



Benemérita Universidad Autónoma De Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Tesis presentada para obtener el grado de Licenciado en
Ingeniería en Mecatrónica

**DESARROLLO DE SISTEMA PARA MAPEO DE FOTOLUMINISCENCIA EN
MATERIALES SEMICONDUCTORES POR MEDIO DE LABVIEW®**

Presenta

José Manuel Cortés Romero

201512146

Directores:

Dr. Cesar Augusto Arriaga Arriaga

Dr. Gabriel Juárez Díaz

Dra. Primavera López Salazar

Marzo 2023

*“El dinero no es la clave del éxito;
la libertad para poder crear lo es”*

Nelson Mandela

Resumen

En este trabajo de tesis de Licenciatura se presenta el desarrollo e implementación de un sistema automatizado para mapeo de fotoluminiscencia, el cual permite caracterizar áreas de hasta 18 mm X 18 mm, con una resolución mecánica máxima de 10 μm , con lo que se logra ampliar las capacidades del sistema de fotoluminiscencia del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores del Instituto de Ciencias de la BUAP al permitir determinar la intensidad de Fotoluminiscencia en diferentes puntos de la superficie de materiales semiconductores.

Este documento contiene los procesos de diseño, simulación y montaje de los elementos utilizados en el sistema, los cuales están modelados por medio del software CAD SolidWorks®.

De la misma manera, se presenta el conjunto de programas desarrollados mediante LabVIEW®, en conjunto con los razonamientos realizados para el cumplimiento del objetivo.

Finalmente, este trabajo contiene las diversas pruebas de funcionamiento entre las que se encuentran el mapeo de superficies con patrón ortogonal y no ortogonal, al igual que la caracterización de muestras semiconductoras de Sulfuro de Cadmio y Silicio poroso.

Agradecimientos

Las decisiones que uno toma forman parte de una persona, pero la fortaleza de mantenerse firme en ellas, definen que tipo de persona quisiese ser.

Agradezco a mi *alma mater*, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por todos los conocimientos, oportunidades y retos que me han desarrollado como un profesionista con el deseo de ser un futuro referente de esta universidad.

Al Dr. Gabriel Juárez Díaz y la Dra. Primavera López Salazar, quienes me brindaron la oportunidad de trabajar con ellos todos estos años, acercándome a la investigación y desarrollo de proyectos demostrando su constante apoyo ante mi inexperiencia.

Al Dr. Cesar Augusto Arriaga Arriaga, el cual me impulsó a mejorar y dar continuidad a este proyecto, aun cuando el tiempo disponible pareciese limitado, presentando retos que hiciesen este trabajo una experiencia profesional satisfactoria.

Por último, agradezco al jurado revisor de este trabajo, por sus comentarios y observaciones que aportaron una mejora en este proyecto

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi madre y a mi familia, siendo ellos los que me apoyaron y amaron desde el momento que nací, incluso cuando mis actitudes no daban razones por las que seguir haciéndolo.

Al igual que a todos esos amigos que estuvieron a mi lado, que aun cuando la vida hizo que tomásemos caminos separados, nunca faltó unas palabras de aliento para poder concluir con este reto profesional.

Índice General

Resumen.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Dedicatoria	v
Índice General	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Alcances y limitaciones del sistema	4
1.3.1 Alcances.....	4
1.3.2 Limitaciones	5
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Generalidades de los semiconductores.....	6
2.1.2 Semiconductores.....	6
2.1.3 Silicio.....	8
2.1.4 Silicio Poroso.....	10
2.2 Métodos de caracterización de semiconductores.....	11
2.2.2 Técnicas de caracterización óptica	12
2.2.3 Fotoluminiscencia.....	16

CAPÍTULO 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	19
3.1 Descripción del sistema original	19
3.2 Implementación Electromecánica	22
3.2.1 Diseño de base del posicionador	22
3.2.2 Acoplamiento del sistema a mesa óptica	26
3.2.3 Diseño del sistema de referencia.	28
3.3 Desarrollo del software	32
3.3.2 Movimiento de motores	33
3.3.3 Obtención de Posición inicial	37
3.3.4 Movimiento controlado por número de pasos	40
3.3.5 Método de control de la ubicación del sistema:.....	42
3.3.6 Creación, lectura y actualización de fichero de posición	43
3.3.7 Mover a determinada posición	47
3.3.8 Programa de lectura de intensidad de fotoluminiscencia	50
3.3.9 Programa de Mapeo.....	52
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	61
4.1 Prueba posicionamiento en el origen del sistema de coordenadas... 61	
4.2 Prueba de precisión del movimiento.....	63
4.3 Prueba de efecto inercial.....	65
4.4 Efecto de la vibración sobre la muestra.....	66
4.5 Prueba de Mapeo en patrones definidos.....	67
4.6 Mapeo de fotoluminiscencia de Semiconductores.....	72
4.7 Comparación del sistema previo con el actual	77

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	79
ANEXOS	81
Diagrama de flujo programa 1 Paso sentido Horario	81
Diagrama de flujo programa 1 Paso sentido Antihorario	82
Diagrama de flujo programa Búsqueda de Microswitch	83
Diagrama de flujo programa Crear	84
Diagrama de flujo programa Leer	85
Diagrama de flujo programa Motor mover a posición	86
Diagrama de flujo programa Leer tarjeta	86
Diagrama de flujo de Programa barrido.....	87
REFERENCIAS.....	89

Lista de figuras

Figura 2.1 Bandas de conducción y valencia de un semiconductor (a) al cero absoluto (b) a la temperatura ambiente, mostrando electrones y huecos térmicamente excitados	7
Figura 2.2 Principales técnicas ópticas de caracterización en materiales semiconductores	13
Figura 2.3 Esquema de un Arreglo de fotoluminiscencia	17
Figura 2.4 Mapeo de fotoluminiscencia a oblea de Si a diferentes profundidades de absorción.....	18
Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa de mapeo de fotoluminiscencia de manera simplificada	19
Figura 3.2 Modelo del sistema original, el haz láser es representado por la línea color amarillo y la señal de FL por la línea violeta	21
Figura 3.3 Área a automatizar señalada en rojo.....	22
Figura 3.4 Acoplamiento entre posicionador micrométrico y motores a paso	24
Figura 3.5 Diseño de pieza CAD mediante SolidWorks®	25
Figura 3.6 Pieza maquinada según las especificaciones	26
Figura 3.7 Diseño de soporte para acoplamiento explosionado destacando puntos de fijación	27
Figura 3.8 El diseño de soporte para acoplamiento se alinea correctamente a los orificios guía de la mesa óptica	28
Figura 3.9 Elementos de soporte de micro switch para Motor X (Izquierda) y Motor Y (Derecha).....	29
Figura 3.10 Mínima invasión del micro switch de Motor X montado al posicionador	30

Figura 3.11 Mínima invasión del micro switch de Motor Y montado al posicionador	30
Figura 3.12 Sistema ensamblado vía software, cumpliendo con los requisitos planteados originalmente	31
Figura 3.13 Sistema físico ensamblado correctamente en la mesa de óptica.....	32
Figura 3.14 Controlador L298N de motor a pasos	35
Figura 3.15 Bloque sentido Horario.....	37
Figura 3.16 Bloque de Búsqueda de micro switch o posición inicial	39
Figura 3.17 Interfaz del programa de Motor N X 4 Pasos	41
Figura 3.18 Bloque de Motor N X 4 Pasos	42
Figura 3.19 Función Open/Create/Replace (National instruments, 2022)	44
Figura 3.20 Bloque de Crear	45
Figura 3.21 Actualización del bloque Búsqueda de microswitch	46
Figura 3.22 Bloque de Leer.....	47
Figura 3.23 Interfaz de bloque Motor mover a posición	49
Figura 3.24 Bloque de Motor mover a posición	50
Figura 3.25 Bloque de Leer Tarjeta.....	52
Figura 3.26 Bloque de Programa barrido	58
Figura 3.27 Interfaz final.....	59
Figura 3.28 Diagrama eléctrico del sistema	60
Figura 4.1 Comparativa de la separación simulada vía software contra implementación mecánica.....	62
Figura 4.2 Prueba de efecto inercial.....	66
Figura 4.3 Mapeo con longitud de onda 520nm de una hoja milimétrica	68

Figura 4.4 Segundo mapeo con longitud de onda 520nm de hoja milimétrica, destacando formación de las líneas en las ubicaciones esperadas	69
Figura 4.5 Montaje de la muestra a mapear como prueba de mapeo de figuras no ortogonales.....	70
Figura 4.6 Mapeo con longitud de onda 455nm de logotipo de la BUAP como prueba de figuras no ortogonales.....	71
Figura 4.7 Mapeo con longitud de onda 650nm de muestra de silicio poroso obtenida de forma manual previo a la automatización del sistema, siguiendo la escala del lado izquierdo.....	72
Figura 4.8 Mapeo con longitud de onda 650nm de muestra de silicio poroso obtenida de forma automatizada con incrementos de 2mm.....	73
Figura 4.9 Mapeo con longitud de onda 650nm de muestra de silicio poroso obtenida de forma automatizada con incrementos de 400 μm	74
Figura 4.10 Imagen de la película de Sulfuro de Cadmio.....	75
Figura 4.11 Mapeo con longitud de onda 770nm de muestra de Sulfuro de Cadmio	76
Figura 4.12 Implementación del sistema actual, el haz láser es representado por la línea color violeta y la señal de FL por la línea amarilla	77

Lista de tablas

Tabla 2.1 Abundancia de silicio y otros elementos en algunos reservorios de la corteza terrestre	9
Tabla 2.2 Propiedades de los semiconductores que pueden ser determinadas por métodos ópticos.	15
Tabla 3.1 Secuencia de polarización de motor a pasos NEMA 17 para sentido horario, donde “1” Representa que la bobina se encuentra energizada y “0” no energizada.....	34

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Se puede definir a los semiconductores, como los materiales capaces de cambiar su nivel de conductividad similar a la de un conductor o un aislante, dependiendo de diversos factores aplicados, como el campo eléctrico, la temperatura o la radiación de luz, entre otros. (Orozco Cuautle, 2012)

Por estas características, los semiconductores son los materiales adecuados para la fabricación de dispositivos para la opto- y microelectrónica, siendo así, que el estudio de las propiedades de estos materiales es útil tanto para desarrollar nuevos dispositivos como para mejorar los existentes. (Juárez Díaz, 2004)

La técnica de fotoluminiscencia (FL) es un método utilizado para estudiar las propiedades ópticas en los materiales semiconductores, brindando información sobre los niveles de energía posibles dentro del semiconductor como: gap del material y niveles de impurezas, entre otros. Esta técnica consiste en medir la luz emitida por un material excitado por una fuente de luz con mayor energía que la del ancho de banda prohibida del material semiconductor, la cual produce pares electrón-hueco dentro del material, que al recombinarse liberan fotones. En otras palabras, la fotoluminiscencia es la radiación óptica emitida por un sistema físico resultado de la excitación a un estado fuera de equilibrio por la radiación con luz. (Bebb & Williams, 1972)

Debido a que es una técnica espectroscópica no destructiva que proporciona información sobre las propiedades ópticas de los materiales semiconductores, la medición de la fotoluminiscencia en semiconductores es uno de los métodos de caracterización de importantes parámetros ópticos del material, tales como el ancho

de banda prohibida, longitud de onda de emisión, calidad cristalina, defectos y otras propiedades involucradas con las transiciones radiativas que se presentan en el semiconductor. (Schroder, 2006)

La Real Academia Española define la palabra mapear como la forma de localizar y representar gráficamente la distribución relativa de las partes de un todo (Real Academia Española, 2020). Al referirnos a un mapeo de FL, hablamos de representar gráficamente la intensidad de luz emitida a lo largo del área de una muestra a analizar, con lo cual podemos determinar la homogeneidad de impurezas halladas en el mismo, al igual que posibles defectos o impurezas que tenga.

El mapeo de FL es una técnica que permite generar proyecciones de las señales ópticas emitidas por la superficie de un material semiconductor, al excitarlo con una energía mayor a la de su ancho de banda prohibida, con el propósito de obtener información de la calidad óptica del material, variaciones en su composición y uniformidad de los parámetros en un área estudiada.

Debido a la relación de tamaño que hay entre el haz de luz utilizado en los análisis de FL y una muestra a estudiar, realizar un mapeo de FL de manera manual, resultaría una tarea repetitiva y tediosa para el usuario, por lo que la implementación de un sistema automatizado capaz de reducir el tiempo, al igual que posibles errores humanos, es indispensable para una correcta implementación de este sistema.

Por esta razón, el uso de un software capaz de satisfacer las necesidades planteadas para un mapeo de FL y la posibilidad de migración a nuevos sistemas operativos resulta de suma importancia en el desarrollo de este proyecto. LabVIEW® es un software de ingeniería utilizado comúnmente en aplicaciones que requieren

pruebas, mediciones y control de datos (National Instruments, 2021). Por estas razones y por su versatilidad al momento de conjuntar aplicaciones de software y Hardware, resulta un candidato optimo capaz de ofrecer la solución deseada.

Para finalizar, como se ha expresado anteriormente, debido a las diversas áreas que conlleva este proyecto, la mecatrónica permitirá realizar la recolección de las señales de FL en un área de material o dispositivo semiconductor para obtener el mapeo al combinar sus ramas principales de estudio: mecánica, control y electrónica; proporcionando una oportunidad de desarrollo en el área de caracterización de semiconductores.

1.1 Justificación

En el centro de semiconductores (CIDS-ICUAP) se ha realizado la caracterización por fotoluminiscencia (FL) desde el año 2004, observando que las mediciones realizadas en algunas muestras de materiales semiconductores, y en particular de silicio poroso, presentan variaciones en la intensidad de fotoluminiscencia respecto al lugar de la muestra donde se realiza el análisis. Por esta razón, surgió la duda acerca de la homogeneidad de la superficie de la muestra analizada y se encontró que las muestras de silicio poroso presentan irregularidad en su superficie debido a que la reacción química para su obtención es más rápida en unas zonas que en otras y que esto no es visible por su morfología superficial, por lo que la medición de fotoluminiscencia revela cambios en la emisión de luz debidos a propiedades internas de los materiales.

Tomando en cuenta lo anterior mencionado se propone en este trabajo el desarrollo de un dispositivo capaz de obtener el valor de fotoluminiscencia en una serie de puntos de manera sistemática en un área definida, para que después estos sean presentados de manera grafica mediante el uso de software y esta forma se

pueda realizar análisis más profundos permitiendo la búsqueda de desarrollo de materiales semiconductores de mejor calidad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Desarrollar un sistema automatizado capaz de realizar un mapeo de FL haciendo uso de una interfaz gráfica mediante el software LabVIEW®.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y maquinar las piezas para adaptar el mecanismo de posicionamiento utilizando el software de diseño SolidWorks®
- Desarrollar un programa para control de mecanismo de movimiento y captura de datos usando LabVIEW®
- Posicionar el haz de luz sobre una muestra de referencia de manera controlada mediante la interfaz de LABVIEW®.
- Verificar el funcionamiento del sistema completo, obteniendo un mapeo gráfico de una muestra de silicio poroso como resultado.

1.3 Alcances y limitaciones del sistema

Se considera que el sistema propuesto tiene los siguientes alcances y limitaciones que son detallados en los siguientes puntos.

1.3.1 Alcances

- Realizar mediciones de fotoluminiscencia sobre un área rectangular, permitiendo determinar la intensidad de fotoluminiscencia de diferentes puntos de la superficie de una manera detallada
- Garantizar reproducibilidad de resultados mediante el posicionamiento automatizado en puntos específicos de la muestra
- Dadas las características mecánicas del sistema, alcanzar una resolución de movimiento máxima de 2.5 micrómetros por paso.

1.3.2 Limitaciones

- El área de mapeo está limitada por la movilidad otorgada por el dispositivo posicionador utilizado, es decir 18mm X 18mm
- La velocidad del dispositivo se encuentra limitado por la tarjeta de adquisición de datos utilizada y el tiempo en realizar la captura de datos en cada punto
- El ruido en conjunto con la intensidad obtenida en áreas de baja fotoluminiscencia afecta considerablemente los valores obtenidos en esos puntos
- A pesar de la alta resolución de movimiento mecánico alcanzado por el sistema, el diámetro del spot del láser limita la resolución máxima de este a decenas de micrómetros

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades de los semiconductores.

En la actualidad, la importancia de los semiconductores se manifiesta a simple vista en áreas como la computación y telecomunicaciones, sin embargo, estos materiales también han servido de soporte para el desarrollo de diversas áreas en general, tal como el área de la salud, ciencias económico-administrativas y la ingeniería.

Por esta razón la búsqueda de métodos de evaluación de propiedades que puedan producir materiales de mejor calidad, a su vez, que permitan reducir costos, resulta un factor fundamental para mejorar los materiales semiconductores. Empresas como Hewlett-Packard, en su división de Optoelectrónicos, han desarrollado su propio sistema de mapeo de fotoluminiscencia para evaluar la uniformidad y calidad de los materiales epitaxiales semiconductores III-V de sus arreglos de diodos emisores de luz (LED) obteniendo una reducción de costos en líneas de manufactura de alto volumen. (Imler, 1995)

2.1.2 Semiconductores

Los semiconductores, de acuerdo con su nivel de resistencia, se encuentran entre los conductores y los aislantes, ya que a temperaturas muy bajas difícilmente conducen la corriente eléctrica y más bien se comportan como aislantes, pero, al elevar su temperatura o al ser sometidos a un campo eléctrico externo, su comportamiento cambia al de los conductores. (Farrera, 2008)

El semiconductor es una substancia cristalina que tiene una estructura de bandas de energía en la que una de esas bandas de estados electrónicos, completamente llena en un estado no excitado, se separa de otra que está totalmente vacía, por medio de una región angosta de energías prohibidas.

Esta estructura se muestra en la Figura 2.1(a). cuando el material se encuentra en el cero absoluto, el semiconductor actúa como un aislador perfecto, ya que no cuenta con bandas parcialmente llenas. Sin embargo, al ser expuesto a temperaturas más altas, algunos electrones de la banda de valencia pueden adquirir la suficiente energía para excitarse a través de la banda prohibida con el fin de convertirse en electrones de conducción en la banda de conducción que hasta entonces estaba vacía. Los estados vacíos que quedan en la banda inferior o de valencia pueden contribuir también a la conductividad, comportándose como huecos positivamente cargados. Es evidente que el número de electrones de conducción y el número de huecos debe elevarse, por tanto, la conductividad eléctrica también aumenta. (McKelvey, 1996)

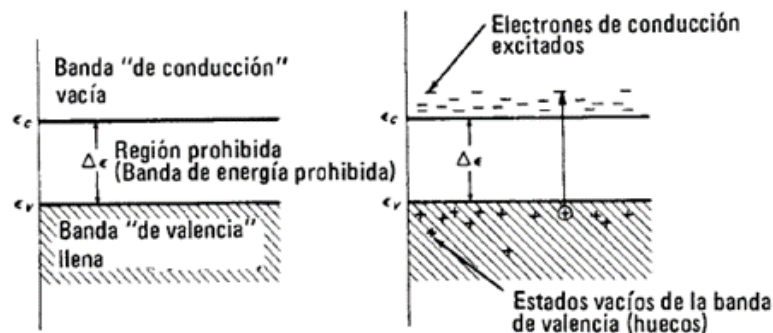


Figura 2.1 Bandas de conducción y valencia de un semiconductor (a) al cero absoluto (b) a la temperatura ambiente, mostrando electrones y huecos térmicamente excitados

Nota. Fuente McKelvey, 1996

Siendo esta la principal razón de su uso en aplicaciones de electrónica tal como transistores, fotoceldas, reguladores de voltaje y dispositivos de conmutación, esto se logra mediante el uso de tecnologías de crecimiento de cristales semiconductores, destacando el Germanio y Silicio como materiales principales,

consiguiendo pureza y cristalinidad a un grado mucho mayor que la obtenida en metales conductores y otros aislantes.

Por otra parte, actualmente existen métodos de fabricación de materiales con características eléctricas específicas, introduciendo de manera controlada *impurezas* a los semiconductores, a este proceso lo llamamos dopado.

Los semiconductores son clasificados dependiendo de la respuesta al entorno físico en que se encuentren y pueden ser de dos tipos:

- Aquellos semiconductores que impiden el movimiento libre de los electrones a menos de que sean expuestos a un aumento de temperatura, son llamados **semiconductores intrínsecos**
- Por otra parte, los **semiconductores extrínsecos**, son aquellos que, a través de un proceso de dopaje, permiten el paso de los electrones si se les induce una diferencia de potencial eléctrico. Estos a su vez se subdividen en dos tipos:
 - Aquellos donde los electrones superan en número a los huecos o portadores de carga libre, se les conoce como **Semiconductores extrínsecos tipo N o Donadores.**
 - Por otra parte, cuando los huecos superan la cantidad de electrones disponibles, se les conoce como **Semiconductores extrínsecos tipo P o Aceptores.**

2.1.3 Silicio

El silicio (Si) es un elemento con número atómico 14 de la tabla periódica, el cual, tal como se puede observar en la Tabla 2.1, constituye el 27.7% de la Litósfera, siendo el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, sin embargo, no es posible encontrarlo como un elemento puro, si no en forma compuesta, tal

como el dióxido de silicio (SiO_2) y los silicatos. (Ramírez González & García Salgado, s.f.)

Tabla 2.1 Abundancia de silicio y otros elementos en algunos reservorios de la corteza terrestre

Elemento	Litósfera (%)	Biota (%)	Cultivos (%)
Si	27.7	0.03	0.1-10
O	47.4	24.9	45-47
H	1.5	49.8	-
C	0.48	24.9	48-50
N	0.03	0.27	0.5-6
Ca	4.1	0.07	0.1-6
K	2.1	0.05	0.8-8
Mg	2.3	0.03	0.05-1
P	1	0.03	0.15-0.5
S	0.26	0.17	0.1-1.5
Al	8.2	0.02	0.00001-0.05

Nota. Fuente: Raya Pérez & Aguirre Mancilla, 2012

El SiO_2 es el principal componente de la arena, pero también es común encontrarlo entre los minerales que conforman las rocas volcánicas además de algunos seres vivos, pero utilizando métodos de fabricación especializados es posible separar y purificar el elemento del Silicio para formar con ello lingotes del material. Tras sintetizarlo, este es cortado y pulido para obtener láminas delgadas conocidas como Obleas de silicio, convirtiéndose así como la materia prima de la microelectrónica.

