



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**REVISIÓN Y MEJORA DEL HARDWARE Y
SOFTWARE DE UN SISTEMA DE MEDIDA
LBIC PARA ESTUDIO DE CÉLULAS
SOLARES**

Autor:

González Rodríguez, Andrea

Tutor(es):

Serrano Gutiérrez, Jorge

González Francés, Diego

Departamento de Física de la

Materia Condensada,

Cristalografía y Mineralogía

VALLADOLID, JULIO 2024



RESUMEN

Este trabajo de fin de grado (TFG) recoge el proceso llevado a cabo en la revisión y mejora de un sistema de medida LBIC ("*Light Beam Induced Current*") para estudio y mapeado de corriente inducida y luz reflejada en células solares. Esta revisión y mejora se realizará tanto de su parte hardware como del software.

El aspecto en el que se centra especialmente esta mejora es en el estudio de los parámetros del electrómetro del sistema y cómo afectan estos a los mapas resultantes, la configuración y la realización del barrido de las medidas de intensidad, previendo la necesidad de incluir un algoritmo de enfoque en función de las características propias de cada muestra. Para ello se emplea el entorno de programación LabVIEW en el que está desarrollado el software actual.

PALABRAS CLAVE

- LBIC
- Hardware
- Software
- LabVIEW
- Células solares
- Fotoluminiscencia



ABSTRACT

This diploma thesis work reports the process undertaken to review and improve a Light Beam Induced Current (“LBIC”) measurement system for studying and mapping induced current and reflected light in solar cells. This review and improvement will be applied to both the hardware and software components of the system.

The primary focus of this improvement is the study of the system’s electrometer parameters and how they affect the resulting maps. This includes setting up and performing intensity measurement sweeps and anticipating the need to incorporate a focusing algorithm based on the unique characteristics of each sample. The current software, developed in the LabVIEW programming environment will be used as a starting point for this purpose.

KEY WORDS

- LBIC
- Hardware
- Software
- LabVIEW
- Solar Cells
- Photoluminescence



AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Jorge Serrano, por ofrecerme este trabajo y por su inestimable ayuda y orientación a lo largo de todo el proyecto.

A mis padres y a mi hermana, por ser mi apoyo incondicional y por estar siempre ahí para mí. Su paciencia y confianza me han dado la fuerza necesaria para seguir adelante.

A Diego, por haber sido mi compañero en este proceso. Su colaboración y amistad han sido fundamentales para superar los desafíos encontrados.

A mi familia, en especial a mi tío Toño, que nos dejó en este camino. Su recuerdo y su cariño han sido una inspiración constante.

Gracias a todos por su apoyo y por creer en mí.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	11
1.1	Conceptos teóricos	12
1.1.1	Sistema de medidas LBIC.....	12
1.1.2	Entorno de programación LabVIEW	14
2.	PLANIFICACIÓN Y COSTES	16
3.	DESARROLLO.....	18
3.1	Descripción y Análisis del sistema	18
3.1.1	Microscopio	19
3.1.2	Equipos láser	20
3.1.3	Mesa posicionadora.....	22
3.1.4	Electrómetro	24
3.1.5	Cámara y capturadora	26
3.2	Centrado de láser.....	28
3.2.1	Descripción	28
3.2.2	Posición inicial.....	28
3.2.3	Modificaciones de la posición de los espejos.....	29
3.2.4	Modificaciones a través de software	29
3.3	Configuración del Electrómetro.....	30
3.3.1	Descripción	30
3.3.2	Funcionamiento en el sistema	33
3.3.3	Configuración LBIC. Parámetros (estudio)	33
3.3.4	Comparación entre datos teóricos y muestras reales.....	44
3.4	Movimientos de barrido.....	54
3.4.1	Movimiento discreto	54
3.4.2	Movimiento continuo	54
3.4.3	Movimiento lineal actual sin zigzag.....	54
3.4.4	Movimiento zigzag.....	55
3.4.5	Comparación de resultados	56
3.5	Autoenfoco	57
3.5.1	Determinación de la posición de enfoque	59



