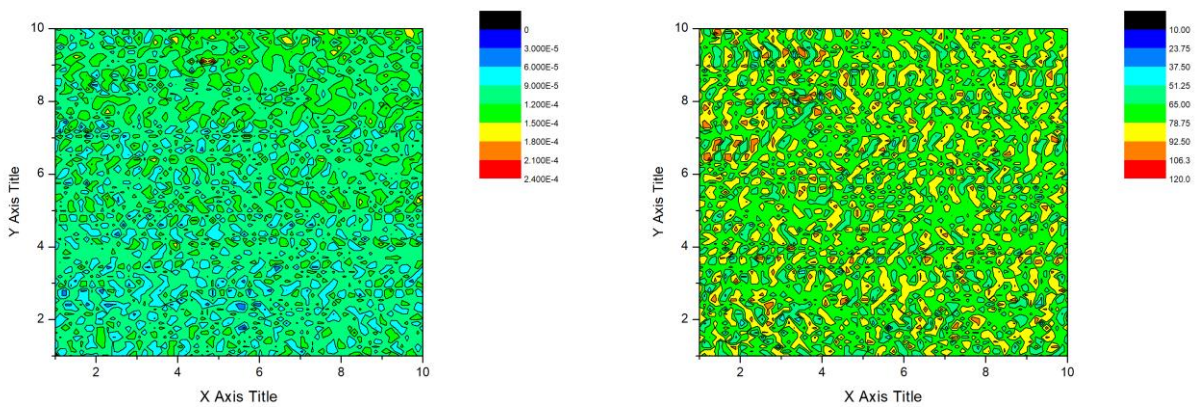


Figura 12. Representación de Magnitud y Fase con una frecuencia de muestreo de 21 Hz.

Trabajo a futuro

Otra forma de interpretar los datos obtenidos mediante la aplicación de la técnica es el de determinar, primeramente, el comportamiento térmico de la muestra definiendo mediante los modelos matemáticos la efusividad y difusividad térmica del material. Esto se logra, al realizar barridos de frecuencia con el haz modulado sobre la muestra y mediante observación estadística se puede establecer una relación entre los datos obtenidos del amplificador Lock-In, el valor Real y complejo de la señal medida cuando estos sean mayores al promedio del barrido.

La frecuencia que arroje el valor promedio más alto de estos parámetros se utiliza para determinar los parámetros térmicos antes mencionados de la muestra en particular. Lo que permitiría finalmente, un acercamiento más preciso para la frecuencia adecuada de muestreo a profundidades o espesores de la muestra de interés para el usuario. Además, se busca la miniaturización del sistema de posicionamiento y cerrar el lazo de control para el control de los motores a pasos.

Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados arrojados en las imágenes térmicas, se demostró que es posible determinar pequeñas imperfecciones en los materiales, no solo en la superficie, sino a diferentes profundidades según la frecuencia seleccionada de muestreo.

Se observó que la deposición de cobre en la sección de muestra del circuito flexible original no es homogénea. Es por eso, que en las representaciones de Magnitud a las frecuencias de muestreo de 20 y 21 Hertz respectivamente, aunque se alcanzan a visualizar patrones de distribución paralelos que corresponden a las pistas de cobre, estas no forman las líneas bien definidas en longitud y anchura que uno esperaría encontrar. Siendo estas discontinuidades un indicativo de que el espesor de estas pistas es variable.

Con las imágenes obtenidas, se pudo comprobar que mediante la medición del efecto fotopiroeléctrico acompañada del sistema de posicionamiento, se puede brindar información en forma gráfica de muestras de distintos materiales, revelando características que, con métodos de inspección visual regulares serían incapaces de observarse a simple vista. En base a estas representaciones gráficas, se sugiere trabajar de manera paralela a la investigación con metodologías y proyectos que permitan asegurar el control de calidad de circuitos impresos flexibles en su manufactura haciendo uso de nuevos materiales y procesos.

Referencias

1. Flores Cuautle J. J. A., C. O. A., Suaste Gomez E. (2012). "Photopyroelectric Microscopy of Porous Ceramics." *International Journal Thermophysics* **33**: 2139-2144.
2. García, N. A. (2014). Caracterización de propiedades térmicas de tejidos biológicos por deflexión fototérmica. Facultad e ingeniería. México, Universidad Nacional Autónoma de México. Ingeniería en comunicaciones: 67.
3. Ivanov R., M. I., Pichardo Molina J.L., Gutiérrez Juárez G., Vargas Luna M. (2005). "Elección de técnica adecuada y optimización parcial de un experimento fotopiroeléctrico." *Superficies y vacío* **18**(4): 18-20.
4. Jiménez, B. (1995). "Materiales piezoeléctricos: formas de presentación, ventajas y desventajas en las aplicaciones." *Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio* **34**(5-6): 272-276.
5. Baumgärtel K. H., D. Z., Krieger K. L. (2016). "Classification and simulation method for piezoelectric PVDF sensors." *Procedia Technology* **26**: 491-498.
6. Oliver, G. (2014). "Using Flex in High-Speed Applications." *The PCB Magazine*: 6.