Desde aproximadamente mediados del siglo XX, el Silicio, se le ha hecho uso en aplicaciones de la industria electrónica y computacional, especialmente como la base para la fabricación de microchips computadoras, memorias y transistores, aunque actualmente también se le encontrado un profundo interés en la industria

energética para la fabricación de Celdas solares Fabricadas con este elemento. (Raya Pérez & Aguirre Mancilla, 2012)

2.1.4 Silicio Poroso

El Silicio poroso (*SiP*) o también conocido como fibras cuánticas de silicio, son nanoestructuras resultantes tras el ataque electroquímico del silicio cristalino en disoluciones de ácido fluorhídrico (HF), y ha sido motivo de un gran número de investigaciones desde el descubrimiento de su emisión fotoluminiscente. Este material fue obtenido por primera vez en los laboratorios Bell en 1956 por Ulhir, al estudiar el electro pulido del silicio y el germanio en disoluciones de HF. Pero fue hasta la década de los 80's que el *SiP* obtuvo mayor interés en la industria microelectrónica por sus características como material dieléctrico. (Recio Sánchez, 2013)

Sin embargo, es considerado que el *SiP* fue redescubierto en 1990 cuando Canham demostró fotoluminiscencia visible (en el rojo, 1,4-1-6 eV) a temperatura ambiente con tiempos de 1,2 y 6 horas de electro pulido. (Rosas Díaz & Delgado, 2012)

Por este redescubrimiento, además de la facilidad con la que se obtiene la capa de óxido y la calidad del óxido formado, es la razón de la ardua investigación en torno a la luminiscencia del silicio poroso; sin embargo, la morfología de la capa porosa resultante depende de los parámetros del proceso de fabricación, tal como la corriente, la concentración del electrolito y las condiciones de iluminación, siendo estas las que determinan las características y formas de los poros, es por eso que los investigadores se encuentran tratando de optimizar este proceso para múltiples aplicaciones.

La forma y el tamaño de los poros afectan la manera en que los electrones o la luz viajan a través del material, por lo que pueden obtenerse propiedades electrónicas y ópticas singulares (Ramírez González & García Salgado, s.f.). Debido a esto, podemos clasificar al Silicio Poroso de la siguiente forma:

- Cuando los poros obtenidos son menores a 2nm es llamado **micro poroso**, siendo utilizado en aplicaciones como microfiltros y micro capacitores
- Cuando la medida de los poros se encuentra entre los 2 y 50 nm se le conoce como **meso poroso** y estos son encontrados en el campo de los sensores, debido a la capacidad de reaccionar químicamente en la superficie de los poros.
- Por último, cuando los poros son mayores a 50nm, se les cataloga como **macro porosos**, siendo estos especialmente usados en el desarrollo de materiales fotónicos.

Dependiendo del grosor de los poros formados, así como las características de su superficie, la fotoluminiscencia del *SiP*, con las condiciones adecuadas, puede variar desde rojo hasta azul.

2.2 Métodos de caracterización de semiconductores

Al igual que en otros materiales, para poder entender el comportamiento de los semiconductores ante su entorno, es necesario aplicar métodos que ayuden a cuantificar ciertos parámetros de estos.

Para ello, se hacen uso de técnicas de caracterización especiales, que, aunque en su mayoría resultan no destructivas, algunos procedimientos de análisis requieren que el material sea procesado, y en el peor de los casos, destruido.

En el siguiente capítulo se hablará un poco de los métodos ópticos utilizados para analizar estos materiales, su principio de funcionamiento y las ventajas que conlleva la aplicación de estos.

2.2.2 Técnicas de caracterización óptica

Entender y registrar las propiedades de los sólidos a partir de los átomos que lo constituyen, es uno de los principales objetivos de la física de la materia condensada, siendo las mediciones ópticas una de las formas tradicionales para lograr el entendimiento de las propiedades de los átomos, convirtiéndose posteriormente en una de las herramientas más poderosas para obtener las propiedades ópticas y electrónicas de los semiconductores. (Ariza Calderón, 2003)

Las mediciones ópticas han adquirido esa relevancia debido a que la mayoría de las veces no requieren el contacto con la muestra y esta a su vez necesita una mínima preparación para la realización del estudio, además de que los componentes necesarios para llevar a cabo su instrumentación se encuentran disponibles comercialmente, y es común encontrarlos ya para procesos automatizados.

Para poder aplicar estas técnicas de medición óptica se hace el uso del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las últimas regiones del infrarrojo, donde la relación entre la energía y la longitud de onda se presenta en la ecuación 2.1.

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.2397 * 10^3}{\lambda(nm)} = \frac{1.2397 * 10^3}{\lambda(\text{Å})} = \frac{1.2397}{\lambda(\mu m)} [eV] \quad \text{ec. 2.1}$$

Siendo λ la longitud de onda en sus unidades más comunes y hv como energía resultante.

Ahora bien, podemos categorizar las mediciones ópticas en tres tipos:

- Llamamos mediciones **Fotométricas** cuando se mide la amplitud de la luz reflejada o transmitida
- Cuando se mide la fase de reflexión o transmisión de luz, las llamamos mediciones de **interferencia**
- Por último, cuando medimos la elipticidad de la luz reflejada se le conoce como mediciones de **polarización**

A su vez, los subcategorizamos en 4 tipos de métodos de caracterización: emisión, reflexión, absorción y transmisión. Las principales técnicas ópticas son presentadas a continuación en la Figura 2.2 donde se nombra como $h\nu$ a la energía proporcionada al material para la realización del estudio indicado.

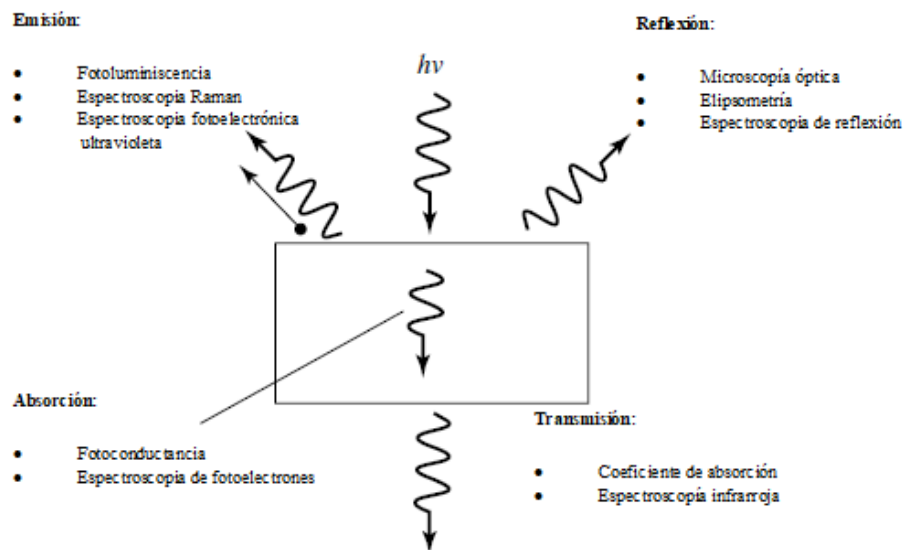


Figura 2.2 Principales técnicas ópticas de caracterización en materiales semiconductores

Fuente: Schroder, 2006

Si bien, al combinar diversos métodos ópticos y no ópticos, es posible reforzar los resultados obtenidos en cada estudio, los factores como el costo y que tan factible resulte aplicar cada uno, son elementos que considerar al momento de realizar una caracterización.

Un ejemplo claro de esto es que las mediciones ópticas que se basan en la absorción y transmisión presentan inconvenientes al momento de realizarse en materiales de gran grosor, debido a la poca longitud de penetración de la radiación óptica, por ello es necesario el uso de películas delgadas del material sobre sustratos transparentes.

Como podemos ver en la Tabla 2.1, existen tres técnicas ópticas de emisión que cubren un amplio rango de aplicaciones en la ciencia y la tecnología como métodos de caracterización, dispersión de Raman, espectroscopia infrarroja y fotoluminiscencia (FL), destacando esta última, como una de las más simples y completas que hay.

Tabla 2.2 Propiedades de los semiconductores que pueden ser determinadas por métodos ópticos.

Propiedad del semiconductor	Método óptico		
	FL	Ranman	IR
Bandas			
Banda de energía prohibida	*		*
Masa efectiva			*
Corrimiento de la banda	*		
Portadores libres			
Concentración		*	*
Movilidad		*	*
Tiempo de dispersión		*	*
Resistividad		*	*
Red			
Composición	*	*	*
Orientación		*	
Calidad del cristal	*	*	
Tensión	*	*	
Impurezas y defectos			
Presencia y tipo	*	*	*
Concentración	*	*	*
Microestructura			
Espesor de la capa			*
Comportamiento superficial	*	*	
Comportamiento interfacial	*	*	*
Comportamiento capa por capa			*
Otro			
Mapeo de Homogeneidad	*	*	*

Nota: Fuente Juárez Díaz, 2004

2.2.3 Fotoluminiscencia

Conocemos a la fotoluminiscencia (FL) como la radiación óptica emitida por un sistema físico resultado de la excitación a un estado fuera de equilibrio por la radiación con luz. (Bebb & Williams, 1972)

La FL, también conocido como fluorometría, otorga una técnica no destructiva para la determinación de ciertas impurezas en los semiconductores, además de ser utilizada para otorgar resultados relacionados con las propiedades intrínsecas y extrínsecas de los semiconductores. (Dean, 1982)

Esta, a pesar de ser usada para la detección de impurezas en niveles poco profundos, también puede ser aplicada a niveles profundos siempre que su recombinación sea radiativa. (Schroder, 2006)

Esta técnica es una de las más simples y utilizadas para estudiar propiedades ópticas en semiconductores, y consiste en medir la luz emitida por un material excitado por otra fuente de luz, lo cual produce pares electrón-hueco dentro del material; por lo que la luz emitida otorga información sobre los estados de más baja energía: gap del material y los niveles de impurezas.

Siendo la razón por la cual, la identificación de impurezas resulta muy precisa utilizando este método, es porque la resolución de la energía es bastante alta. Sin embargo, las mediciones de la densidad de dopado resultan más difíciles de obtener, debido a que encontrar una relación entre la intensidad de FL y la densidad es complicado, ya que pueden resultar variaciones entre muestra y muestra.

En la Figura 2.3, se puede observar de manera simplificada un arreglo básico para análisis de fotoluminiscencia, donde, para la obtención de resultados más completos se desea que las mediciones sean realizadas a bajas temperaturas, posicionando la muestra en un criostato y enfriándolo a través del uso de helio líquido, reduciendo térmicamente al mínimo la activación de procesos de recombinación no radiativos durante la medición.

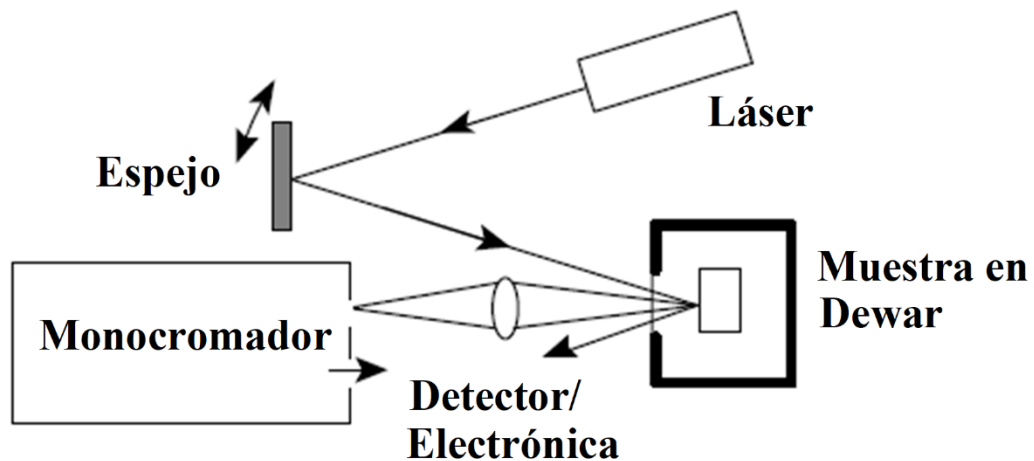


Figura 2.3 Esquema de un Arreglo de fotoluminiscencia

Fuente: Schroder, 2006

Cabe aclarar que la aplicación de esta cámara de temperatura en las mediciones de FL, especialmente en el Silicio, no ayuda a identificar impurezas, si no que proporciona información específica del dopaje de la muestra.

Sin embargo, el arreglo mostrado tiene como limitante el análisis punto a punto de las muestras, factor que limita el procesamiento de obleas enteras para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, siendo necesario una opción que

ofrezca un análisis completo de áreas, al mismo tiempo que brindar un mayor rendimiento potencial de este tipo de estudios. (C.J.L. Moore, 1990)

Dada esta necesidad, al realizar un mapeo de fotoluminiscencia, se puede obtener información importante del material, tal como el nivel y uniformidad del dopaje y de la aleación ternaria, además de la uniformidad del pozo cuántico. (K.J.P. Jacobs, 2015)

Para ello, los resultados de un mapeo de FL tienen como factor determinante, la profundidad de absorción de la fuente de luz, al igual que la longitud de difusión de los portadores minoritarios, tal como se observa en la Figura 2.4, donde la longitud de onda permite una mayor o menor profundidad de absorción en el material. Mientras que en la Fig. 2.3 (a) se aplica una longitud de onda $\lambda = 0.532 \text{ nm}$ da como consecuencia una profundidad de absorción de $1 \mu\text{m}$ donde se observa una aparente uniformidad en la distribución de la muestra, por otra parte, en la Fig. 2.3 (b) logramos una mayor profundidad de absorción ($9 \mu\text{m}$) utilizando un $\lambda = 827 \text{ nm}$ mostrando de manera más evidente variaciones de dopado halladas en la muestra.

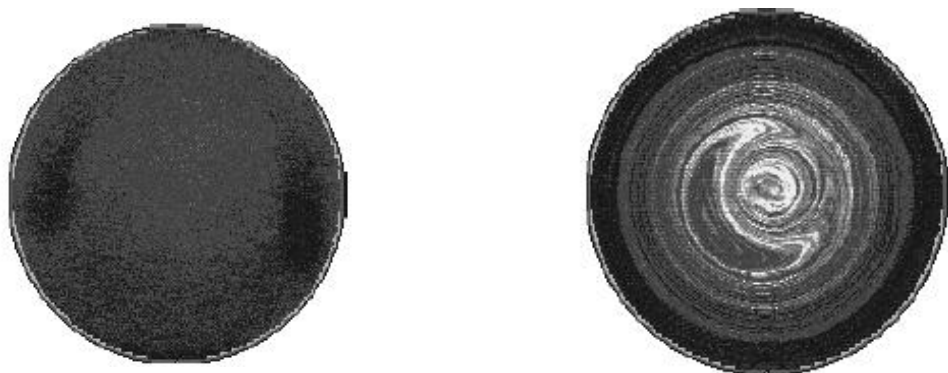


Figura 2.4 Mapeo de fotoluminiscencia a oblea de Si a diferentes profundidades de absorción

Fuente: Schroder, 2006

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

El siguiente trabajo de investigación está enfocado en la caracterización automatizada de superficies semiconductoras mediante el uso de técnicas de fotoluminiscencia. Para lograr esto, en la Figura 3.1 se muestra un diagrama general del procedimiento utilizado en la etapa experimental.

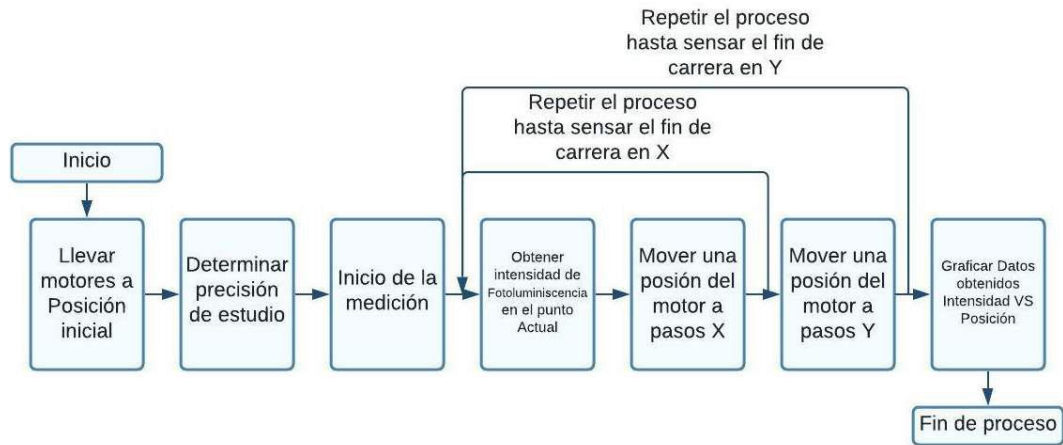


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa de mapeo de fotoluminiscencia de manera simplificada

3.1 Descripción del sistema original

Para describir el sistema, es necesario descomponerlo en una serie de elementos que redirigen y enfocan la fuente de luz o laser, de manera concentrada a una muestra, y la emisión de fotoluminiscencia resultado de esta excitación, redirigido hacia un monocromador y detector que lo que permite analizar las emisiones obtenidas de la muestra.

Para este primer proceso planteado, del láser a la muestra, se inicia con una rueda de filtros ópticos pasa-bandas siguiente al laser, por los cuales se bloquean o transmiten longitudes de onda específicas, dejando pasar solo la longitud de onda principal del láser; después de este se sigue por un par de espejos alineados verticalmente con ciertos grados de libertad que redirigen el láser y otorgan un cierto ángulo de incidencia con el cual impactará a la muestra de análisis, para después ser enfocado de manera efectiva mediante un lente ajustado al mismo ángulo de salida de los espejos. Finalmente, el haz, pasa por un Chopper óptico el cual convierte el láser en una serie de pulsos cuadrados con una frecuencia definida, con la cual se podrá diferenciar aquellas señales de ruido que puedan entrar al sistema, de la fuente de luz principal.

Tras completar estas etapas, el haz de luz impacta la muestra en un punto fijo, el cual era definido manualmente, de manera imprecisa, dando como resultado posibles variaciones el momento de realizar análisis de manera repetida, puesto que la muestra al no ser homogénea, la ubicación donde impacté el láser podrá definir mejores o peores resultados en los análisis. Es por ello por lo que es necesario un barrido sistemático bien definido, que proporcione al usuario la posibilidad de ubicar un punto de mayor eficiencia, o sea el caso, un punto que otorgue un valor nominal del conjunto de valores obtenidos en un todo.

Después de que la muestra emite fotoluminiscencia, esta emisión es captada y redirigida mediante un espejo ubicado arriba del porta muestras, hacia un lente que colecta esta señal de FL para luego ser enfocada hacia un filtro previo al monocromador mediante un segundo lente. Este último filtro, mejor conocido como pasa-altos, evita que la longitud de onda del láser penetre directo al monocromador debido a que puede distorsionar los resultados o saturar el detector de salida.

Una vez que la señal de FL entra al monocromador, esta descompone el resultado en diferentes longitudes de onda, que permitirán un análisis de todo el espectro, el cual es obtenido y transmitido al ordenador, mediante el uso de un fotodetector en la salida del monocromador.

Todo el recorrido explicado para obtener una señal de fotoluminiscencia es ejemplificado en la Figura 3.2, donde se separan las etapas mencionadas en diferente color.

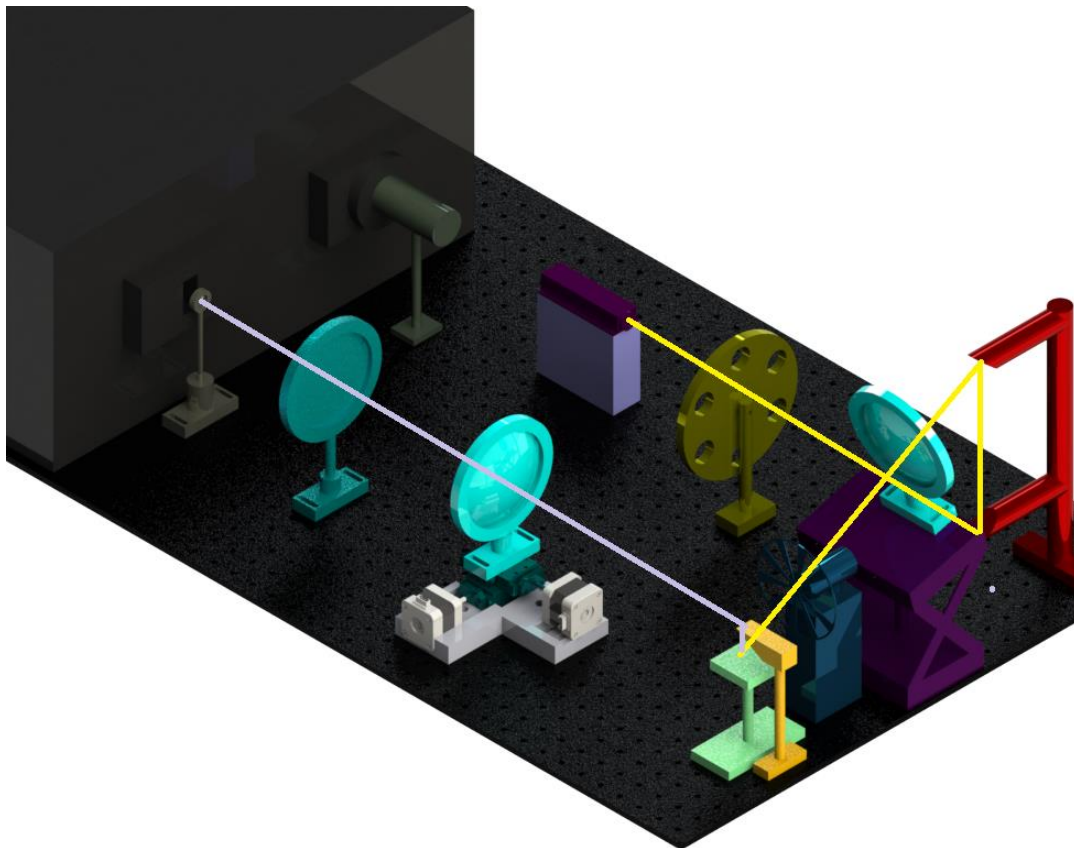


Figura 3.2 Modelo del sistema original, el haz láser es representado por la línea color amarillo y la señal de FL por la línea violeta

Explicado de esta manera el principal problema del sistema, y la importancia de cada uno de los elementos de este, es posible determinar el área de mejora que se desea automatizar y por lo tanto será el área de estudio en este trabajo de investigación. Esta mejora del sistema debe ser considerada como una adición al mismo, no la creación de un sistema desde cero, por lo tanto, este trabajo se enfoca a describir el proceso de automatización que se llevó a cabo en el área marcada en la Figura 3.3.