3.5.2	Matriz de enfoque para el mapeado	60
4.	CONCLUSIONES.....	64
5.	LÍNEAS DE MEJORA.....	65
6.	BIBLIOGRAFÍA	66



Índice de imágenes

Ilustración 1. Pantalla inicial medida LBIC.....	11
Ilustración 2. Fenómeno de interacción de la luz con una muestra.	13
Ilustración 3. Mapa de foto-corriente correspondiente con un objetivo x5	13
Ilustración 4. Diagrama de bloques.....	15
Ilustración 5. Diagrama de Gantt.....	16
Ilustración 6. Dispositivos que componen el sistema LBIC	18
Ilustración 7. Microscopio	19
Ilustración 8. Fuentes de alimentación	21
Ilustración 9. Mesa posicionadora.....	22
Ilustración 10. Electrómetro.....	24
Ilustración 11. Cámara y capturadora.....	27
Ilustración 12. Espejos	29
Ilustración 13. Pantalla programa LBIC.....	30
Ilustración 14. Muestra A	44
Ilustración 15. Muestra B.....	44
Ilustración 16. Muestra C	45
Ilustración 17. Muestra D.....	45
Ilustración 18. Muestra E	46
Ilustración 19. Muestra F	46
Ilustración 20. Muestra G.....	46
Ilustración 21. Muestra H.....	46
Ilustración 22. Muestra I	47
Ilustración 23. Muestra J.....	47
Ilustración 24. Muestra K.....	48
Ilustración 25. Muestra L	48
Ilustración 26. Muestra M	49
Ilustración 27. Muestra N.....	49
Ilustración 28. Muestra O.....	49
Ilustración 29. Muestra P	49
Ilustración 30. Muestra Q.....	50
Ilustración 31. Muestra R.....	50
Ilustración 32. Muestra S	50
Ilustración 33. Muestra T	52
Ilustración 34. Muestra U	52
Ilustración 35. Muestra V	52
Ilustración 36. Muestra W	53
Ilustración 37. Muestra X	53
Ilustración 38. Muestra Y	53
Ilustración 39. Movimiento lineal	55



Ilustración 40. Movimiento zigzag	55
Ilustración 41. Muestra 1 sin zigzag.....	56
Ilustración 42. Muestra 1 con zigzag.....	56
Ilustración 43. Medida continua con zigzag.....	57
Ilustración 44. Medida continua sin zigzag.....	57
Ilustración 45. Matriz de autoenfoco	60
Ilustración 48. Muestra con autoenfoco	62
Ilustración 46. Detalle 1 de la muestra con autoenfoco	62
Ilustración 49. Detalle 1 de la muestra sin autoenfoco	62
Ilustración 47. Muestra sin autoenfoco	62
Ilustración 50. Detalle 2 de la muestra sin autoenfoco	63
Ilustración 51. Detalle 2 de la muestra con autoenfoco	63



Índice de tablas

Tabla 1. Planificación.....	16
Tabla 2. Desglose de costes	17
Tabla 3. Aumentos en el microscopio.....	20
Tabla 4. Características de cada haz láser. Siendo la longitud de onda, potencia máxima y diámetro del spot para cada objetivo.....	22
Tabla 5. Características mesa posicionadora	23
Tabla 6. Características electrómetro	25
Tabla 7. Características de la cámara	27
Tabla 8. Tamaño de las imágenes	28
Tabla 9. Resultados con variación de NPLC con objetivo	34
Tabla 10. Resultados con variación de NPLC con objetivo X20 y 1000 puntos	34
Tabla 12. Resultados con variación de NPLC con objetivo X20 y 1000 puntos	34
Tabla 11. Resultados con variación de NPLC con objetivo X20 y 10000 puntos.	34
Tabla 13. Duración de toma de muestras con modificación de valor de NPLC	35
Tabla 14. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Median con valor 1, con objetivo X20 y 1000 puntos.....	36
Tabla 15. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Median con valor 3, con objetivo X20 y 1000 puntos.....	36
Tabla 16. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3, con objetivo X20 y 1000 puntos.....	36
Tabla 17. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3, con objetivo X20 y 1000 puntos.....	37
Tabla 18. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3 y Median con valor 1 , con objetivo X20 y 1000 puntos.....	37
Tabla 19. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3 y Median con Moving con valor 1, con objetivo X20 y 1000 puntos	37
Tabla 20. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Median con Moving con valor 1, con objetivo X20 y 1000 puntos	38
Tabla 21. Resultados con variación de NPLC con objetivo x5 y 1000 puntos	38
Tabla 22. Resultados con variación de NPLC con objetivo x5 y 1000 puntos	39
Tabla 23. Resultados con variación de NPLC con filtro Repeat con valor 1 con objetivo x5 y 1000 puntos.....	39
Tabla 24. Resultados con variación de NPLC con objetivo x50 y 1000 puntos	39
Tabla 25. Resultados con variación de NPLC con filtro Repeat con valor 3 con objetivo x50 y 1000 puntos	40



Tabla 26. Resultados con variación de NPLC con filtro Repeat con valor 1 con objetivo x50 y 1000 puntos 40

Tabla 27. Duración de toma de datos con variación de NPLC con objetivo x20 y 1000 puntos..... 41

Tabla 28. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median con Moving de valor 1, con objetivo x20 y 1000 puntos 41

Tabla 29. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median con Moving de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos 41

Tabla 30. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median de valor 1, con objetivo x20 y 1000 puntos 41

Tabla 31. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 5, con objetivo x20 y 1000 puntos 42

Tabla 32. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos 42

Tabla 33. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median con Moving de valor 1, filtro Repeat de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos 42

Tabla 34. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median de valor 1, filtro Repeat de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos 42

Tabla 35. Duración de toma de datos con variación de NPLC con objetivo x5 y 1000 puntos..... 42

Tabla 36. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median de valor 1, con objetivo x5 y 1000 puntos..... 43

Tabla 37. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 3, con objetivo x5 y 1000 puntos..... 43

Tabla 38. Duración de toma de datos con variación de NPLC con objetivo x50 y 1000 puntos..... 43

Tabla 39. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 3 con objetivo x50 y 1000 puntos 43

Tabla 40. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median valor 1, con objetivo x50 y 1000 puntos..... 43

Tabla 41. Duración de toma de datos con variación de NPLC 44

Tabla 42. Duración de toma de datos con variación de NPLC 46

Tabla 43. Duración de toma de datos con variación de NPLC 47

Tabla 44. Duración de toma de datos con variación de NPLC 48

Tabla 45. Duración de toma de datos con variación de NPLC 50

Tabla 46. Duración de toma de datos con variación de NPLC 51

Tabla 47. Duración de toma de datos con variación de NPLC 53

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Actualmente la energía solar fotovoltaica está en plena expansión debido al auge de las energías renovables por la contaminación e impacto que provoca el uso de otras energías que utilizan combustibles de origen fósil como base para la generación. Por ello, es pertinente y de alto interés investigar acerca de los aspectos que intervienen en esta forma de energía como son los módulos fotovoltaicos, típicamente de silicio, que convierten la energía del sol en energía eléctrica, con el fin de optimizar esta transformación.

Uno de los métodos de estudio de estos módulos es la caracterización de diferentes tipos de células que los componen, que se puede realizar, entre otras técnicas, a través de un sistema de medida de Corriente Inducida Mediante Luz Láser, denominado LBIC a partir de las siglas de la técnica en inglés (*Light Beam Induced Current*) [1], sistema que se explicará en el siguiente apartado.

Existe un sistema LBIC ubicado en el laboratorio del grupo de investigación GdS-Optronlab del Departamento de Física de Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía, en las instalaciones del edificio LUCIA, dentro del Campus Miguel Delibes de la Universidad de Valladolid [2,3]. Este equipo es sobre el que se centra el presente trabajo de fin de grado.