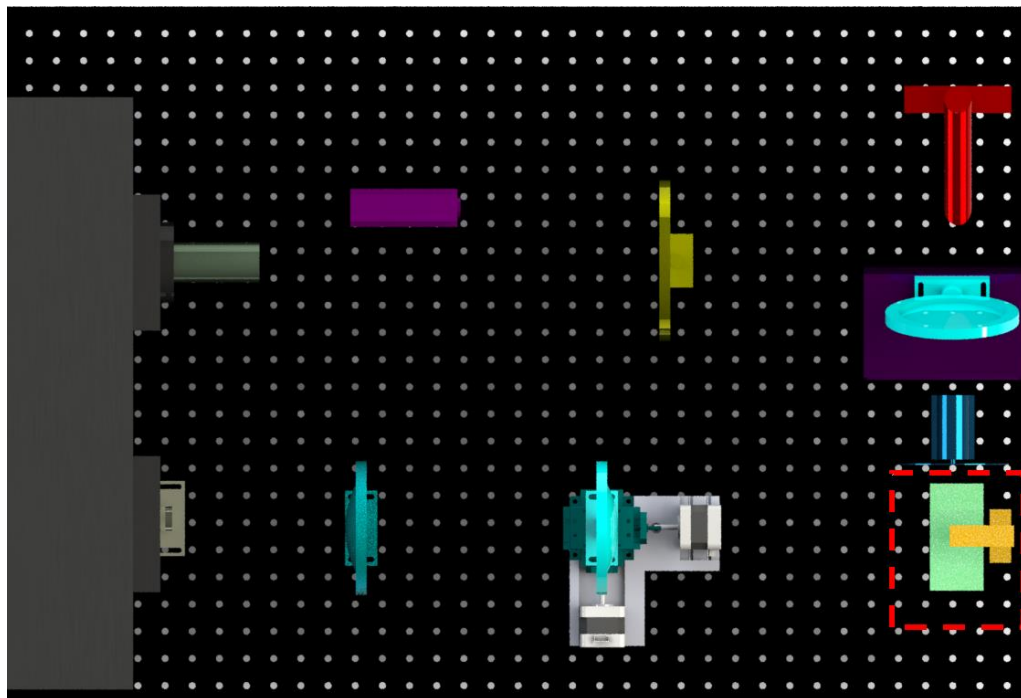


Figura 3.3 Área a automatizar señalada en rojo

3.2 Implementación Electromecánica

3.2.1 Diseño de base del posicionador

Con referencia a los objetivos planteados, el controlar de manera automatizada la posición donde impacta el haz de luz proveniente del láser sobre la muestra a caracterizar, presenta una problemática que es necesaria evaluar al momento de proponer soluciones que cubran las necesidades planteadas. Por tanto, que, dadas las condiciones antecedentes, el movimiento controlado en dos

ejes (X, Y), se logra al usar un posicionador como principio fundamental para alcanzar este objetivo.

Elegir el posicionador micrométrico 36033 de *Edmund Optics*, ofrece un control óptimo considerando los alcances y limitaciones expresadas con anterioridad, ya que al acoplar el dispositivo con un par de motores a pasos de alta precisión NEMA17 da como resultado una precisión de 2.5 μm por paso del motor, tal como se expresa en la ecuación 3.1

$$\frac{\frac{Distancia}{Vuelta}}{\frac{Pasos}{Vuelta}} = \frac{500 \text{ } \mu\text{m}}{200 \text{ } pasos} = 2.5 \frac{\mu\text{m}}{\text{paso}} \quad ec. 3.1$$

Sin embargo, para acoplar mecánicamente ambos dispositivos, resulta oportuno usar un elemento que permita la transmisión de movimiento entre dos ejes de diferente diámetro, asimismo que sirva para compensar errores mínimos de altura o concentricidad entre estos. Con referencia a lo anterior, puede inferirse que, para cumplir con este propósito, es conveniente emplear acoplamientos elásticos para unir el eje de salida del motor al eje de entrada del posicionador. Lo anteriormente expuesto se presenta en la Figura 3.4.

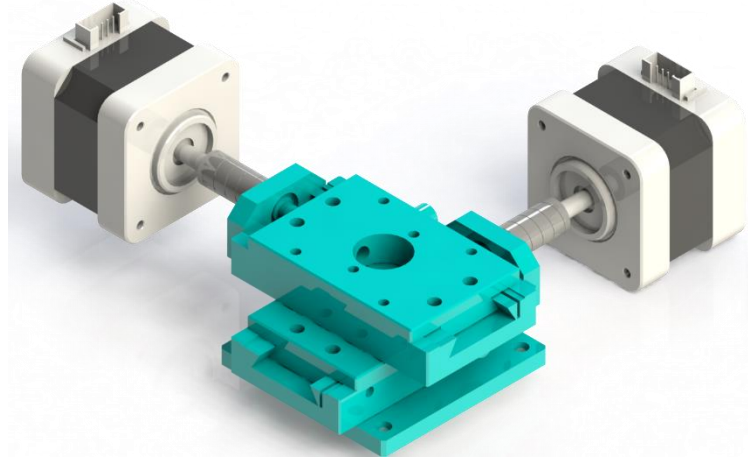


Figura 3.4 Acoplamiento entre posicionador micrométrico y motores a paso

En consecuencia, de esto último, la asimetría del posicionador trae consigo una diferencia de alturas considerable entre ambos ejes, la cual cabe aclarar, no se puede contrarrestar al usar un acoplamiento elástico; debido a esto, proponer una solución resulta el siguiente paso del proceso. Por lo tanto, con el objetivo de que la transmisión de movimiento sea de manera efectiva y sin riesgo de movimientos irregulares que causen variaciones en el sistema, diseñar un elemento de nivelación que compense la altura entre los motores, al mismo tiempo que otorgar una alineación con la mesa óptica y el resto de los elementos del sistema de fotoluminiscencia, es indispensable para el planteamiento propuesto.

Dadas las consideraciones anteriores, resulta conveniente diseñar este elemento mediante software de modelado 3D, de manera de que se pueda evaluar en conjunto con el resto de los elementos del laboratorio para corroborar su ubicación y óptima utilización del espacio disponible, además de garantizar su función mediante el uso de simulaciones previo a su manufactura.

Por esta razón, es preciso diseñar la pieza propuesta mediante el software de diseño SolidWorks®, puesto que se adapta a las necesidades planteadas, al mismo tiempo de contar con herramientas para el maquinado asistido por computadora, y así garantizar repetibilidad en el proyecto si se quisiese replicar en un futuro.

De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando, es adecuado proponer un diseño preliminar dadas las especificaciones proporcionadas por el fabricante de los motores al igual que el posicionador seleccionado, este elemento es ilustrado en la Figura 3.5 y resulta capaz de cumplir los siguientes requerimientos:

- Alinear los ejes de rotación de los motores con los ejes del posicionador,
- Puesto que uno de los motores necesita movilidad por el mismo diseño del posicionador, es imprescindible permitir el desplazamiento del motor del eje Y a lo largo de su trayectoria completa
- Permitir el montaje de la pieza a la mesa óptica al igual que garantizar la repetibilidad de la posición de este elemento en el sistema

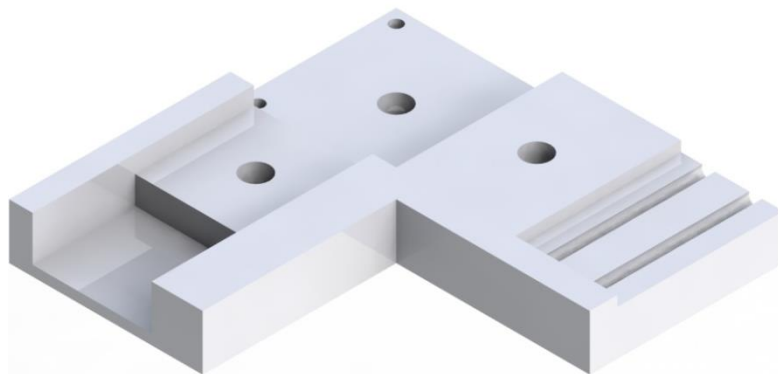


Figura 3.5 Diseño de pieza CAD mediante SolidWorks®

Para continuar, al ser una pieza que no se limita en el uso de un material específico, es conveniente trabajar con un material fácil de maquinar, capaz de soportar ligeras vibraciones mecánicas causada por el funcionamiento de los motores, al mismo tiempo que proporcionar propiedades mecánicas suficientes para evitar su pronto desgaste con su uso prolongado. Como resultado de estos criterios, es útil usar un aluminio dulce sin grado específico

Por último, maquinado de esta pieza se pudo realizar gracias al apoyo de la empresa Solmaq, soluciones tecnológicas de maquinaria de ensamble prueba y dispositivos, por medio de un CNC ARES VMC400 obteniendo la pieza manufacturada mostrada en la Figura 3.6

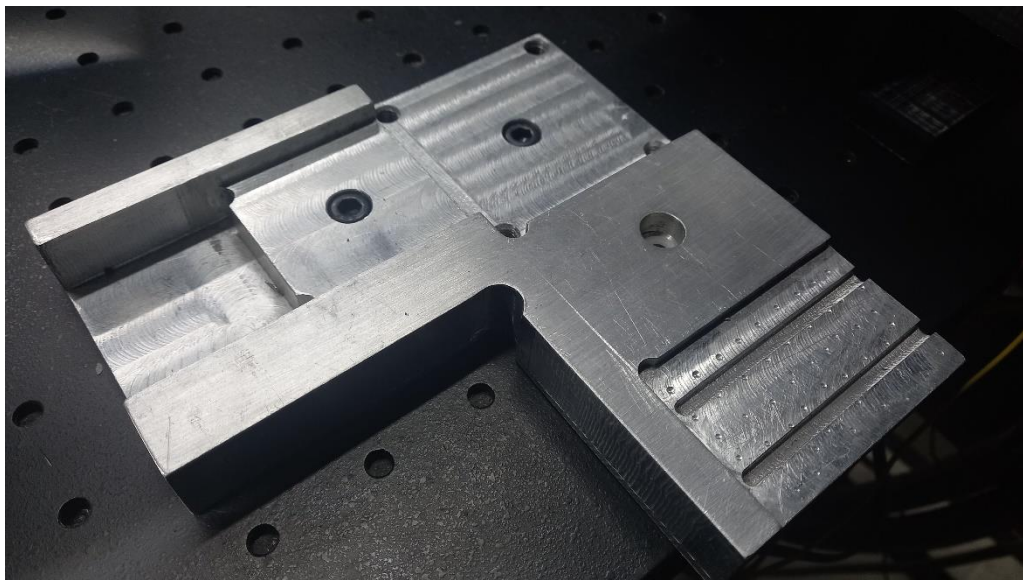


Figura 3.6 Pieza maquinada según las especificaciones

3.2.2 Acoplamiento del sistema a mesa óptica

Para el correcto acoplamiento de los motores y el posicionador al sistema de FL es necesario considerar la altura que debe tener la muestra a analizar para ser irradiado por el haz láser y que a su vez se encuentre a la distancia del foco del

lente colector de la señal de FL para realizar el mapeo, la forma de solucionar esto es el diseño de una base que acople el ensamble explicado en la sección 3.2.1 y que cumpla lo siguiente:

- Ubicar el soporte móvil del posicionador micrométrico a la altura correcta, con el objetivo de mantener la trayectoria del haz y la señal de FL tal como se encuentra definido en el sistema original
- Situar el diseño en una posición sobre la mesa óptica en la que se aproveche al máximo el área de desplazamiento especificada por el posicionador.
- Proponer un sistema adaptable al grosor de diferentes muestras de FL
- Garantizar la alineación de los orificios guías con los de la mesa óptica

El diseño obtenido de la mesa de montaje fue dividido en dos partes, tal como se ilustra en la Figura 3.7, de manera que, mediante la selección de una placa de mayor o menor altura, sea posible implementar los ajustes necesarios para realizar análisis en muestras de diferentes grosores.

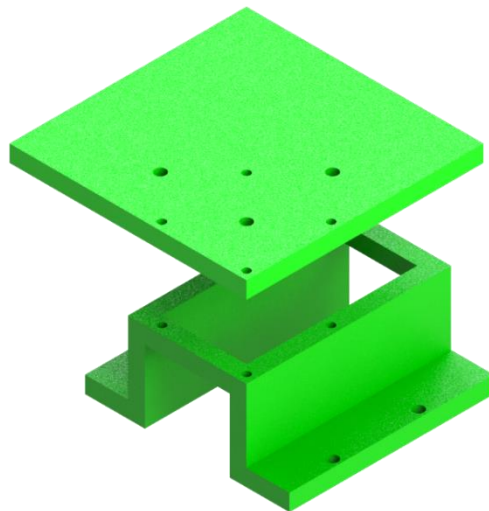


Figura 3.7 Diseño de soporte para acoplamiento explosionado destacando puntos de fijación

Mediante la manufactura aditiva por medio de impresión 3D, es posible fabricar estos elementos, debido a que esta mesa de montaje no está en contacto directo con los motores, ni resulta afectada por la fricción de estos, por lo tanto, el desgaste ocasionado resulta menor, y por ello resulta adecuado realizar la elaboración de esta mediante un polímero de fácil manufactura tal como el PLA. La vista superior de este diseño, acoplado con la mesa óptica, se puede apreciar en la Figura 3.8.

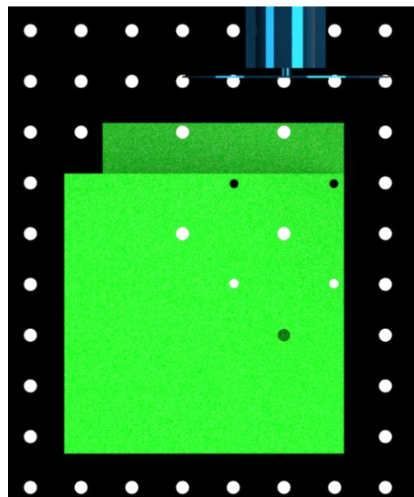


Figura 3.8 El diseño de soporte para acoplamiento se alinea correctamente a los orificios guía de la mesa óptica

3.2.3 Diseño del sistema de referencia.

Controlar la posición de un motor a pasos, a diferencia de los servomotores, resulta imposible sin algún tipo de sistema de referencia. Por esta razón, es fundamental definir este procedimiento, para que, mediante programación, podamos identificar la posición inicial y posteriormente la posición actual de los motores. Esta propuesta debe cumplir con los atributos mencionados a continuación

- Determinar la posición inicial de los ejes del posicionador
- Considerar un montaje que no interfiera con el desplazamiento de los ejes
- Garantizar repetibilidad de posición en ambos ejes

- Desarrollar un circuito eléctrico que permita comunicación entre la propuesta y la tarjeta de adquisición de datos

Ante la situación planteada, es conveniente usar un micro switch de palanca de rodillo para determinar la posición inicial en cada uno de los ejes (X, Y) debido a que su montaje puede lograrse usando dos orificios a los laterales de cada uno de los ejes del posicionador, sin que esto interfiera con el desplazamiento (X, Y).

Sin embargo, es necesario diseñar los soportes de los micro switch de tal manera que se otorgue una mínima invasión al área de movilidad del posicionador, considerando que uno de estos elementos cuenta con movimiento a lo largo de su trayectoria, dando como resultado un riesgo de colisión con el resto de los elementos del sistema.

Hechas las consideraciones anteriores, y debido a la asimetría del dispositivo posicionador, se puede proponer los diseños mostrados en la Figura 3.9 como los elementos de soporte para los micro switch, esto tras simular y garantizar su acoplamiento con el resto del sistema mediante el uso de software.

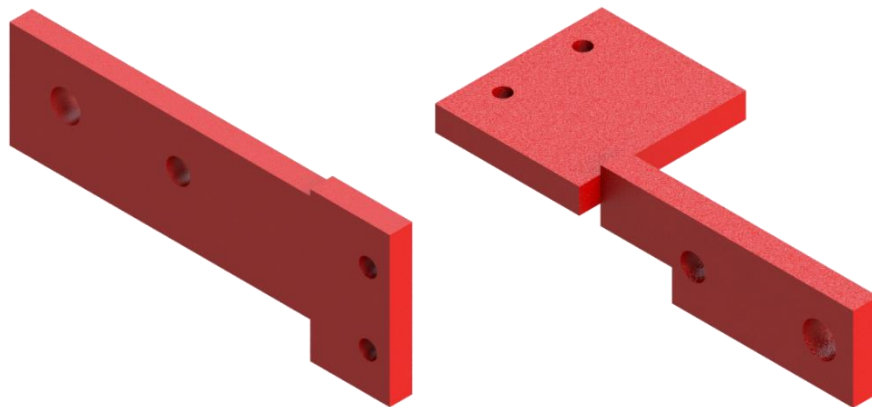


Figura 3.9 Elementos de soporte de micro switch para Motor X (Izquierda) y Motor Y (Derecha)

Asimismo, tal como se muestra en las Figuras 3.10 y 3.11, el montaje de estas piezas en el dispositivo posicionador en conjunto con su respectivo micro switch, da como resultado, ocupando una distancia menor a 0.5 mm de la carrera total del posicionador, esto considerado tras la compresión de los micro switch de control.

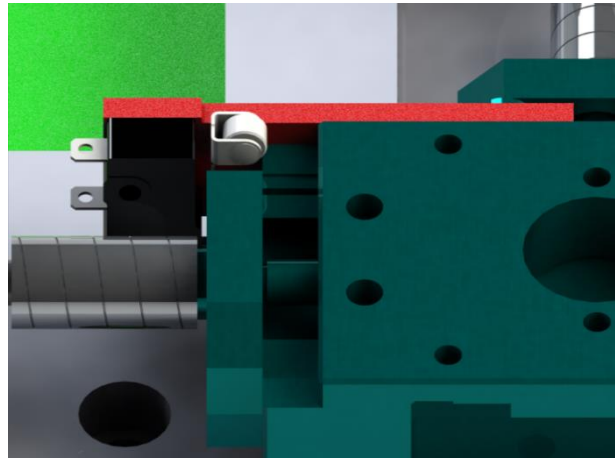


Figura 3.10 Mínima invasión del micro switch de Motor X montado al posicionador

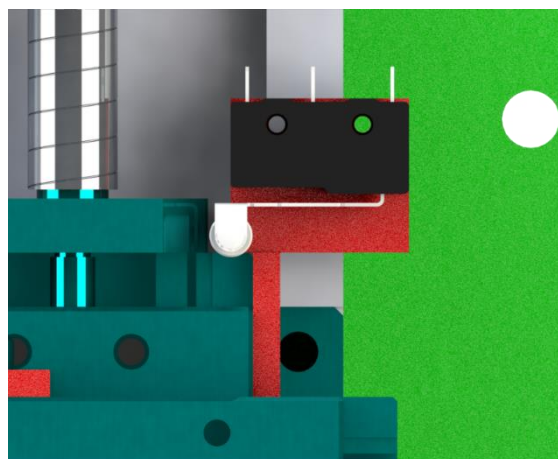


Figura 3.11 Mínima invasión del micro switch de Motor Y montado al posicionador

Tomando en cuenta a la precisión que se requiere y el tamaño de las piezas propuestas, es necesario usar la impresión 3D como método de manufactura de estos elementos.

Finalmente, como consecuencia de las propuestas que se han venido realizando y tras ensamblar todos los elementos en el modelo, se puede observar el sistema eléctrico-mecánico diseñado en la Figura 3.12, y su montaje en la mesa óptica del laboratorio en la Figura 3.13, demostrando de esta manera, el correcto planteamiento de las consideraciones de diseño a lo largo de este capítulo.

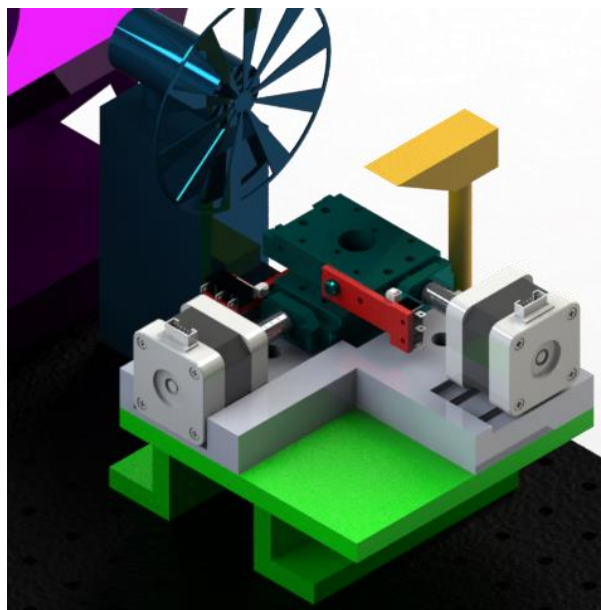


Figura 3.12 Sistema ensamblado vía software, cumpliendo con los requisitos planteados originalmente

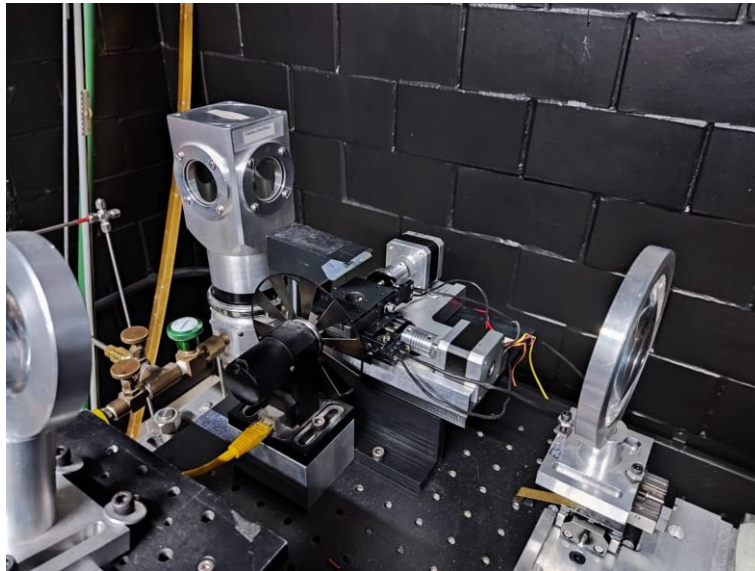


Figura 3.13 Sistema físico ensamblado correctamente en la mesa de óptica

3.3 Desarrollo del software

Para comprobar el funcionamiento de la parte electromecánica con la óptica y eléctrica, es necesario desarrollar un programa que permita al usuario controlar el movimiento del posicionador de manera precisa y adquirir la intensidad de la fotoluminiscencia en una longitud de onda seleccionada. Es por ello, que es necesario utilizar un software de programación que permita intercambiar información a través de tarjetas de adquisición de datos, al mismo tiempo proveer una interfaz gráfica para el control y manejo de la información obtenida por medio de estas. LabVIEW® es un software de programación gráfica, que además de cumplir con los requisitos expresados anteriormente, es compatible con diversos sistemas operativos y dar la posibilidad de complementarse con otros programas de medición usados en el laboratorio de fotoluminiscencia.

Dadas estas consideraciones, el desarrollo de este software tiene como objetivo cumplir con los siguientes propósitos:

- Permitir la selección y posicionamiento del haz laser en puntos específicos dependiendo del criterio del usuario.

- Realizar un barrido en X y Y para obtener mapeos por fotoluminiscencia
- Guardar los datos en un formato adecuado para visualizar el mapa.
- Presentar el progreso y resultado en una interfaz de fácil manejo para el usuario

Para lograr esto, se procede a dividir las tareas como una serie de subprogramas, de los cuales se explica su desarrollo en las siguientes secciones.

3.3.2 Movimiento de motores

En primer lugar, es fundamental entender el funcionamiento interno de un motor a pasos, para que, de esta forma, el envío de información a la tarjeta de adquisición de datos sea de manera fundamentada, dando como resultado, controlar la dirección y movimiento de estos.

El funcionamiento interno de un motor a pasos es por medio de la energización de una serie de bobinas internas llamadas estatores, los cuales, al generar un campo magnético, mueven un imán permanente que se encuentra localizado en el eje de giro, permitiendo la rotación de este un cierto ángulo. Dados los alcances y limitaciones expresados en la sección 1.3, es preciso elegir un motor a pasos NEMA 17, el cual al ser un motor con precisión de 1.8° por paso, satisface las necesidades del proyecto.