Partiendo de este sistema LBIC, desarrollado por el grupo GdS-Optronlab y actualizado en diversos momentos desde su primera instalación, se pretende realizar un nuevo análisis del estado del sistema y aplicar ciertas mejoras relacionadas tanto con su parte hardware como con la programación del sistema.

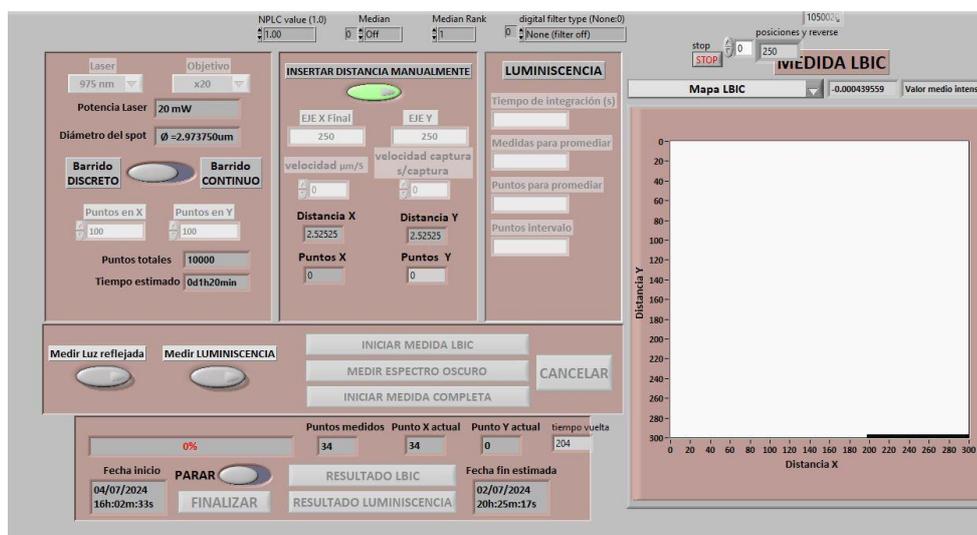


Ilustración 1. Pantalla inicial medida LBIC



En concreto, los objetivos específicos que se persigue son:

- **Analizar el estado actual** del sistema LBIC en general y de cada dispositivo en particular, así como de las imágenes resultado que se obtienen con la configuración y algoritmo actual.
- **Analizar el efecto que tienen los parámetros del electrómetro** del sistema sobre las medidas con el fin de encontrar las configuraciones óptimas.
- **Estudiar posibles cambios en la forma de hacer el barrido** con el fin de reducir el tiempo de medida.
- **Implementar una forma de autoenfoco** previo y durante la medida para optimizar el mapeado según las características propias de cada medida y de su colocación sobre la mesa móvil.

Todos estos cambios y estudios se realizarán sobre la última versión del software programado y configuración de los dispositivos, teniendo en cuenta a la vez la documentación de todas las versiones anteriores y de otros sistemas LBIC con el fin último de optimizar el sistema y con ello la información que se obtiene de las medidas de caracterización.

1.1 Conceptos teóricos

1.1.1 Sistema de medidas LBIC

En la caracterización de una célula solar mediante un sistema LBIC la célula se coloca conectada eléctricamente en serie con un electrómetro o medidor de corriente. A través de un microscopio se irradia el punto de interés de la celda empleando una luz láser y se mide la intensidad de corriente eléctrica generada en ese punto con el electrómetro, tal y como se puede observar en la *Ilustración 1* [2]. Para la adquisición de un mapa de corrientes inducidas en un área determinada de la célula, bien la muestra o bien el haz láser se deberá mover de forma que se vayan midiendo secuencialmente en cada punto de la región de interés. Esta caracterización tiene la desventaja de que se necesita examinar células ya procesadas, lo que implica que no se pueden utilizar células que no han sido utilizadas en dispositivos reales o que no han pasado por todos los pasos del proceso de fabricación estándar. A través de la caracterización LBIC es posible realizar predicciones sobre la vida útil, la movilidad de los portadores o los detalles de los defectos [4].

La medida se realiza un ambiente de oscuridad completo, lo que permite medir la intensidad de corriente eléctrica que genera la muestra por efecto fotoeléctrico [5] únicamente provocado por el haz láser.

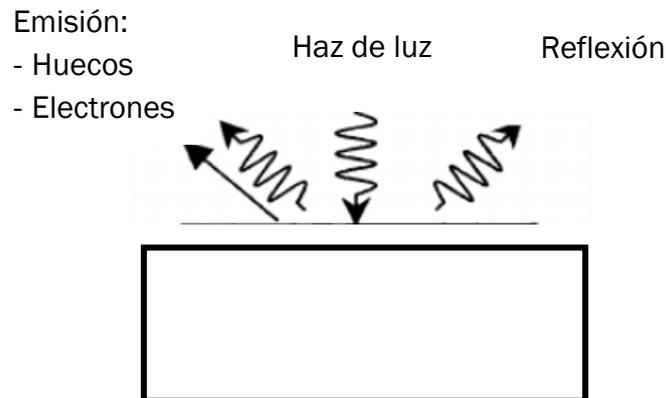


Ilustración 2. Fenómeno de interacción de la luz con una muestra.

Como resultado se obtiene un mapa de foto-corriente *Ilustración 1* donde se puede conocer la intensidad generada en cada punto medido sobre la muestra, dependiendo la resolución de la imagen del número de puntos medidos y la distancia entre ellos. Estos mapas permiten estudiar los defectos o fallos del semiconductor que puedan afectar al correcto funcionamiento de los paneles. También permiten analizar la variación de intensidad según los diferentes materiales, grado de cristalinidad, u otras características de las muestras. Según el detalle de imagen que queramos se pueden cambiar los aumentos del microscopio (x5, x20, x50, x100).

Los mapas se pueden obtener también de forma numérica, en forma de matriz, para poder trabajar con estos datos posteriormente de una forma más precisa o realizar un postprocesado con aplicaciones especializadas, y se obtienen imágenes para poder apreciar el estado físico de la muestra, como se puede ver en la Figura (2).

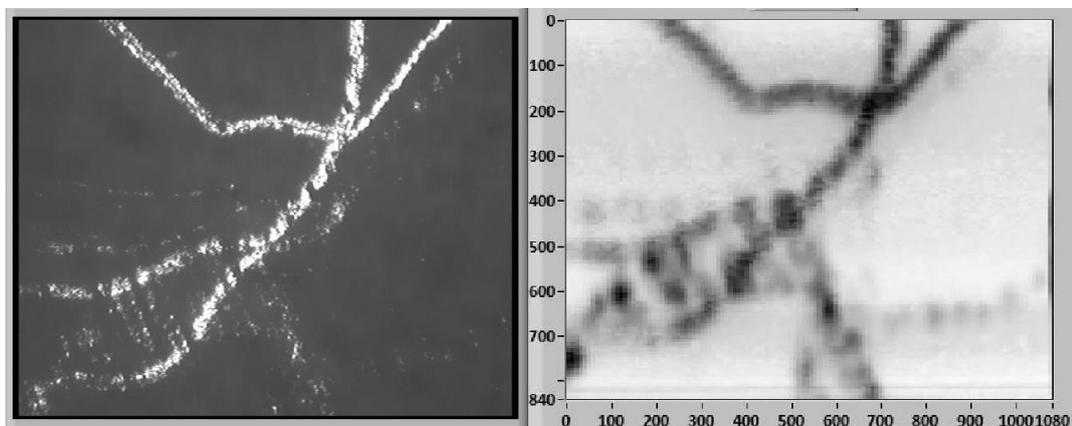


Ilustración 3. Mapa de foto-corriente correspondiente con un objetivo x5



Una aplicación actual de estas imágenes consiste en alimentar con ellas una inteligencia artificial que permita identificar, a partir de un aprendizaje previo de imágenes patrón, los defectos existentes en las células caracterizadas con LBIC.