Este motor, es capaz de realizar secuencias conocidas como *medio paso* y *paso completo*, las cuales se diferencian por el ángulo de giro realizado por cada secuencia, sin embargo, a pesar de que una secuencia de medio paso proporciona una mayor resolución de los resultados presentados, tiene como defecto una menor fuerza de fijación entre cada movimiento, y como consecuencia, un menor índice de repetibilidad de los resultados; así mismo, tal como se presenta en las limitaciones de la sección 1.3.2, el spot del láser tiene un diámetro de decenas de micrómetros, por lo que los resultados obtenidos en distancias menores a esto, son

imperceptibles para el sistema. Por esta razón, se decide optar por una secuencia de paso completo para todas las consideraciones necesarias de este proyecto.

Para lograr el giro en sentido horario de los motores, es necesario seguir la secuencia de polarización de las bobinas mostrada en la Tabla 3.1, y continuar con esa secuencia de manera indefinida hasta alcanzar el giro deseado. Cambiar el orden de los pasos, tiene como resultado ocasionar alteraciones del movimiento tal como retrocesos y distancias no controladas.

Tabla 3.1 Secuencia de polarización de motor a pasos NEMA 17 para sentido horario, donde “1” Representa que la bobina se encuentra energizada y “0” no energizada

	Bobina	A	B	C	D
	Paso				
FASE I	Paso 1	1	1	0	0
	Paso 2	0	1	1	0
FASE II	Paso 3	0	0	1	1
	Paso 4	1	0	0	1

Nota: Fuente Zamora Vázquez, 2007

Al energizar los motores, es necesario usar un dispositivo que realice la comunicación con la tarjeta de adquisición de datos, ser capaz de proteger el equipo de corrientes inversas, al mismo tiempo, tras acoplar una segunda fuente de alimentación, suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de los mecanismos, debido a que la corriente proporcionada por la tarjeta no resulta suficiente para accionar alguno de los motores.

De tal modo, al elegir el controlador L298N se cumplen las condiciones mencionadas, asimismo, se presenta en la Figura 3.14 los puertos a utilizar detallados a continuación.

1. Puertos de alimentación para las bobinas del motor, utilizados para energizar los estatores A, B, C y D
2. Puertos de comunicación, usados para recibir las secuencias de polarización provenientes de una tarjeta o dispositivo con el fin de controlar el giro del motor
3. Puertos de alimentación del controlador, son usados para acoplar la fuente de energía adecuada para el funcionamiento de los motores, debido a que la energía necesaria para el funcionamiento no puede ser suministrada directamente por una tarjeta de adquisición de datos, además, es necesario considerar que el voltaje debe ser similar al especificado por el fabricante de los motores

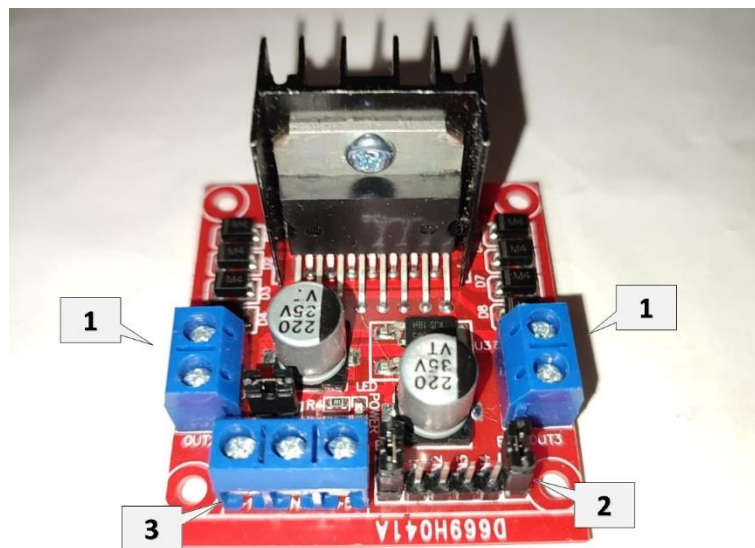


Figura 3.14 Controlador L298N de motor a pasos

Tras identificar los puertos a utilizar y la secuencia necesaria para el correcto funcionamiento de los motores, es necesario continuar con el envío de señales a través de la tarjeta de adquisición de datos, siguiendo el orden marcado en la Tabla 3.1

Por lo tanto, elegir la tarjeta de adquisición de datos USB 6002 de National Instruments® para el desarrollo de este proyecto, se debe a la compatibilidad con el Software de programación LabVIEW®, la retrocompatibilidad con otros programas del laboratorio, además de contar con los puertos suficientes para el control de los dos motores y sus dos sensores de referencia.

Luego de realizar las consideraciones mencionadas anteriormente, se da inicio con la etapa de programación de este proyecto. Para que el programa pueda mandar las señales de activación a cada uno de los estatores del motor, se utiliza la herramienta *Flat Sequence Structure*, por la cual se puede agrupar y ordenar un conjunto de instrucciones que deba mantener un orden secuencial. Enviando las secuencias con la herramienta *DAQ assistant*, dando como resultado el giro controlado del actuador.

Ahora bien, debido a la limitación del diámetro de decenas de micrómetros del spot laser, resulta conveniente agrupar los cuatro pasos mencionados en la Tabla 3.1 en una sola secuencia, esta se nombra dentro de un bloque llamado *1 paso sentido Horario* y este se presenta en la Figura 3.15; este bloque se utiliza para el giro de ambos ejes del posicionador, siendo únicamente necesario seleccionar adecuadamente los puertos de salida de la tarjeta según la disponibilidad y conexión de los motores.

Por último, como se mencionó anteriormente, modificar el orden de activación de la tabla puede alterar el movimiento resultante, al que invertir el orden de los pasos, es decir de paso 4 a paso1, ocasiona que el sentido de giro sea el contrario y por lo tanto se puede nombrar a este bloque como *1 Paso sentido antihorario*

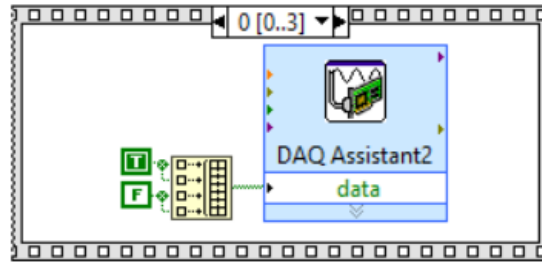


Figura 3.15 Bloque sentido Horario

3.3.3 Obtención de Posición inicial

Después de establecer las secuencias del giro en sentido horario y sentido antihorario, el siguiente paso es desarrollar un bloque que permita al dispositivo posicionarse en el origen del sistema de referencia determinado por la ubicación del micro switch en cada eje, con el objetivo de posicionarse en un punto inicial y de calcular la posición actual del motor después de un desplazamiento.

Al identificar cada uno de los motores como Motor X y Motor Y, se puede determinar como el sentido de giro necesario para obtener un desplazamiento ascendente en el sistema de coordenadas al sentido horario y de esta forma lograr la presentación de resultados de manera gráfica, tal como se mencionó en los objetivos de la sección 1.2.

Por lo que resulta conveniente renombrar el bloque de sentido horario como *Movimiento Motor +*; donde en el caso contrario, giro en sentido antihorario, se nombra *Movimiento Motor -*.

Luego de definir estos criterios, se da continuidad al proyecto, en desarrollar un bloque de búsqueda de posición inicial para cada eje, el cual se inicia al recibir una señal de activación de búsqueda solicitada por el usuario.

Para realizar este bloque, se realiza la lectura del micro switch y dependiendo de su valor, se realiza lo siguiente:

- Si el micro switch no se encuentra activado, se realiza el desplazamiento del eje mediante el bloque *Movimiento Motor* –, y volviéndose a leer el estado del micro switch
- Si el micro switch esta activado, se prosigue a apagar los estatores del motor a pasos deteniendo el movimiento del actuador, terminando así con el programa. Esto con la finalidad de ahorro de energía y prolongar la vida útil del actuador

Dado el limitado número de casos, es conveniente usar el elemento *Case Structure*, el cual depende del estado de una señal de activación para proporcionar una de las dos posibles opciones. Por lo que siguiente a esto, para el desarrollo de este bloque, es fundamental conocer el estado actual de los micro switch, el cual determina si el sistema se encuentra en el origen o no lo está.

Esto se logra leyendo los puertos digitales de la tarjeta de adquisición de datos a los que están conectados los micro switch, haciendo uso de la herramienta *DAQ assistant*, el estado recibido es una señal booleana que determina el valor del elemento *Case Structure*. Esta señal a su vez es capturada y presentada en la interfaz como un elemento *Round Led* para que de esta forma el usuario, además de saber el estado actual, pueda hacer uso de esta variable en otros bloques.

Por último, para evitar que el sistema constantemente se encuentre regresando a la posición inicial, es preciso limitar que esta función se active únicamente cuando el usuario considere necesario realizarla, usando un segundo *Case Structure* que englobe la función de búsqueda activado con un *Push button* en la interfaz, resultando óptimo el uso de esta solución para los propósitos planteados. El bloque desarrollado, se presenta a continuación en la Figura 3.16

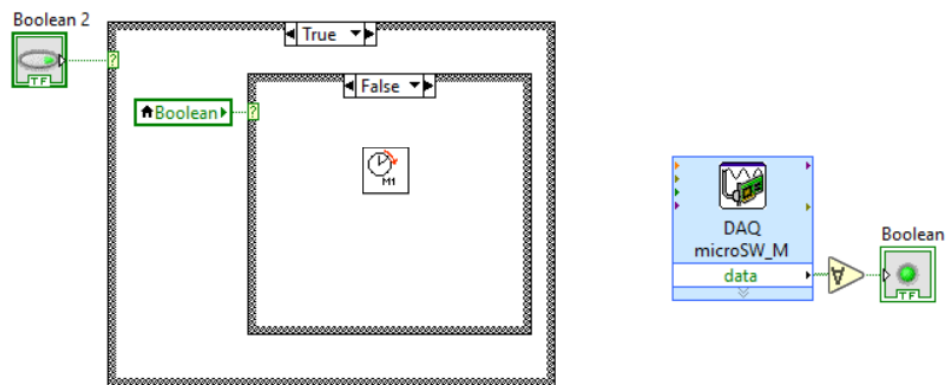


Figura 3.16 Bloque de Búsqueda de micro switch o posición inicial

Después de completar el bloque de la búsqueda de posición de inicio, se prosigue con el desarrollo de pruebas del sistema para comprobar su funcionamiento. Para lograr esto, es necesario quitar la energía de los motores a pasos, para que de esta forma sea posible mover de manera manual a cualquier posición de los ejes, considerando que este movimiento pudiese dar como consecuencia una posición de medio paso o paso completo de los motores, teniendo un posible margen de error de máximo 4 pasos completos del motor, es decir una secuencia completa de movimiento, esto se puede expresar de manera numérica como una distancia de $10\ \mu\text{m}$, sin embargo, debido a que el área del spot laser es mayor, este valor resulta no afecte en la resolución del sistema significativamente.

Cabe destacar que este error se puede ocasionar únicamente cuando el dispositivo es perturbado por fuentes externas, o cuando sucede la interrupción del suministro de energía a mitad del movimiento, puesto que, para el sistema final propuesto, no es necesario regresar a la posición inicial al momento de comenzar un nuevo estudio.

Una vez demostrado el correcto funcionamiento del programa, se crean las variaciones de este para cada uno de los ejes, donde el cambio más significativo resulta en la selección del puerto de entrada de la tarjeta de adquisición de datos dependiendo del micro switch de cada eje. Nombrando así a este bloque como *Búsqueda de Micro switch*

3.3.4 Movimiento controlado por número de pasos

Tomando en cuenta que se ha logrado que los motores puedan realizar un movimiento indefinido de manera constante hasta detectar alguno de los sensores de posición, por lo tanto, es necesario controlar el movimiento de los motores mediante el desplazamiento de un número de pasos de cada motor al igual que la dirección de estos, esto con la finalidad de comprobar la distancia recorrida, ya sea como base del mapeo o simplemente para posicionar el dispositivo en la ubicación más óptima según sea el caso de estudio.

Esto se logra al usar la herramienta *Case structure*, la cual, tiene la posibilidad de trabajar con dos posibles escenarios, separando de esta forma el sentido de giro horario y antihorario para el movimiento deseado del posicionador. Sin embargo, resulta poco eficiente mandar a llamar un sub bloque cada vez que sea necesario girar un paso, esto debido a que la secuencia en el programa *Movimiento motor* está definida únicamente por lo mostrado en la Tabla 3.1, además de que modificar este bloque para realizar un movimiento de un mayor número de

pasos, sería un proceso el cual deba estar repetido una cantidad que depende de la distancia deseada.

Por ello, se introduce la secuencia dentro de un nuevo bloque llamado *For Loop*, el cual permite repetir las acciones que se encuentran dentro de este un número determinado de veces. Este número, puede ser definido por una constante en el programa o por un elemento *Numeric Control* en la interfaz, permitiendo al usuario la libertad de elegir esa variable según sus necesidades. Dado el propósito de este bloque, se hace uso de este último elemento, tal como se muestra en la interfaz de la Figura 3.17.

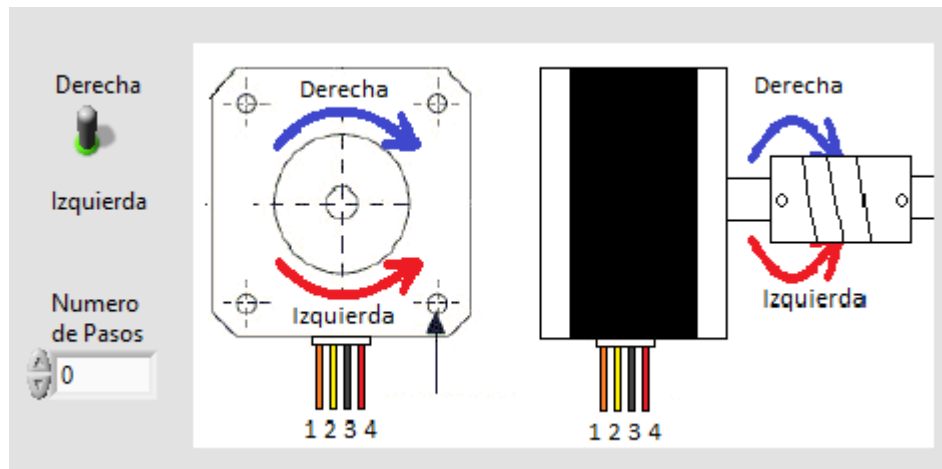


Figura 3.17 Interfaz del programa de Motor N X 4 Pasos

Es así como el programa mostrado en la Figura 3.18, recibe el nombre de *Motor N X 4 Pasos* debido a que como se menciona en la sección 3.3.2, el movimiento base realizado es una secuencia de 4 pasos repetida N veces, por lo tanto, es conveniente esta asignación evitando así futuras confusiones.

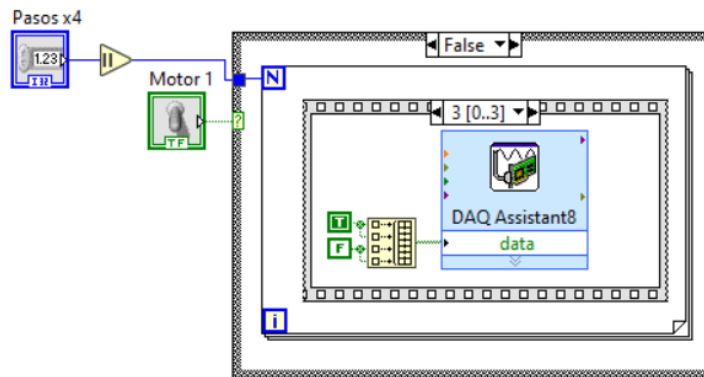


Figura 3.18 Bloque de Motor N X 4 Pasos

3.3.5 Método de control de la ubicación del sistema:

Al igual que los programas anteriores, este algoritmo puede ser aplicado a ambos ejes de giro, debido a su similitud de movimiento que hay entre ellos, esto es posible tras realizar los cambios necesarios de las entradas y salidas de la tarjeta de control.

Tras ejecutar N veces el programa *Motor N X 4 Pasos*, registrar la posición actual después de los movimientos realizados se vuelve una tarea indispensable, puesto que sería necesario regresar constantemente a la posición inicial del sistema para que de esta forma sea posible saber la posición real de este. Sin embargo, es necesario desarrollar un programa que se complemente con los bloques actuales para que, de esta forma, se realice el registro de posición de manera automática. Dada esta problemática, se prosigue a desarrollar una solución que cumpla con lo siguiente:

- Establecer en la aplicación cómo coordenadas (0, 0) a las ubicaciones de los posicionadores donde ambos micro switch son presionados al llegar a estas posiciones
- Guardar de manera automática la información referente a la última posición alcanzada por el dispositivo después de completar cada movimiento, para

que de esta forma no sea necesario el regreso al origen del sistema de coordenada al momento de reiniciar el equipo.

- Leer los datos de posición actuales para calcular el número de secuencias y sentido de giro necesarios para ir a una posición requerida.
- Mostrar en la interfaz el valor de la última posición alcanzada, para facilitar al usuario el manejo del dispositivo.

Es por ello, que se opta por la creación de un fichero de posición, el cual tiene como finalidad el almacenar la última ubicación alcanzada por el sistema, el cual se actualiza tras completar cada operación.

3.3.6 Creación, lectura y actualización de fichero de posición

Una vez definido el método a emplear para resolver la ubicación de la posición actual del sistema, es necesario elegir el tipo de archivo que tiene que cumplir con la función de fichero para los datos de posición. De acuerdo con los propósitos mencionados en la sección 3.3.5, es adecuado usar un par de archivos .txt, o también conocidos como bloque de texto, donde cada uno de estos sirve para almacenar la posición de los ejes, separando la información de la ubicación de estos en caso de querer analizarlo.

La creación de estos archivos se logra al usar la función *Open/ Create/ Replace file* dentro del programa, la cual, como su nombre lo indica, permite abrir o crear un archivo el cual puede ser modificado constantemente. Los puertos de control de este elemento se muestran en la Figura 3.19, a continuación, se detallan los puertos a utilizar.

- File path: Definir el nombre y la ruta del archivo.
- Operation: Sirve para seleccionar la operación a llevar a cabo, en este caso creación y remplazo.

- Access: Otorgar el tipo de permiso adecuado sobre el fichero de datos, en este caso, como se busca la lectura y escritura del fichero, se selecciona la opción read/write.

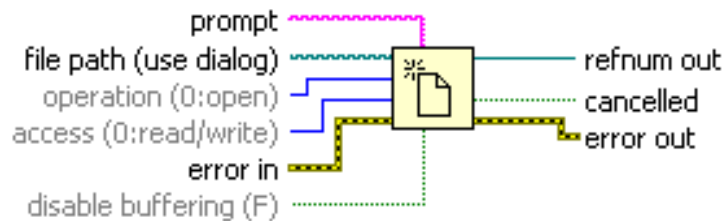


Figura 3.19 Función Open/Create/Replace (National instruments, 2022)

Sin embargo, para usar esta función es necesario la integración de otros bloques que definan los parámetros del archivo, un ejemplo de esto es el elemento *Build Path*, el cual concatena la ruta de ubicación y el nombre con extensión del archivo a usar, dando como resultado un elemento compatible con la terminal *File Path* de la función *Open/ Create/ Replace file*

De igual manera, tras la creación del archivo de posición se utiliza la función *Write to text file* para introducir o modificar el contenido del archivo, donde esta información puede ser un valor numérico o cadena de texto, resultado de introducir datos en el control numérico de la interfaz o mediante una constante, como lo sería el valor 0 cada vez que se realice calibración o puesta en *Home* del sistema. Con este bloque, se abre paso a un control preciso de ubicación del sistema.

Después de abrir y escribir la información deseada, el siguiente paso necesario es cerrar el archivo, por lo que se puede usar el comando *Close file* dando por concluido el proceso de registrar la información obtenida en el fichero de datos.

Una vez descrito el funcionamiento de cada uno de los elementos necesarios para los propósitos mencionados, se procede a la integración de estos para formar un bloque dedicado a la creación y escritura del archivo de posición de los ejes, tal como se muestra en la Figura 3.20, este se nombra como *Crear* y es igualmente aplicable para ambos motores, donde únicamente es necesario definir el nombre del archivo de tal forma que sea diferenciable la información de cada uno de los ejes.

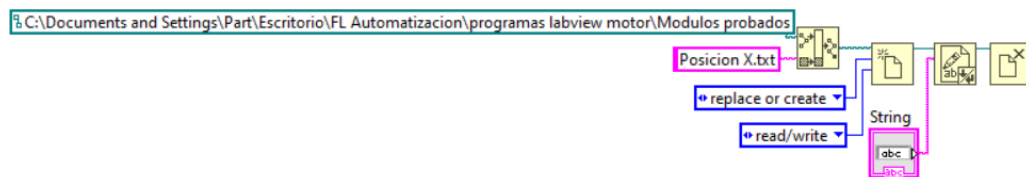


Figura 3.20 Bloque de Crear

Al completar este bloque, se continua con la optimización del programa de *Búsqueda de Micro switch* de la sección 3.3.3, donde tras alcanzar la posición inicial, además de apagar las bobinas de los motores, ahora se hace uso del bloque *crear* para guardar en el fichero de posición el número 0, indicando que la posición obtenida es el origen que sirve de referencia para los cálculos necesarios en los bloques siguientes. Esta nueva configuración se muestra en la Figura 3.21.

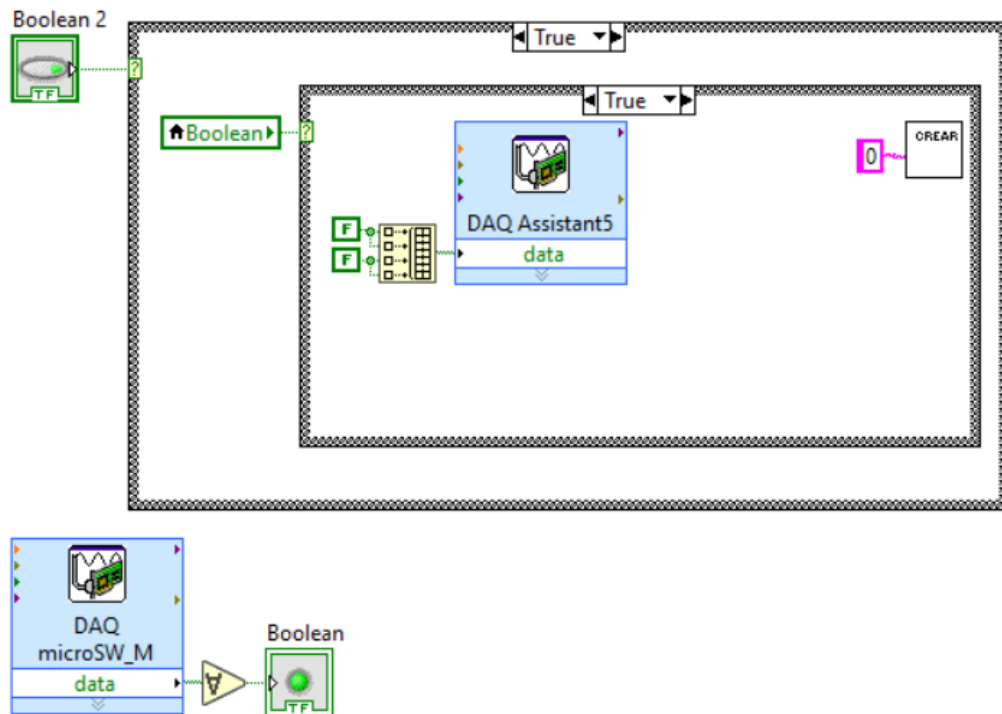


Figura 3.21 Actualización del bloque Búsqueda de microswitch

De igual forma, como se ha presentado en las secciones anteriores, es posible tomar un bloque ya creado para modificarlo según los propósitos, en este caso es posible usar el bloque *Crear* para desarrollar un programa que permite la lectura de los ficheros de posición y de esta forma se puede hacer uso de estos para las operaciones siguientes. Tomando en cuenta estas consideraciones, es necesario realizar las siguientes modificaciones al programa.

- Definir en la terminal *Operation* del bloque *Open/ Create/ Replace file*, la instrucción *Open*, evitando así modificaciones no deseadas al archivo de posición.
- Reemplazar la función *Write to text file* por el comando *Read from text file* en la salida del bloque principal, añadiendo un indicador que presente este dato en la interfaz al usuario.

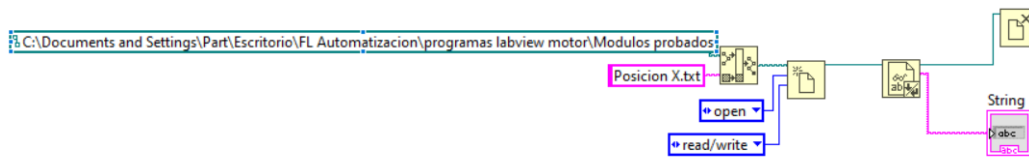


Figura 3.22 Bloque de Leer

Este nuevo programa se muestra en la Figura 3.22 donde se nombra como Leer y es igualmente aplicable a ambos ejes, realizando las consideraciones ya mencionadas.

3.3.7 Mover a determinada posición

Como consecuencia de tener identificado en el software el valor 0 del sistema de coordenadas, además de registrar la posición actual del dispositivo, es posible determinar la dirección de giro del motor y el número de pasos necesarios para alcanzar una posición final.

Considerando la ecuación 3.2, donde se expresa como X_f a la posición final determinada por el usuario, mientras que X_i es la posición inicial tomada de la lectura del fichero de datos de cada eje; por otra parte, el valor absoluto de N representa la cantidad de secuencias necesarias para llegar a la posición deseada.

$$|N| = X_f - X_i \quad \text{ec. 3.2}$$

Por lo tanto, el siguiente paso es determinar el sentido de giro necesario para alcanzar la posición final. Con esto se presentan estos posibles escenarios:

- Si $N < 0$ es necesario realizar un sentido de giro antihorario, el cual acerque la base móvil al origen del sistema de coordenadas.

- Si $N > 0$ el movimiento necesario debe resultar en alejarse de la posición 0, por lo tanto, se mueve en sentido horario.
- Si $N = 0$, sin importar el sentido de giro seleccionado, no se moverá el sistema.

Tras este planteamiento, se puede agrupar los escenarios en dos posibles opciones, $N \leq 0$ y $N > 0$, para así implementar un *Case Structure* con el cual se pueda separar el sentido de giro necesario para cada aplicación.

Para que esto sea posible, al usar operadores aritméticos de la biblioteca de funciones de LabVIEW®, se logra implementar la ecuación planteada, de manera que resulte en dos salidas que sirven como criterios para el funcionamiento de este bloque:

- El producto de la diferencia de X_f y X_i .
- La solución de la desigualdad de estas entradas.

Este último criterio, se puede solucionar usando el elemento comparativo *Less or equal*, donde la salida de este operador consta de un valor Booleano, que a su vez se conecta a la terminal del *Case Structure* para lograr el funcionamiento deseado.

Siguiendo la secuencia de los razonamientos anteriores, dentro de cada caso del *Case Structure*, se elige usar un elemento *For Loop*, el cual sirve para repetir finitamente la secuencia de pasos de los bloques *Sentido Horario* y *Sentido Anti-Horario* respectivamente. Sin embargo, al solo leer valores enteros positivos, es necesario usar el operador *Absolute value* en la terminal de salida de la diferencia

de X_f y X_i , para que, de esta forma sea compatible el resultado con la función mencionada.

Por último, con la finalidad de que el usuario conozca la posición actual del sistema durante la ejecución del programa, se toma el valor de posición inicial, para que dentro del elemento *For Loop*, se sume al valor de la iteración actual más uno. Esto debido a que el software considera la primera iteración como “iteración cero”, por lo que, sin esta última adición, resulta equivocado la afirmación de esta variable.

Este valor se muestra al usar un *Numeric Indicator* en la interfaz, tal como se muestra en la Figura 3.23, por otra parte, el programa explicado en los párrafos anteriores se presenta en la Figura 3.24, bajo el nombre *Motor mover a posición*

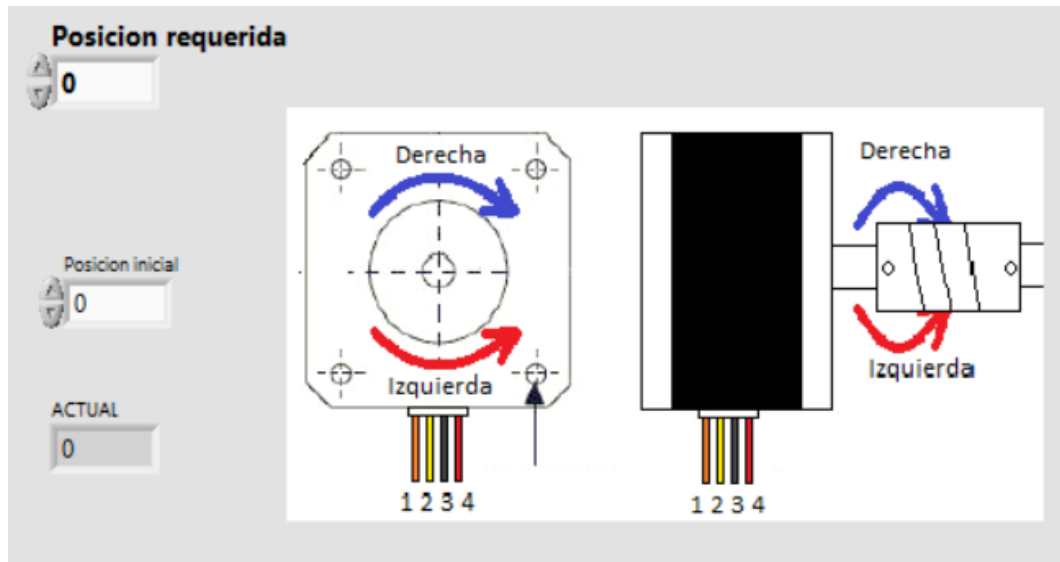


Figura 3.23 Interfaz de bloque Motor mover a posición

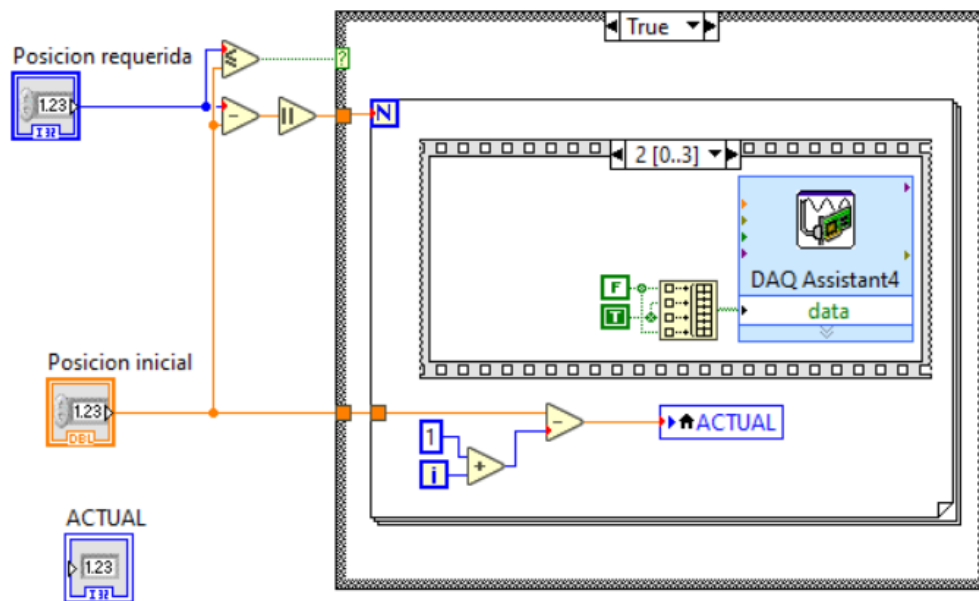


Figura 3.24 Bloque de Motor mover a posición

3.3.8 Programa de lectura de intensidad de fotoluminiscencia

Tomando en cuenta los bloques de los motores descritos anteriormente, es fundamental realizar la medición de intensidad de fotoluminiscencia dado un punto específico, para que de esta forma sea posible la captura de datos necesarios para el mapeo de la superficie en el programa final.

Por lo tanto, resulta preciso usar la función *DAQ assistant* para obtener lecturas analógicas por medio de la tarjeta de adquisición de datos, las cuales son proveniente del fotodetector que han sido amplificadas previo a la lectura de la tarjeta.

Sin embargo, al seleccionar un puerto analógico de la tarjeta, es necesario definir un par de parámetros necesarios para realizar la lectura de la medición. El primero de ellos conocido como la terminal *Rate*, es donde se especifica la frecuencia de muestreo por segundo del puerto seleccionado y por otra parte, se tiene a la terminal *Number of samples* la cual define el número de muestras adquiridas por el canal seleccionado cada vez que se ejecute esta tarea.

Considerando que al introducir un valor mayor a dos en la entrada *Number of samples* da como resultado una poca repetibilidad de los resultados adquiridos, por lo que es necesario proponer una solución que adquiera datos a gran rapidez y poca susceptibilidad al ruido es la siguiente problemática por resolver.

Por lo que con el fin de obtener valores más repetibles con un menor índice de ruido, es posible implementar un algoritmo que permita promediar la salida de la función *DAQ Assistant* a través del tiempo.

Por ello, se opta por usar la estructura *Feedback Node* en conjunto con el operador numérico *Add* en el lugar antes mencionado, englobando estos 3 elementos en la función *While loop*, dando como resultado una sumatoria de los valores obtenidos durante la ejecución del programa

Una vez obtenida esta sumatoria, es necesario dividir el resultado entre el número de veces que se ha ejecutado el programa, por lo que es necesario detener la estructura *While loop* una vez alcanzado un número de repeticiones inicialmente establecidas en el programa, esto mediante el uso del elemento *Numeric Control* en la interfaz, permitiendo obtener valores más precisos lo que implica un mayor tiempo de análisis.

Esta última decisión puede ser propuesta por el usuario, sin embargo, tras varias pruebas de funcionamiento, se define como “5” al valor estándar que mantiene el programa si el usuario no propone lo contrario. La elección de este valor se debe a sus características como número primo, reduciendo la posibilidad de captura de datos en momentos donde la señal de ruido pueda impactar negativamente la medición.

Este bloque, tal como se ha descrito, se presenta en la Figura 3.25 y se nombra como *Leer Tarjeta*, tras completar una serie de pruebas que indican su correcto funcionamiento y alta reproducibilidad de los datos adquiridos.

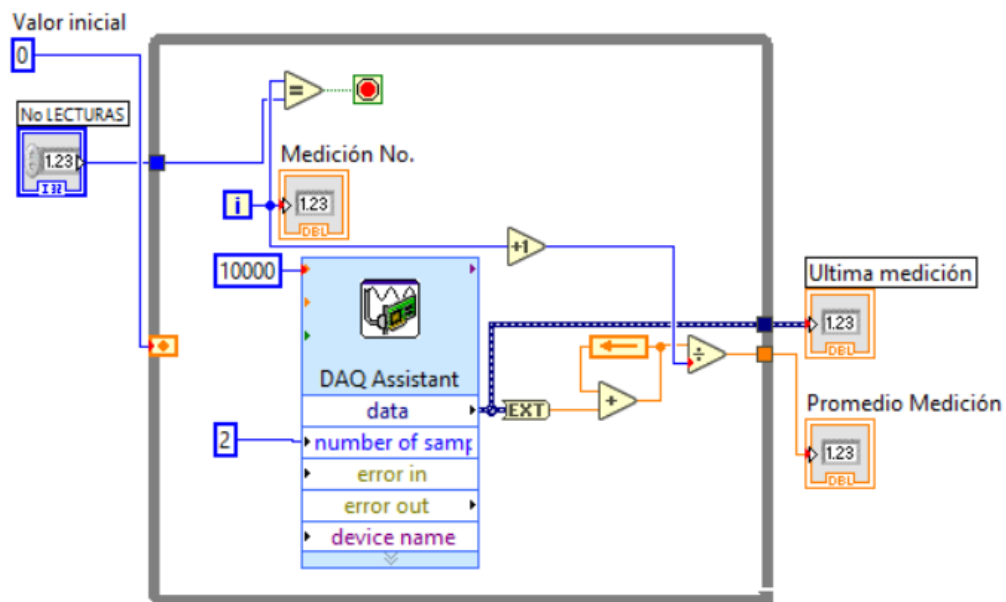


Figura 3.25 Bloque de Leer Tarjeta

3.3.9 Programa de Mapeo

Considerando que el sistema puede cubrir un área de trabajo de 1,8 X 1,8 cm y que cada movimiento del sistema avanza un mínimo 10 μ m, un análisis del

área completa tiene como consecuencia estudios de larga duración, por lo que resulta óptimo ofrecer diversas configuraciones de estudio.

Por lo tanto, para hacer un barrido de una superficie y después lograr un mapeo de esta, es preciso analizar las tareas como una secuencia de pasos que puedan adaptarse a las diversas configuraciones de movimiento, usando como base los bloques desarrollados en las secciones anteriores.

Tomando en cuenta este planteamiento, el programa debe ser capaz de cumplir con los siguientes propósitos:

- Permitir al usuario limitar el área a analizar introduciendo una posición inicial y final en cada eje.
- Ubicar automáticamente el dispositivo en la posición determinada en el punto anterior al momento de iniciar la ejecución del programa.
- Capturar y almacenar la intensidad de fotoluminiscencia de una serie de puntos separados a una distancia que el usuario previamente define.
- Presentar el conjunto de resultados obtenidos en una gráfica de superficie mostrada en la interfaz.

Tras definir estos propósitos, se pueden identificar como variables de movimiento del sistema a las siguientes entradas, las cuales, son introducidas a criterio del usuario por medio de un conjunto de *Numeric control* en la interfaz.

- P_{Xi} y P_{Yi} Posiciones iniciales de cada eje para la realización del barrido.
- P_{Xf} y P_{Yf} Posiciones finales deseadas para el área de estudio.
- Pa_x y Pa_y Distancia de separación entre cada medición, expresada como número de secuencias entre punto y punto.

Tomando en cuenta estas consideraciones y variables de proceso, se da inicio con el programa de Mapeo de fotoluminiscencia, al plantear la ecuación 3.3, donde se realiza el cálculo del número de veces que se debe repetir la separación Pa para desplazarse de P_i a P_f .

$$NS = \frac{P_f - P_i}{Pa} \quad ec. 3.3$$

Sin embargo, al permitir al usuario elegir la distancia de separación Pa , el valor de NS puede resultar en un valor tipo *double*, provocando inconsistencias en el programa al no poder interpretar valores decimales al momento de usar funciones como lo son *For Loop* y para evitar que el sistema pudiese salir de los límites del posicionador, se opta por implementar el elemento *Round Toward - infinity*, en la salida de este cálculo, con el cual, el producto NS siempre se redondea al valor entero inferior más cercano.

Ahora bien, al considerar este algoritmo como una secuencia de pasos, es posible usar la función *Flat Sequence Structure* para conjuntar estas instrucciones para seguir un orden de ejecución, siendo el primer paso de ello ubicar el sistema en la posición inicial del Mapeo

Esto se logra al usar los bloques desarrollados anteriormente, *Motor Mover a posición* y *Leer*, donde la posición final del primer programa es igual a la posición inicial del mapeo, mientras que, mediante el uso de la herramienta *Leer*, se toma como posición inicial del movimiento a la ubicación actual guardada en el fichero de datos, ubicando al dispositivo posicionador en la posición inicial P_i de ambos ejes.

Tras completar el primer paso, es necesario calcular la posición final real del área de análisis, puesto que, al redondear al número inferior más cercano de NS, el dispositivo puede reducir el área de análisis de tal forma que es necesario aplicar la ecuación 3.4 para calcular la posición final real de cada eje.

$$P_{fReal} = (NS * Pa) + P_i \quad ec. 3.4$$

Posteriormente, como tercer paso del programa, se debe solucionar la problemática de barrido y captura de datos en ambos ejes, sin embargo, para facilitar su explicación, se desarrolla la solución de cada problemática por separado

La problemática del barrido se puede solucionar mediante la inserción de una estructura *For Loop* dentro de otro, siendo el que engloba al primero, el que determina el número de iteración actual en Y, por lo que se nombra por fines explicativos como *For Loop Y*, mientras que, por otra parte, el que se encuentra dentro de la estructura anterior sirve para contar las iteraciones en X, nombrándolo como *For Loop X*.

Tomando en cuenta que el colocar directamente el movimiento correspondiente en *For Loop Y* da como resultado perder el primer arreglo de datos de este eje, es necesario indicar el orden de movimiento para completar esta secuencia.

Por ello se usa la función *Flat Sequence Structure* para englobar la estructura *For Loop X*, y así indicar el orden de movimiento de los motores, requiriendo completar el desplazamiento de P_{Xi} a P_{Xf} , previo a avanzar una unidad de distancia

en el eje Y, al mismo tiempo de guardar el valor P_{XfReal} en el fichero de posición de este eje.

Con referencia a lo anterior, es necesario mencionar que el avance realizado por distancia se logra al utilizar el bloque *1 Paso sentido horario* en cada eje, esto un total de Pa veces, siendo la distancia de separación entre cada toma de datos.

Una vez completado el desplazamiento en X y después de avanzar una posición en Y , se manda a llamar el bloque *Motor Mover a posición* para regresar el eje X a la posición P_{Xi} reiniciando el barrido en ese eje.

Esta secuencia se repite al introducir como el contador N de los *For Loop*, a las variables $NS_X + 1$ y $NS_Y + 1$, siendo requerida esta adición debido a que la estructura cuenta la iteración "0" como la primera en realizarse, concluyendo de esta manera la operación de barrido

Continuando con las problemáticas presentadas, para resolver la captura y almacenamiento de datos, primeramente, se opta por utilizar un par de elementos tipo *Array*, para almacenar el conjunto de valores de posición de cada eje del dispositivo, mientras que por otra parte se hace uso de un tercer arreglo para almacenar los valores de fotoluminiscencia adquiridos durante todo el barrido de la superficie.

Es por ello, que la captura de datos debe ser definida en el lugar correcto de la secuencia de instrucciones, puesto que cada valor debe estar asociado al correspondiente *Array* de cada eje.

Por lo tanto, se propone la captura de datos antes de realizar cualquier movimiento en X , obteniendo de esta manera el valor de la posición 0 de cada eje. Esto se logra al introducir un *Flat Sequence Structure* dentro del elemento *For Loop* X , indicando el orden ya mencionado.

Finalmente, como último paso de esta secuencia de instrucciones, es necesario guardar la posición final real en los ficheros de posición, al mismo tiempo de presentar los datos obtenidos permitiendo un fácil análisis al usuario.

Esto se logra al introducir la función *Plot helper* en el programa, la cual muestra gráficamente la información almacenada en un conjunto de entradas tipo *Array*, siendo el caso los obtenidos y descritos anteriormente.

Este programa, tal como se ha descrito, se presenta en la Figura 3.26, tomando el nombre de *Programa barrido*, mientras que la interfaz final presentada al usuario es mostrada en la Figura 3.27.

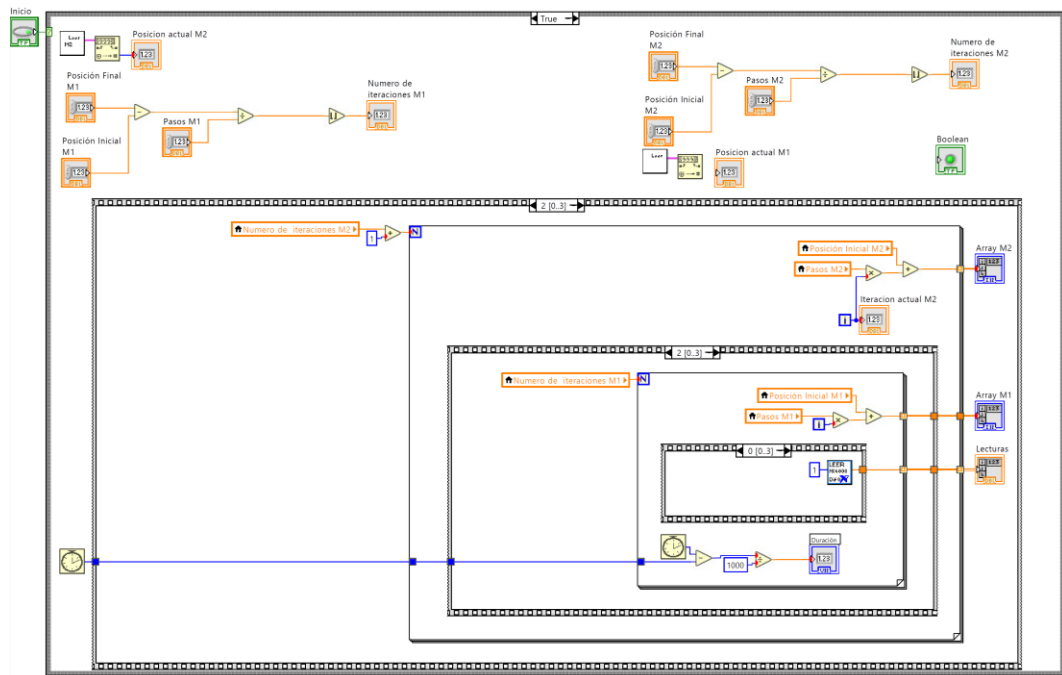


Figura 3.26 Bloque de Programa barrido

En la Figura 3.27, se puede observar como la interfaz final, conjunta los programas realizados en este trabajo de investigación y al mismo tiempo que son presentados como herramientas al usuario para un óptimo manejo del sistema. Donde , cada una de las funciones disponibles se presentan de manera grafica para que el usuario tenga un manejo intuitivo de la misma.

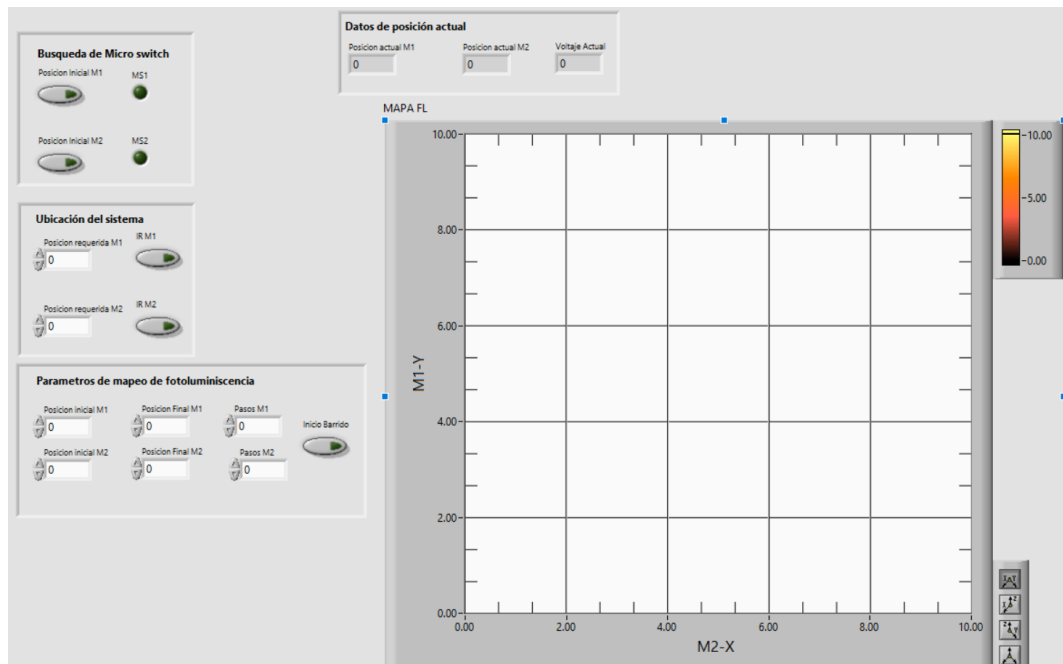


Figura 3.27 Interfaz final

La interfaz final mantiene al alcance del usuario las funciones enlistadas a continuación

- Búsqueda de posición de inicio en ambos ejes
- Posicionamiento de los ejes del sistema
- Ajuste de parámetros para el mapeo de fotoluminiscencia
- Visualización del mapa obtenido

Mientras que en la Figura 3.28, se presenta el diagrama eléctrico usado en la implementación de este proyecto, mostrando la relación electromecánica del sistema.

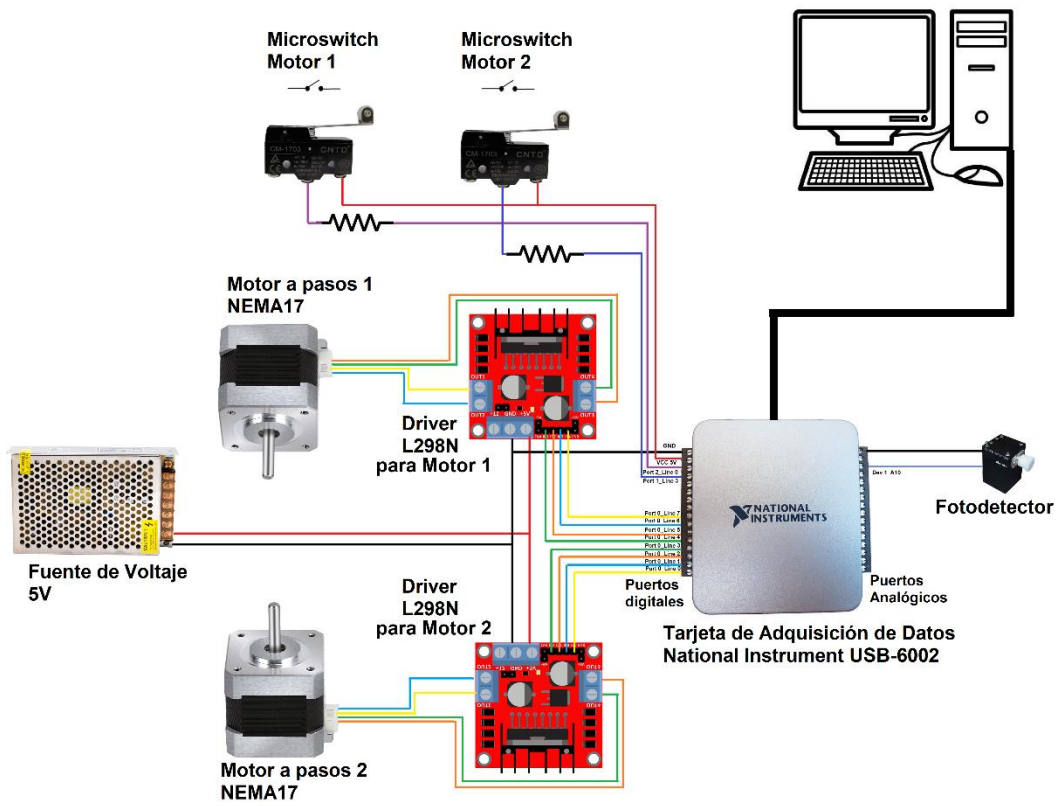


Figura 3.28 Diagrama eléctrico del sistema

Concluyendo de esta manera el desarrollo experimental de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Tras completar el desarrollo práctico del sistema, se realizan las pruebas pertinentes en distintos materiales y superficies usando un láser de estado sólido color violeta, cuya longitud de onda es de 405 nm, con la finalidad de exponer el desempeño del dispositivo construido, comprobando la repetibilidad y reproducibilidad en los resultados, demostrando un control preciso de su movimiento al relacionar las pruebas con las ecuaciones de la sección 3.2.1.

Estas pruebas deben realizarse con diversos parámetros de movimiento, de tal forma que el usuario pueda comparar estos resultados para así determinar zonas óptimas de estudio.

4.1 Prueba posicionamiento en el origen del sistema de coordenadas

Para garantizar la repetibilidad del posicionamiento de los ejes a lo largo del tiempo, primeramente, es necesario demostrar que la posición física (0,0) del sistema coordenadas, es repetible al inicializar el programa de búsqueda de micro switch.

Para ello, al realizar un experimento similar al de la sección 3.3.3, se ubica el sistema en una posición aleatoria para después llamar al programa *Búsqueda de Micro switch*, donde ahora el valor a comparar para determinar la reproducibilidad es el resultado de la distancia entre la base móvil del dispositivo posicionador y la pared donde concluye su desplazamiento. La distancia por evaluar es ejemplificada en la Figura 4.1.

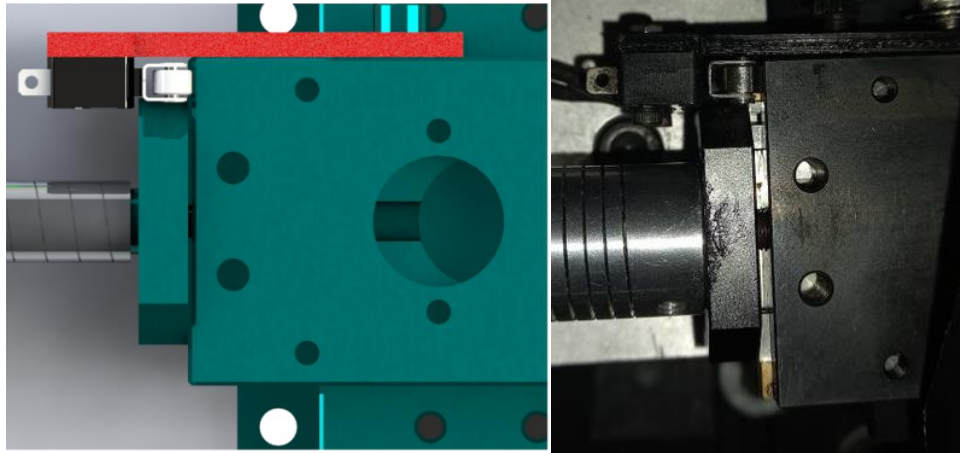


Figura 4.1 Comparativa de la separación simulada vía software contra implementación mecánica

Al calcular la distancia resultante con la ayuda de software y un calibrador digital, es posible determinar que los valores alcanzados tras múltiples ejecuciones del programa se encuentran entre el rango de valores 0.47 a 0.48 mm en el eje X y 0.51 a 0.52 mm en el eje Y.

Al relacionar esta distancia con la del modelo CAD del sistema, se puede interpretar que la diferencia entre las medidas propuestas (0.5 mm en cada eje) y las obtenidas son resultado de la precisión de la manufactura por medio de la impresión 3D de los soportes de los micro switch, sin embargo, al considerar el área total de movimiento, puede tomarse como despreciable esta variación al no afectar los resultados ni el área de trabajo.

Considerando con ello, el correcto cumplimiento del objetivo específico *Diseñar y maquinar las piezas para adaptar el mecanismo de posicionamiento utilizando el software de diseño SolidWorks®*, al demostrar que la manufactura de estas piezas satisface las consideraciones utilizadas para el modelado por computadora.

Por otra parte, según lo planteado en la sección 3.3.3, la variación máxima de posición que resulta al ejecutar el programa se debe a la ubicación de la base móvil con respecto a la posición del eje de los motores, cuyo límite es lo equivalente a una secuencia de pasos, es decir 0.01 mm o 10 μm .

Es por ello, que, al comparar las distancias obtenidas en ambos ejes, se puede corroborar que la variación de la posición del origen fue considerada en la precisión del sistema, haciendo énfasis, que dada la limitación ocasionada por el área del spot láser hace que esta variación no afecte la resolución de los mapas.

4.2 Prueba de precisión del movimiento

Dada la relación giro-desplazamiento del posicionador micrométrico, para calcular el desplazamiento de los motores se utiliza la ecuación de la sección 3.2.1, modificándola al considerar que el movimiento del dispositivo se basa en una secuencia de 4 pasos del motor. Por lo que se presenta como la ecuación 4.1 como el producto de esta consideración, y por lo tanto, se obtiene la resolución teórica del dispositivo.

$$\frac{\frac{Distancia}{Vuelta}}{\frac{Pasos}{Vuelta}} * \frac{Pasos}{Secuencias} = \frac{500 \text{ } \mu\text{m}}{200 \text{ } \mu\text{m}} * \frac{4 \text{ Pasos}}{1 \text{ Secuencia}} = 10 \frac{\mu\text{m}}{\text{secuencia}} \quad \text{ec. 4.1}$$

Para comprobar esto, es necesario medir el desplazamiento para diferentes números de secuencias del sistema teniendo como resultado el movimiento en unidades de longitud que concuerde con las ecuaciones presentadas, sin embargo, dada la geometría del dispositivo, es necesario elegir la herramienta correcta de medición que permita medir la distancia al mismo tiempo que se realiza el movimiento.

Por ello, colocar un calibrador digital sujeto a la pared del posicionador, permite un suave desplazamiento del pie móvil al mismo tiempo que la superficie móvil del sistema realiza la trayectoria indicada en el programa.

Después de poner y sujetar los elementos de prueba en la posición inicial del sistema, el calibrador digital se configura para considerar esta posición como el cero de la medición, realizando movimientos con valores de 10, 50, 100, 1500 y 1800 secuencias, y siguiendo la trayectoria en tiempo real por medio de un indicador numérico colocado en la interfaz, comparando con las lecturas del calibrador digital, las cuales obtienen los valores de 0.1, 0.5, 1.0, 15.0 y 18.0 mm y es por eso que corresponden al producto del número de secuencias por 0.01 mm / secuencia.

Siguiente a las mediciones, al realizar pruebas del desplazamiento máximo del dispositivo, se encuentra que es posible superar los límites especificados por el fabricante de posicionador (15 mm) hasta un valor cercano a 19 mm, sin embargo, por seguridad se limita en la interfaz la posición máxima del dispositivo a 18mm del origen, para así evitar el desacoplamiento de la base móvil.

Posteriormente, para comprobar que después de una secuencia de movimientos esta no genera una pérdida de la posición de origen y al mismo tiempo que afecte la reproducibilidad de la posición, se inserta un *Round Led* a la interfaz de usuario, el cual se activa en tiempo real al momento de ser presionado el micro switch de cada eje.

Por lo que, al completar una serie de movimientos, lo que implica la separación entre la base móvil del micro switch, se indica al programa la necesidad

de regresar a la posición 0, utilizando la sección *Motor mover a posición*, con el cual se observa que, al llegar a la posición deseada, el elemento *Round Led* se activa, conforme a lo esperado, considerando así exitosa esta prueba y al mismo tiempo alcanzado el objetivo de ubicar correctamente el sistema de manera controlada.

4.3 Prueba de efecto inercial

Considerando la escala de movimiento del sistema, al mismo tiempo que el peso de la muestra a analizar, es necesario evaluar el efecto inercial ocasionado por el movimiento de los motores sobre la muestra al momento de la medición.

Para ello se propone la evaluación de una muestra mapeada consecutivamente en múltiples ocasiones entre las cuales sus condiciones iniciales de movimiento sean las mismas, buscando obtener una correlación entre la ubicación del punto a analizar en conjunto con los resultados obtenidos en esa posición.

Tomando en consideración factores como el ruido y la disminución de emisión de FL del silicio poroso tras ser excitado por un tiempo considerable, se propone como puntos a analizar el contorno que delimita el área de silicio poroso, el cual contrasta en gran medida con la baja emisión resultante del silicio no poroso, dando como resultado una fácil identificación de estas áreas.

Al usar un software para gráficos y análisis de datos tal como Origin, es posible comparar los resultados obtenidos en múltiples mapeos de manera grafica y analítica, obteniendo como resultado los mapas mostrados en la figura 4.2.

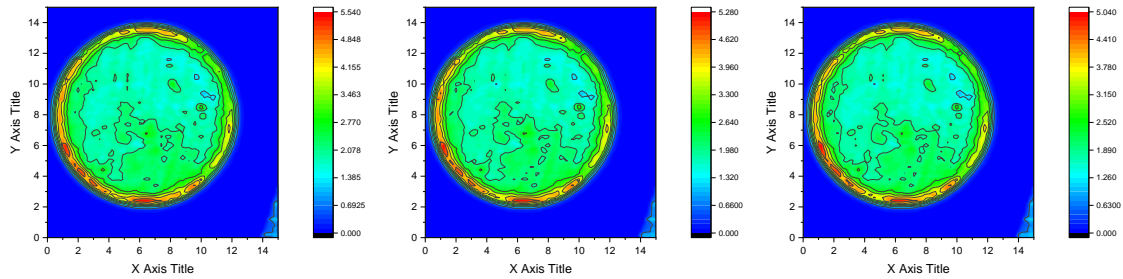


Figura 4.2 Prueba de efecto inercial

A pesar de que visualmente los mapas guardan similitudes en tanto forma y tamaño, para poder determinar si el movimiento de los motores afecta negativamente la repetibilidad de los resultados se toma un punto al azar ubicado en el área limítrofe del silicio poroso, obteniendo así una relación constante entre medición del punto a analizar y los valores obtenidos en sus alrededores.

Una vez comprobada la repetibilidad de esta prueba a lo largo del contorno, resulta preciso concluir que el posicionamiento de la muestra no resulta afectada por la inercia del movimiento de los motores a lo largo del tiempo.

4.4 Efecto de la vibración sobre la muestra

Haciendo uso de los datos en la prueba descrita con anterioridad, resulta oportuno plantear el posible efecto de la vibración de los motores en los resultados obtenidos en los mapeos.

Para ello, es posible utilizar nuevamente el software Origin para definir zonas cuya eficiencia resulte proporcionalmente constante a través del tiempo, esto considerando el impacto del ruido en zonas de baja eficiencia

Para ello, se inicia la prueba al identificar el punto de mayor intensidad en los mapas de estudio, donde se destaca que, a pesar de la diferencia obtenida en los

valores causante de la caída de la intensidad de emisión del silicio poroso, se observa una constante de posición entre los diversos mapas, siendo los casos atípicos aquellos que fueron afectados ligeramente por el ruido, sin embargo, la diferencia entre el valor máximo y el obtenido en esa coordenada resulta entre 0.43-2.98% del valor máximo del mapa analizado

En base a lo anterior se concluye que el efecto de la vibración ocasionada por los motores no evita que el sistema mantenga una repetibilidad de los resultados a través del tiempo.

4.5 Prueba de Mapeo en patrones definidos

Tomando en cuenta que al mapear una superficie de un semiconductor no existe una referencia clara para evaluar de manera sencilla el patrón de la intensidad de fotoluminiscencia resultante, proponer realizar un mapeo de materiales que presente fotoluminiscencia y cuyo patrón de forma sea de fácil interpretación, es un posible método para comprobar el correcto mapeo de una superficie al igual que la resolución alcanzada por el sistema.

Por esto, analizar materiales como el papel, el cual presenta fotoluminiscencia, resulta adecuado evaluar la correcta realización del mapeo de una superficie usando el sistema desarrollado. Por tener un patrón de forma bien definido además de contener diversas tonalidades, al seleccionar una hoja de papel milimétrico como muestra de análisis, se espera que el mapa obtenido muestre variaciones de intensidad en las áreas de mayor y menor concentración de pigmentos, permitiendo relacionar la posición del láser con respecto a los resultados del mapeo.

Iniciando el proceso al fijar la hoja en la base móvil del posicionador ubicándola de tal forma que el spot laser impacte en la esquina inferior de esta,

prosiguiendo a realizar un análisis con los parámetros de posición inicial (0,0), posición final (500,480) y con una distancia de 200 μm entre cada medición de ambos ejes, obteniendo los resultados presentados en la Figura 4.2, donde se puede observar que el patrón formado presenta una apariencia similar a la de la hoja milimétrica.

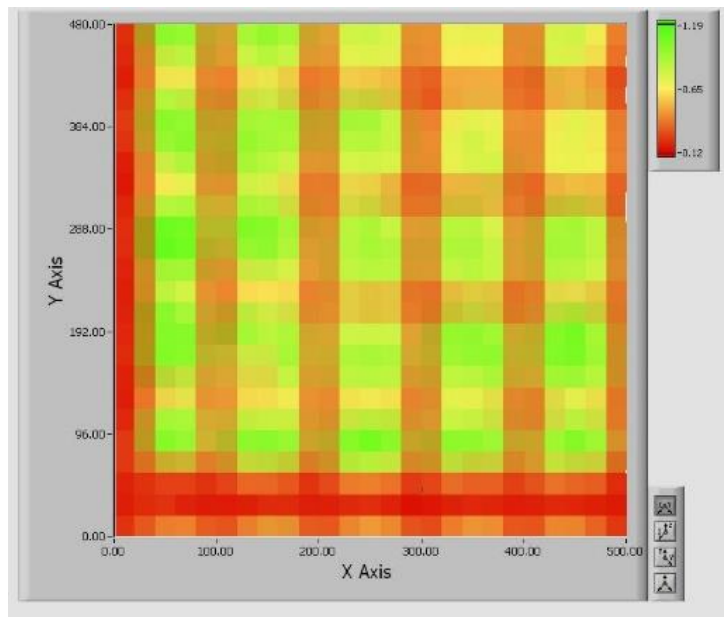


Figura 4.3 Mapeo con longitud de onda 520nm de una hoja milimétrica

En este mapa se puede destacar la formación de líneas paralelas al eje Y con la menor intensidad en el mapa y con un milímetro de distancia entre cada una de ellas, lo cual demuestra que hay menor emisión de fotoluminiscencia en las áreas donde hay pigmento.

Sin embargo, las líneas paralelas al eje X, se presentan de manera difusa en las posiciones cercanas al origen de la medición, mejorando su calidad a lo largo del movimiento, interpretando que la mayor parte del spot laser impacta sobre el área no pigmentada, identificando que debido a la forma en que se encuentra fijada

la hoja milimétrica, el movimiento del spot laser no coincide con las líneas trazadas en la hoja.

Por lo tanto, resulta oportuno realizar un nuevo estudio optimizando la posición actual de la muestra, además de ampliar el área de análisis a (720, 740) de tal forma que se abarque la línea que divide cada 5 mm la superficie, debido a que esta al tener mayor grosor, debe mostrar una menor intensidad de fotoluminiscencia en el mapa obtenido.

Con estas consideraciones, se obtiene como resultado la Figura 4.3, donde se mejora la formación de las líneas paralelas al eje X, al mismo tiempo que, según lo planteado, se observan un par de línea más oscuras, cuya ubicación corresponde a los 5 mm de la hoja milimétrica.

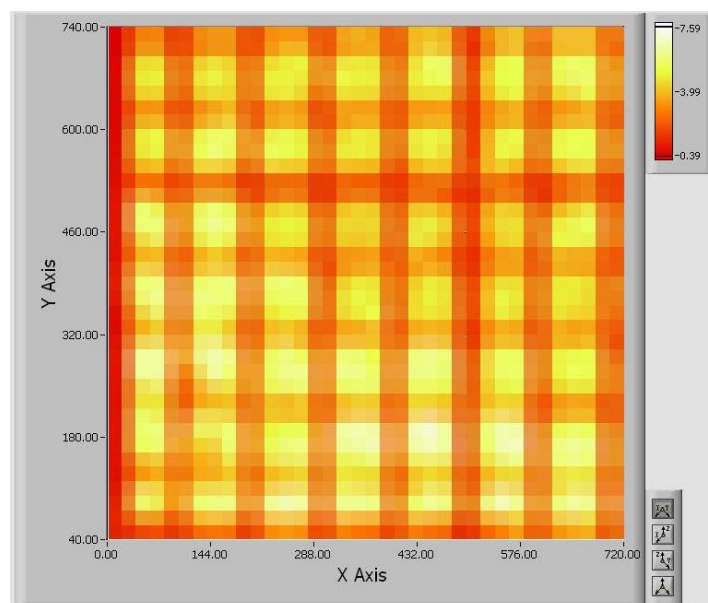


Figura 4.4 Segundo mapeo con longitud de onda 520nm de hoja milimétrica, destacando formación de las líneas en las ubicaciones esperadas

Posteriormente de demostrar que los resultados obtenidos mantienen una relación de la posición real con la posición mostrada en la gráfica, se continua con el mapeo de figuras no ortogonales, con el fin de comprobar que los resultados obtenidos mediante el mapeo de fotoluminiscencia proporcionan un correcto acercamiento de la morfología superficial de las muestras a analizar.

Para ello, usando como referencia el logotipo de la BUAP, se realiza el montaje presentado en la Figura 4.4, en el cual se lleva a cabo un mapeo con los siguientes parámetros de medición: 0 a 15,000 μm en el eje X, el eje Y de 1,200 μm a 6,000 μm y con una separación de 200 μm entre cada punto.

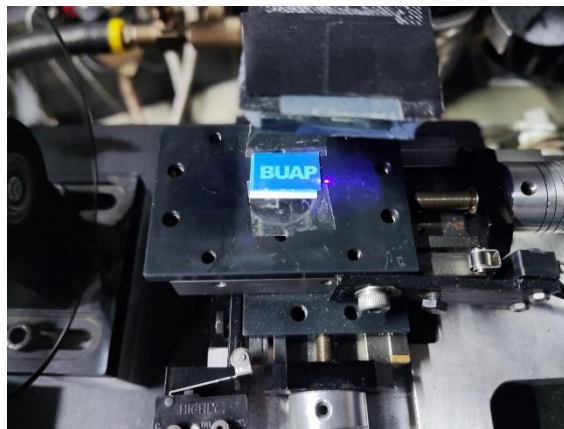


Figura 4.5 Montaje de la muestra a mapear como prueba de mapeo de figuras no ortogonales

Como se puede observar en la Figura 4.5, los resultados obtenidos muestran una mayor intensidad de fotoluminiscencia en las áreas cuyos colores presentan tonalidades más claras, destacando la formación de contornos bien definidos alrededor de cada una de las letras presentes en el logotipo.

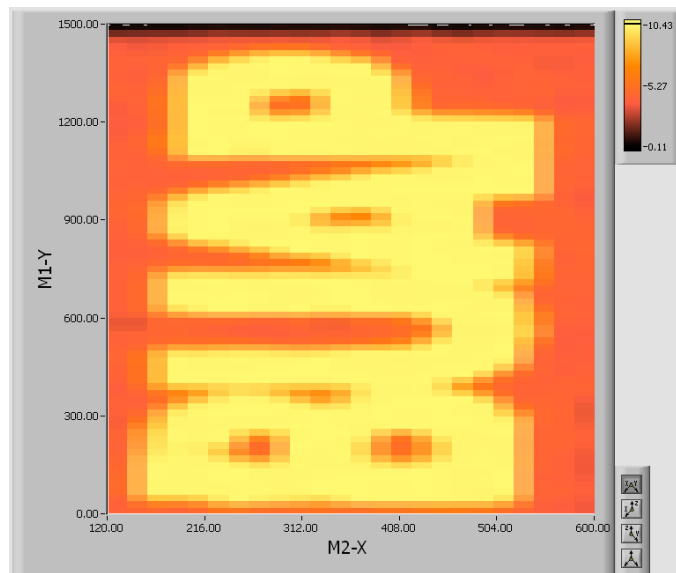


Figura 4.6 Mapeo con longitud de onda 455nm de logotipo de la BUAP como prueba de figuras no ortogonales

En esta figura es posible destacar la homogeneidad de la intensidad de fotoluminiscencia en las zonas de menor y mayor intensidad, atribuido a la homogeneidad de la tinta usada en la impresión del logotipo.

Sin embargo, debido a que el diámetro del spot del láser es de $100\ \mu\text{m}$, el mapa define los límites entre las áreas claras de las letras y el fondo más oscuro con esta misma resolución de $100\ \mu\text{m}$, presentando en los bordes de estos límites una intensidad intermedia entre la zona clara y la zona oscura, esto debido a que el área excitada por la fuente láser comparte ambas tonalidades del logotipo, aspecto que no deforma el aspecto de las letras.

Concluyendo de esta manera que el sistema es capaz de mapear exitosamente una superficie con un patrón ya conocido, al comparar los resultados

esperados con los obtenidos, por lo tanto, se ha cumplido con el objetivo específico de desarrollar un programa para control de mecanismo de movimiento y captura de datos usando LabVIEW®.

4.6 Mapeo de fotoluminiscencia de Semiconductores

Finalmente, para cumplir con el objetivo general de este trabajo de investigación, se realiza mapeos de fotoluminiscencia en superficies de materiales semiconductores, donde la primera muestra a analizar es silicio poroso con una forma circular, esta muestra es mencionada en la justificación, la cual, previo a este sistema, se caracterizó de manera manual y poco precisa obteniendo la Figura 4.6, buscando encontrar similitudes tales como áreas de menor eficiencia en ambos resultados.

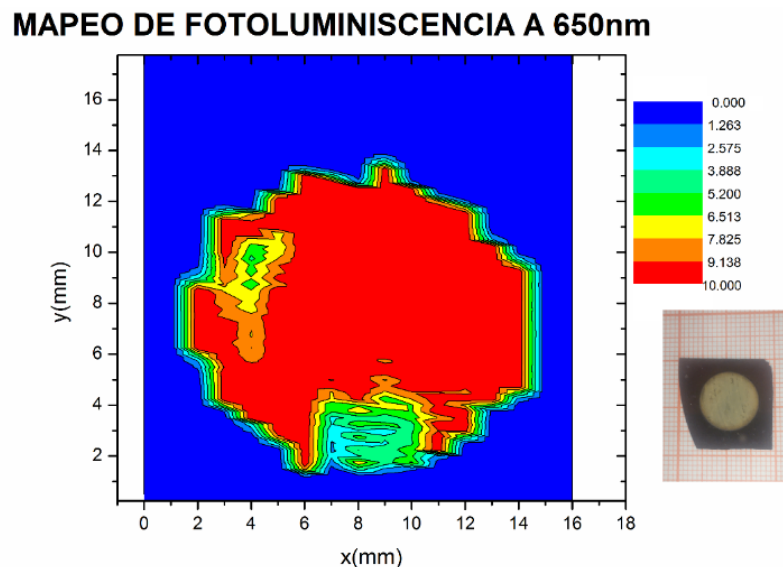


Figura 4.7 Mapeo con longitud de onda 650nm de muestra de silicio poroso obtenida de forma manual previo a la automatización del sistema, siguiendo la escala del lado izquierdo

Para ello se considera realizar primero un análisis de baja resolución, cuyos parámetros son posición inicial (0,0), posición final (1800,1600) y con una distancia

de 2000 μm entre cada medición, con la finalidad de demostrar que el sistema permite la realización de pruebas preliminares con bajo tiempo de análisis, cuyos resultados deben asemejarse a los esperados en mapeos de mayor resolución.

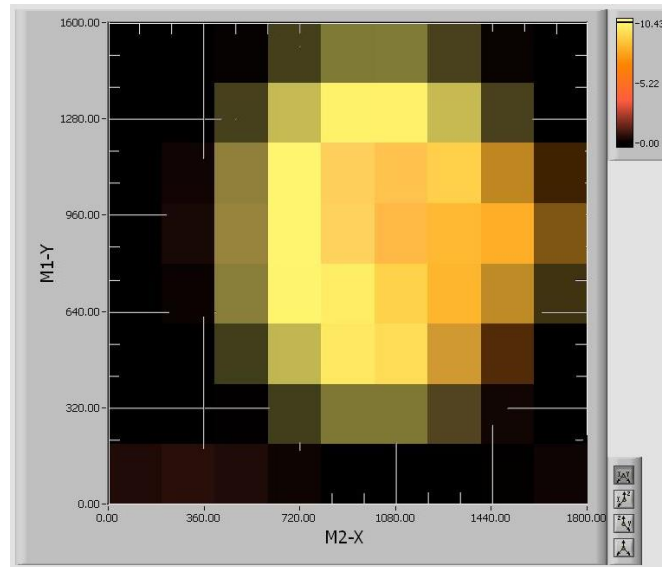


Figura 4.8 Mapeo con longitud de onda 650nm de muestra de silicio poroso obtenida de forma automatizada con incrementos de 2mm

Como resultado de esta prueba, se obtiene la Figura 4.7, donde se puede observar que, a pesar de su baja resolución del mapeo, el sistema sigue detectando una menor intensidad en la misma región inferior que la del mapa obtenido manualmente, sin embargo, debido a la orientación de la muestra, esta región de menor intensidad aparece del lado derecho del mapa obtenido de manera automatizada.

Por otra parte, como consecuencia de su baja resolución, el sistema no detecta la otra región de baja intensidad más pequeña, por lo que debe considerarse este tipo de análisis de baja resolución únicamente como pruebas preliminares de materiales que no necesiten un análisis detallado.

Posteriormente, con el fin de detectar la segunda área de menor intensidad de la Figura 4.6, se realiza un análisis de mayor resolución cambiando en la interfaz los parámetros de posición final a (1800,1800) y de distancia entre cada medición a 400 μm , obteniendo el resultado que se presenta en la Figura 4.8

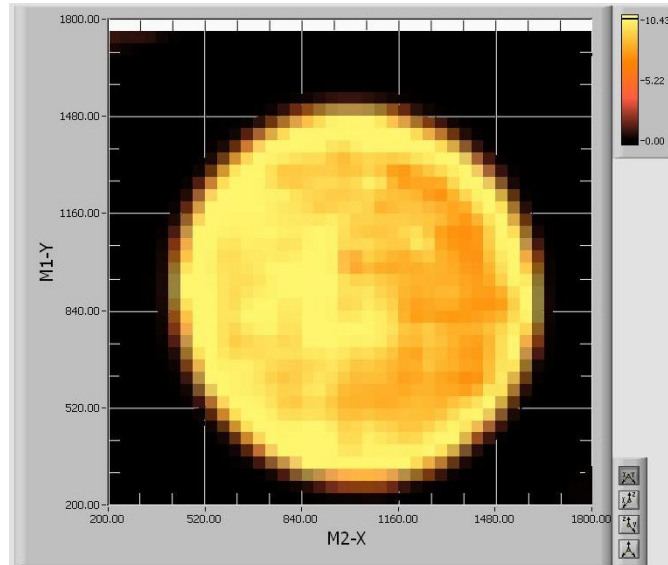


Figura 4.9 Mapeo con longitud de onda 650nm de muestra de silicio poroso obtenida de forma automatizada con incrementos de 400 μm

Estos últimos resultados muestran que la calidad de la imagen se puede mejorar considerablemente al realizar estudios de mayor resolución, definiendo las zonas de menor intensidad de manera más clara, haciendo evidente que, contrario a la Figura 4.6, se puede observar que se tiene una forma diferente respecto al mapa automatizado debido a la baja precisión y exactitud resultante de un movimiento manual por el realizador del experimento, destacando regiones con diferente intensidad de fotoluminiscencia de la superficie, siendo consecuencia de diversos factores variables como el proceso de fabricación y estado actual de la muestra.

Una vez comparado los resultados obtenidos previos al sistema con los de un sistema automatizado, se continua con el mapeo de una muestra cuyo referente para la interpretación de resultados sea el proceso de fabricación utilizado para la formación de este.

Siendo el caso de una película de Sulfuro de Cadmio (CdS) cuyo deposito se realizó mediante la inmersión un sustrato de vidrio en la solución de un baño químico, donde se destaca la formación de diversas capas de material cerca de la superficie de la solución donde la inmersión es variable, debido a la agitación del baño químico durante el depósito, esto se observa a simple vista en la Figura 4.9, intuyendo que la fotoluminiscencia tiene una menor intensidad en las áreas donde la concentración del material es menor.



Figura 4.10 Imagen de la película de Sulfuro de Cadmio

Para ello se realiza un mapeo de 0 a 1,500 pasos en ambos ejes, con un incremento de 50 pasos entre cada medición, obteniendo la Figura 4.10, la cual es presentada a continuación.

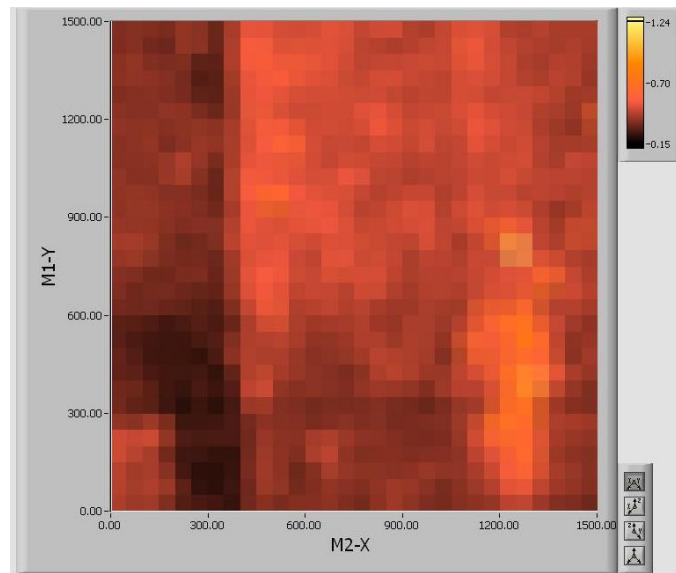


Figura 4.11 Mapeo con longitud de onda 770nm de muestra de Sulfuro de Cadmio

En esta figura, se corrobora la hipótesis presentada anteriormente, al observar como las zonas cuya concentración del material es menor (lado izquierdo) presentan una menor intensidad de fotoluminiscencia, además de observar que, debido a que las condiciones de inmersión cerca de la superficie de la solución presentan variaciones debido a la agitación, el mapeo no resulta homogéneo.

Cabe mencionar que este último mapeo se realizó en una región del infrarrojo cercano (770nm), por lo que la variación de la fotoluminiscencia emitida no es visible para el ojo humano, haciendo notar que el mapeo permite analizar regiones fuera del espectro visible.

Con estos resultados se puede concluir que el sistema cumple con el objetivo general del proyecto que es desarrollar un sistema automatizado capaz de realizar un mapeo de FL haciendo uso de una interfaz gráfica mediante el software LabVIEW®.

4.7 Comparación del sistema previo con el actual

Siguiendo la propuesta inicial, donde este trabajo se considera como una extensión del sistema original, resulta conveniente presentar el sistema actual de tal forma que sea visible el trabajo realizado.

Tal como se puede observar en la Figura 4.11, los elementos pertenecientes a la etapa de enfoque del haz láser y la señal de fotoluminiscencia se mantienen constantes con respecto al sistema previo, siendo la parte señalada con color rojo, el sistema desarrollado en este trabajo de investigación.

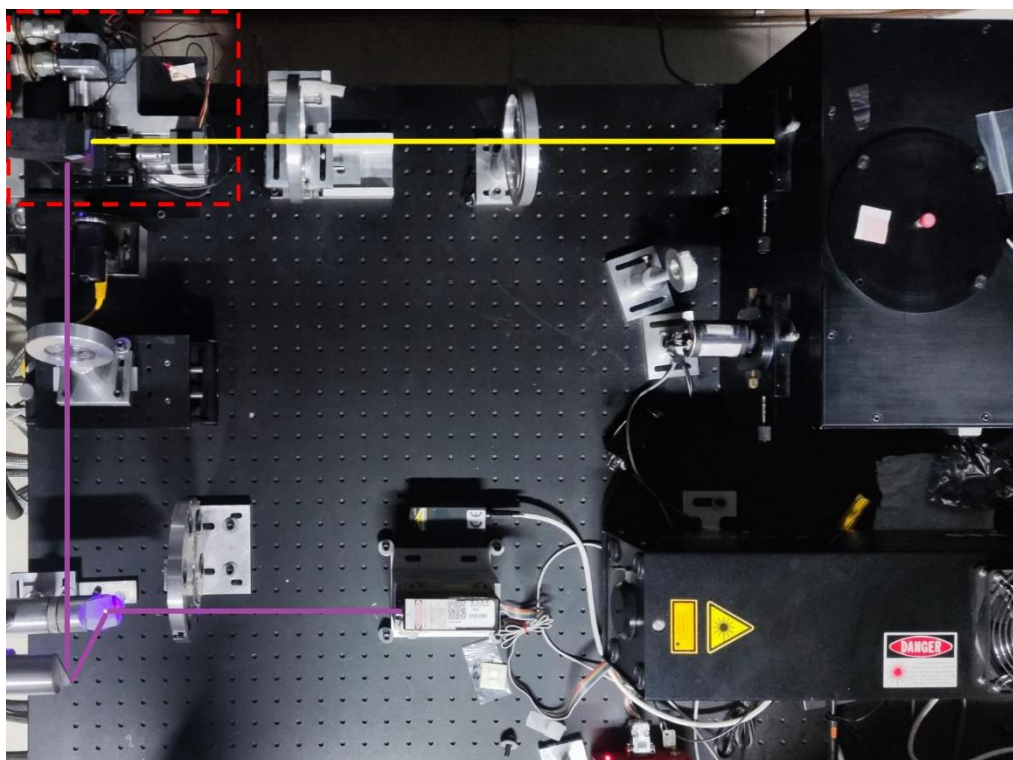


Figura 4.12 Implementación del sistema actual, el haz láser es representado por la línea color violeta y la señal de FL por la línea amarilla

Este sistema cumple con el objetivo principal de adaptar un módulo de posicionamiento (X, Y) al sistema de medición de fotoluminiscencia con la finalidad de obtener mapas de la intensidad de fotoluminiscencia de manera automatizada y controlada por un software desarrollado en la plataforma LabVIEW®.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló e incorporó un módulo de posicionamiento automatizado por medio de LabVIEW®, con el cual se logra ampliar las capacidades del sistema de fotoluminiscencia del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores del Instituto de Ciencias de la BUAP, obteniendo mapas de fotoluminiscencia en muestras de semiconductor.

Se logró obtener un sistema automatizado para la obtención de mapas de fotoluminiscencia en un área máxima de 18 mm X 18mm, con una resolución mecánica de 10 μm . Sin embargo, este sistema logra una resolución efectiva del mapa de 100 μm al estar limitado por el diámetro que ilumina el spot del láser, después de ser enfocado por el lente que lo concentra.

Este sistema demostró su funcionalidad mediante el mapeo de superficies con patrones conocidos, presentando el mapa de un patrón ortogonal obtenido de una hoja milimétrica, y de un patrón no ortogonal obtenido de las siglas del logotipo de la universidad.

Debido a la velocidad de comunicación de la tarjeta USB-6002 de National Instruments® con el programa desarrollado de LabVIEW®, el sistema alcanza una velocidad de barrido de 450 μm por segundo, lo que implica una velocidad de mapeo de 6.61 mm^2 por segundo.

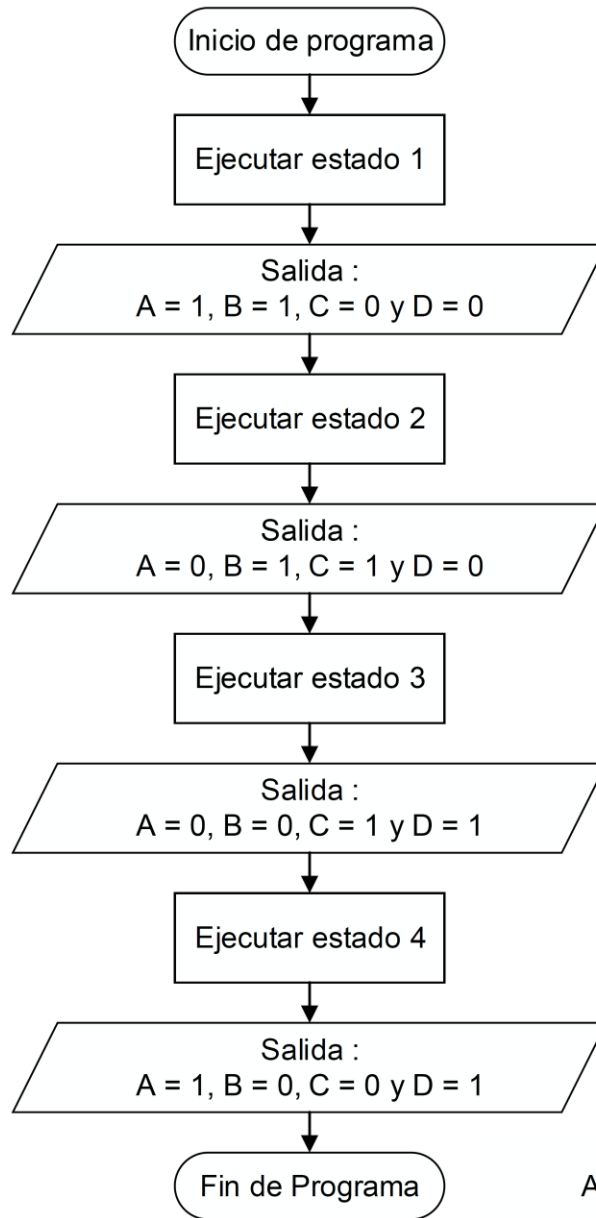
La automatización del proceso permite obtener mapas de fotoluminiscencia para la posible evaluación la homogeneidad de la superficie de materiales semiconductores, característica útil para el desarrollo de dispositivos más eficientes.

Por otra parte, el sistema desarrollado presenta áreas de oportunidad, tales como: la concentración del spot laser a un diámetro menor para aumentar la resolución efectiva de los mapas, la presentación de los resultados en tiempo real durante el análisis y la incorporación del control de la longitud de onda analizada.

Finalmente, el trabajo realizado complementa y beneficia los estudios realizados por el Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores del Instituto de Ciencias de la BUAP al igual que los de otras unidades académicas, al proporcionar información relevante sobre los procesos de manufactura de los dispositivos optoelectrónicos desarrollados por estas instituciones.

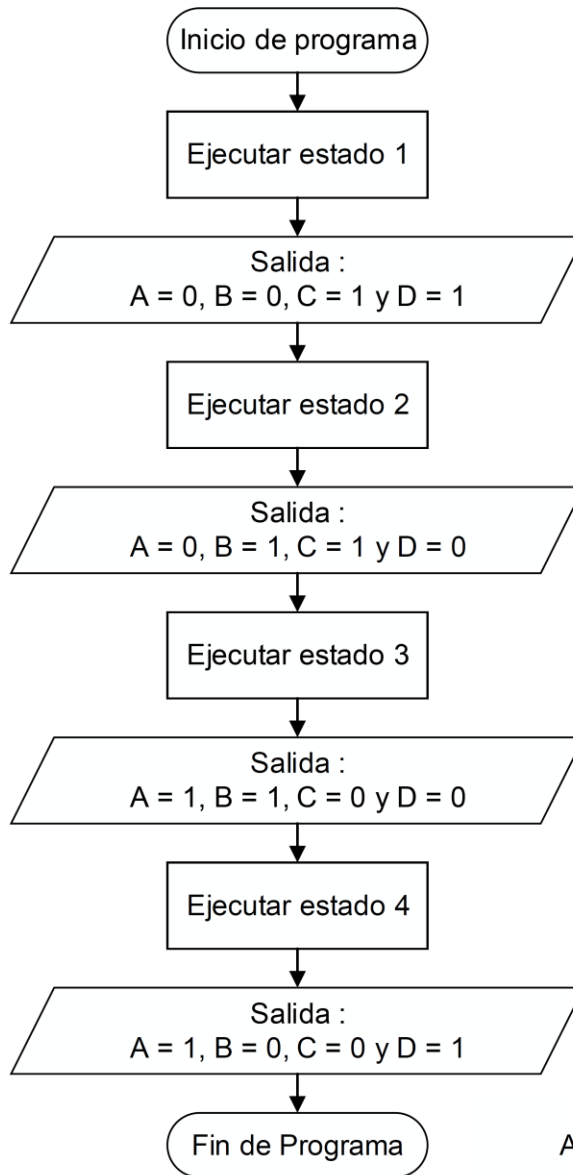
ANEXOS

Diagrama de flujo programa 1 Paso sentido Horario



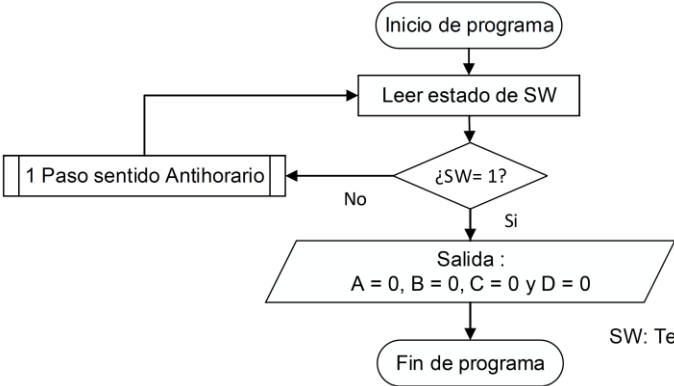
A, B, C, D : Bobinas de motor a Pasos

Diagrama de flujo programa 1 Paso sentido Antihorario



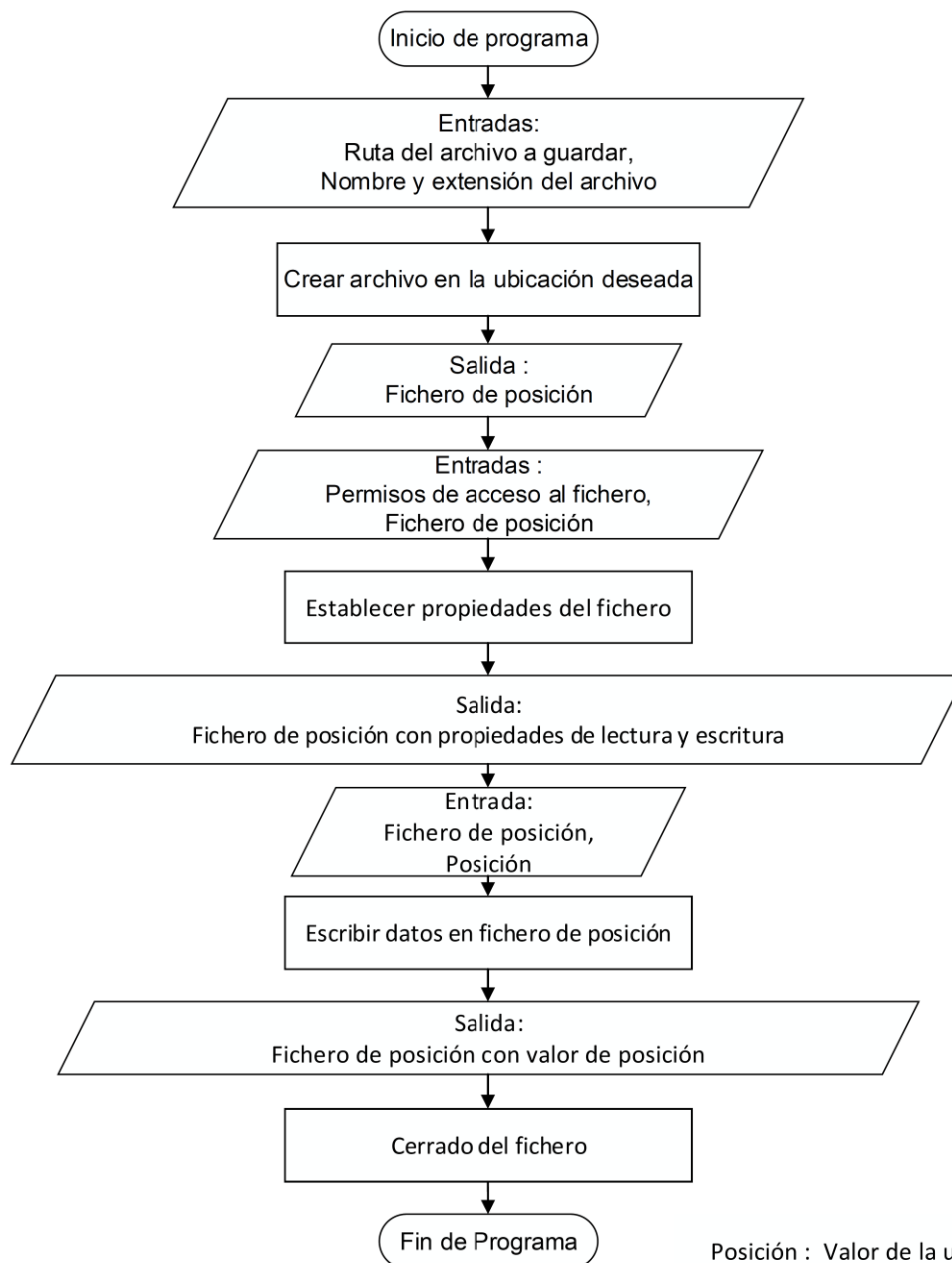
A, B, C, D : Bobinas de motor a Pasos

Diagrama de flujo programa Búsqueda de Microswitch



SW: Terminal digital conectada a la salida del micro switch
A, B, C, D : Bobinas de motor a Pasos

Diagrama de flujo programa Crear



Posición : Valor de la ultima coordenada

Diagrama de flujo programa Leer

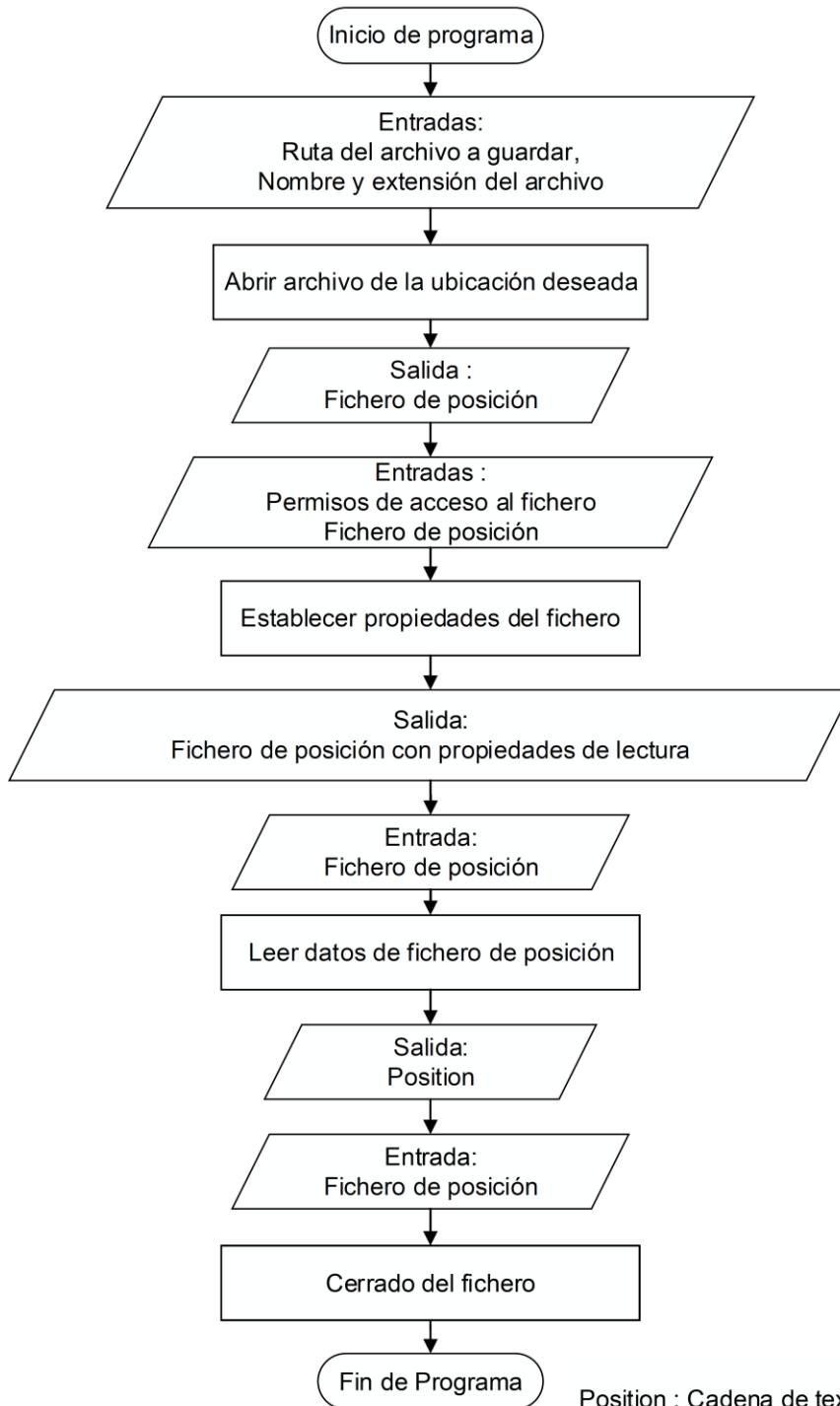


Diagrama de flujo programa Motor mover a posición

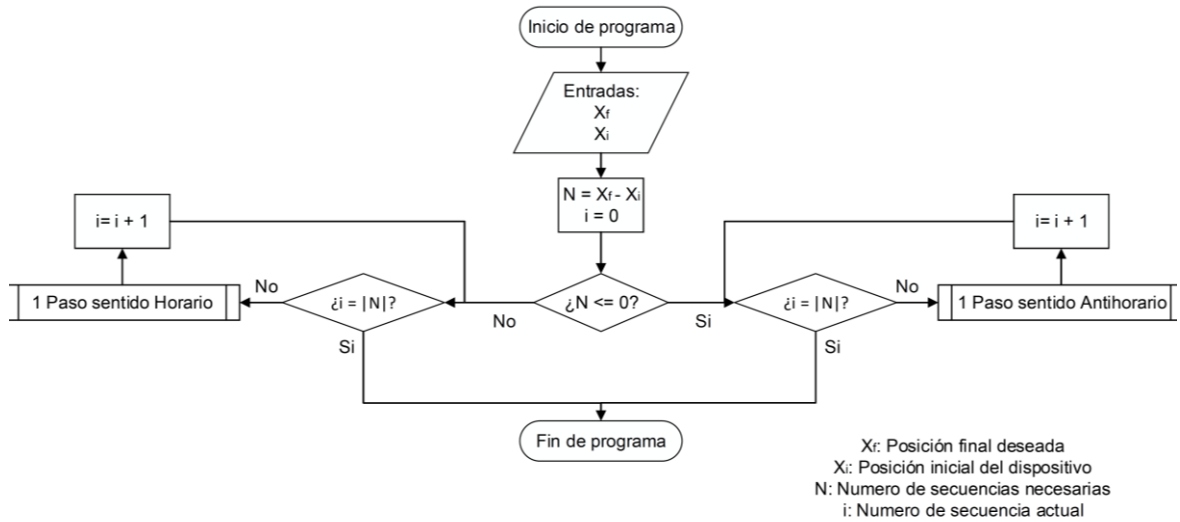


Diagrama de flujo programa Leer tarjeta

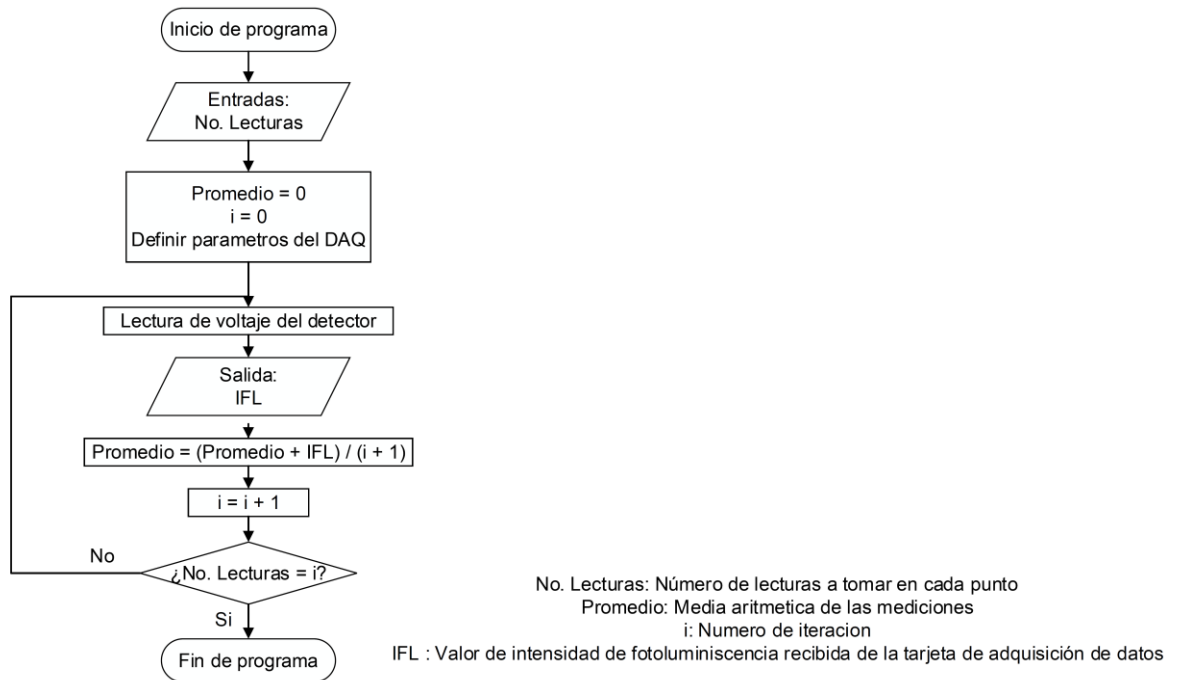
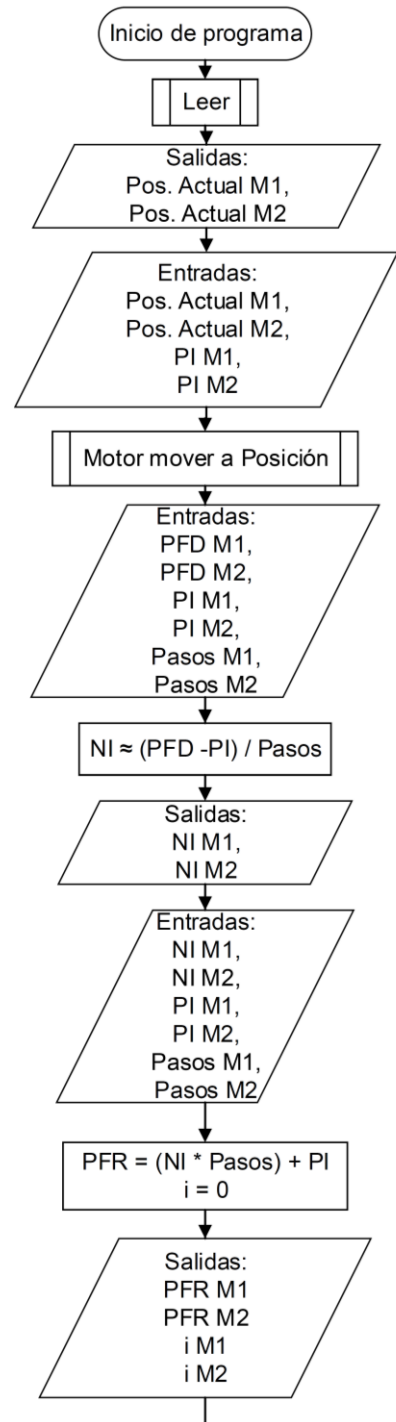
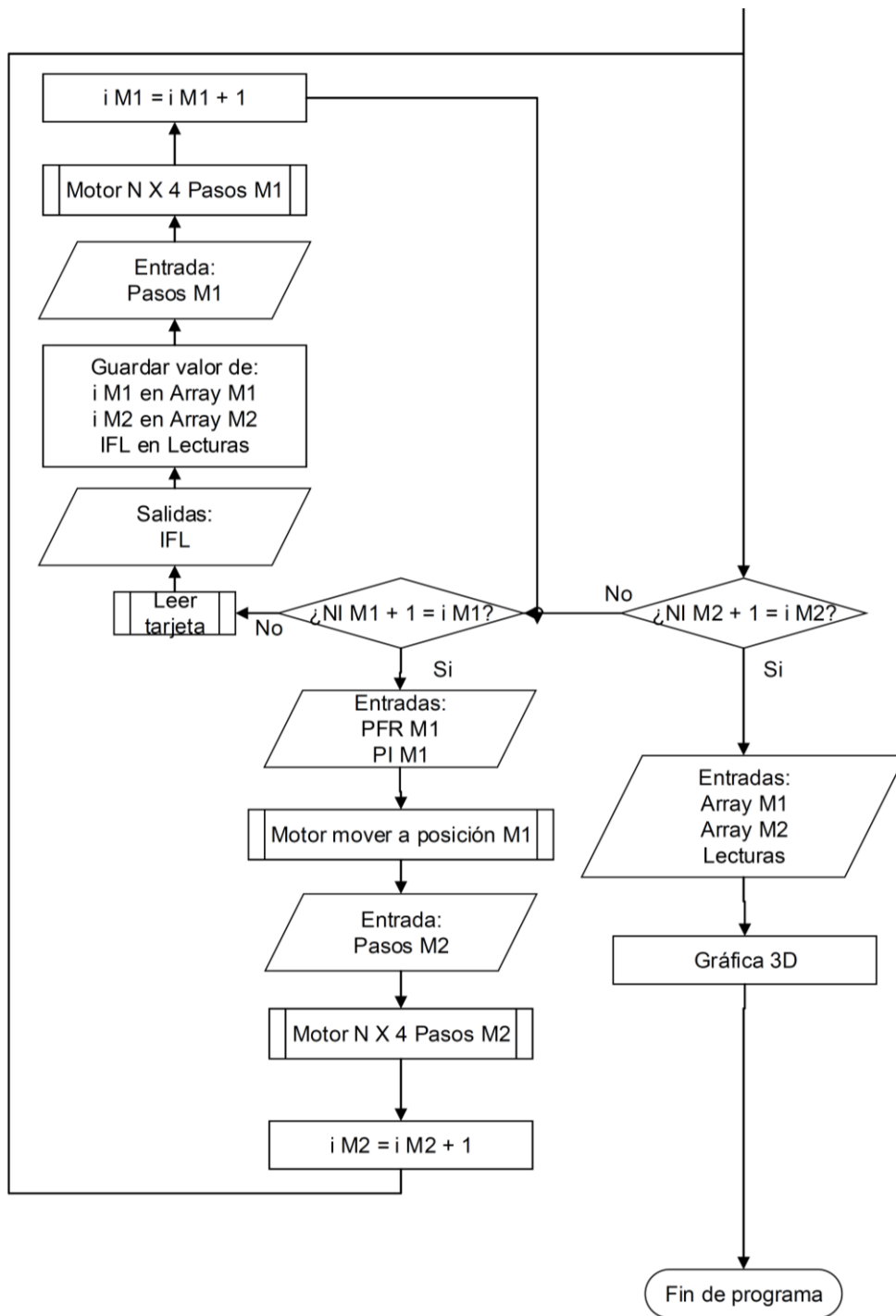


Diagrama de flujo de Programa barrido



Pos. Actual : Última posición alcanzada por los motores a pasos
 PI: Posición inicial del Mapeo
 PFD : Posición final deseada
 Pasos : Espacio de separación entre cada medición
 NI : Numero de iteraciones necesarias
 PFR : Posición final real
 i : Iteración actual
 Array : Arreglo de datos de posición de X, Y
 IFL : Intensidad de FL
 Lecturas : Conjunto de datos de intensidad de FL



REFERENCIAS

- Ariza Calderón, H. (2003). Fabricación y caracterización óptica de materiales semiconductores para aplicaciones en optoelectrónica. *Revista academica colombiana*, 357-368.
- B. El Filali, J. J. (2019). Band-edge emission, defects, morphology and structure of in-doped ZnO nanocrystal films. *Optical Materials, Volume 89*, 322-328.
- Bebb, H. B., & Williams, E. W. (1972). Photoluminescence I: Theory. *Semiconductors and Semimetals, Academic Press*, 8.
- C.J.L. Moore, C. M. (1990). A spatially resolved spectrally resolved photoluminescence mapping system. *Journal of Crystal Growth, Volume 103, Issues 1–4*, Pages 21-27,.
- Dean, P. (1982). Photoluminescence as a diagnostic of semiconductors. *Progress in Crystal Growth and Characterization, Volume 5, Issues 1–2*,, Pages 89-174.
- E. Higashi, M. T. (2006). Defect observation in SiC wafers by room-temperature photoluminescence mapping. *Materials Science in Semiconductor Processing, Volume 9, Issues 1–3*,, Pages 53-57.
- Farrera, L. (2008). Conductores Semiconductores y Aislantes. (*Artículo Científico*). Universidad Autónoma. México., CDMX.
- Imler, W. R. (1995). High-speed Photoluminescence Mapping of III-V Epitaxial Layers for Light emitting Diodes. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, 3-4.
- J. Jacome, S. E. (2021). Respuesta Fotoluminiscente observada en muestras de InP y GaAs no dopadas y dopadas Cr y S. *Prospectiva, Vol 19, N° 1*.

- Juárez Díaz, G. (2004). Desarrollo y Caracterización de un sistema de Fotoluminiscencia (PL). (*Tesis de Maestría*). Instituto de Ciencias-BUAP, Puebla.
- K.J.P. Jacobs, B. S. (2015). Non-destructive mapping of doping and structural composition of MOVPE-grown high current density resonant tunnelling diodes through photoluminescence spectroscopy. *Journal of Crystal Growth, Volume 418*, 102-110.
- McKelvey, J. (1996). *Física del estado sólido y de semiconductores*. México: Editorial Limusa.
- National Instruments. (2021). *¿Qué es LabVIEW?* Recuperado el 20 de Octubre de 2021, de <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>
- National instruments. (2022). *Open/Create/Replace File Function*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2022, de https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/glang/open_create_replace_file.html
- Orozco Cuautle, F. (2012). Dispositivos de Semiconducción. *Electrónica y Servicio*, 5.
- Ramírez González, F., & García Salgado, G. (s.f.). *Ciencia y Desarrollo*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2021, de El silicio Poroso: <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=107>
- Raya Pérez, J. C., & Aguirre Mancilla, C. (2012). El Papel del Silicio en los Organismos y Ecosistemas. *Conciencia Tecnológica No. 43*, 42-46.
- Real Academia Española*. (2020). Recuperado el 20 de Octubre de 2021, de Diccionario de la Lengua Española: <https://dle.rae.es/mapear>
- Recio Sánchez, G. (2013). APLICACIONES FOTÓNICAS. (*Tesis de Doctorado*). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.

- Rosas Diaz, H., & Delgado, I. (2012). Elaboración del silicio poroso tipo p y caracterización morfológica mediante microscopía de fuerza atómica. *Respuestas*, 55-58.
- Schroder, D. (2006). *Semiconductor Material and device characterization*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Singh, Y. (2013). *Semiconductor devices*. Nueva Delhi (India): IK International Pvt Ltd.
- T.V. Torchynska, B. E. (2019). In-related complex defects and emission of in-doped ZnO nanocrystal films. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Volume 113*, 137-142.
- U. Nogal Luis, A. C. (2010). *Estudio de la Absorción Óptica en Silicio Poroso Tipos n y p Elaborados Mediante Ataque Electroquímico: Efecto de los Parámetros de Crecimiento (Tiempo de Ataque y Valores I-V)*. CICATA-IPN, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Distrito Federal: Instituto Politécnico Nacional. Recuperado el 2 de Octubre de 2022, de <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/11292>
- Varagnat, A. (Octubre de 2020). *Photoluminescence Mapping of GaN-Based*. Recuperado el 11 de Julio de 2022, de Oxford instruments: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/photoluminescence-mapping-of-gan-based-nanostructure-arrays>