En el sistema de medida LBIC real sobre el que se trabajará, y del que se detallarán los dispositivos que lo componen más adelante, también se puede medir la intensidad de luz reflejada por la muestra, la cual se obtiene mediante una cámara CCD que se emplea también para configurar el área de interés de la medida. Esto permite generar otro mapa en el que se pueden apreciar variaciones en la generación de fotocorriente con los cambios morfológicos en la superficie del material.

Uno de los objetivos de este TFG es mejorar la calidad de los mapas descritos del área de interés además de lograr obtener mapas de foto-luminiscencia mediante un espectrómetro, lo cual ayudará a comprender mejor de qué manera están relacionados los cambios estructurales y de corriente con los cambios en los procesos de emisión de luminiscencia.

1.1.2 Entorno de programación LabVIEW

El lenguaje empleado para programar la parte software del sistema de medida LBIC es el empleado en el entorno de LabVIEW (“*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*”, en español “Banco de trabajo de ingeniería de instrumentos virtuales de laboratorio”) [6].

Este entorno consiste en un lenguaje gráfico (lenguaje G) que se utiliza en el campo de la ingeniería para desarrollar sistemas hardware y software de pruebas, control... simulado o real, especialmente eficaz también en el campo de la instrumentación.

Es una buena elección para este tipo de sistemas ya que uno de sus principales objetivos es el control y simulación de dispositivos electrónicos de medida y control. Es un lenguaje simple de utilizar, ya que cuenta con librerías que tiene en su propia biblioteca y que la mayoría de empresas de fabricación desarrollan. Tiene además herramientas para interactuar directamente con el usuario.

Cuando se crea un nuevo proyecto en LabView aparecen dos ventanas: *Front Panel* (Panel frontal) y *Block Diagram* (Diagrama de bloques) [7].

- **Panel Frontal:** es el utilizado por el usuario para comunicarse con el programa (interfaz de usuario), donde se puede ver cómo se desarrolla el proceso elaborado y se definen los controladores e indicadores.
- **Diagrama de bloques:** es la ventana donde se introducen los bloques que representan el sistema a desarrollar, la programación propiamente dicha. En cada bloque se introducen los datos y parámetros necesarios, de tal manera que, una vez programado, no sea necesario recurrir a ello a no ser que se necesite cambiar alguno de ellos.

Para trabajar en este entorno hay que tener en cuenta que el programa no sigue un desarrollo secuencial, sino que los bloques se ejecutan según las entradas que se le hayan introducido, de forma que se tienen que cumplir todas para que funcione.

En este caso, se utilizará el programa ya desarrollado en el laboratorio en otras ocasiones, por lo que *a priori* no es necesario adquirir ninguna librería nueva ni desarrollar un programa de cero, sino que los cambios necesarios se harán sobre la última versión utilizada por el grupo.

La estructura o diagrama más general del software actual es el representado en la *Ilustración 4*.



Ilustración 4. Diagrama de bloques

2. PLANIFICACIÓN Y COSTES

El proceso de estudio y mejora de la parte hardware del sistema, con la valoración de instalación de un amplificador se realizará en un total de 250 horas, repartidas en una total de 2 meses y 15 días hábiles, como se muestra en la Tabla 1.

TAREA	Fecha inicio	Duración	Fecha fin
Estudio de los dispositivos	15/01/2024	10	29/01/2024
Toma de datos	30/01/2024	5	06/02/2024
Análisis de programa en LabVIEW	07/02/2024	1	08/02/2024
Análisis del espectrómetro y su implementación	09/02/2024	7	20/02/2024
Toma de datos	21/02/2024	10	06/03/2024
Análisis de resultados y posibles mejoras	07/03/2024	7	18/03/2024
Finalización TFG	19/03/2024	15	09/04/2024

Tabla 1. Planificación

Como se puede apreciar, las tareas se realizarán en un orden que permita realizar el procedimiento de una manera ordenada y que cada una de ellas tenga suficiente tiempo para poder ser realizadas, ya que si no se podrían obtener datos no válidos.

Los datos de esta tabla se pueden apreciar en un diagrama de Gantt, como en la siguiente imagen:

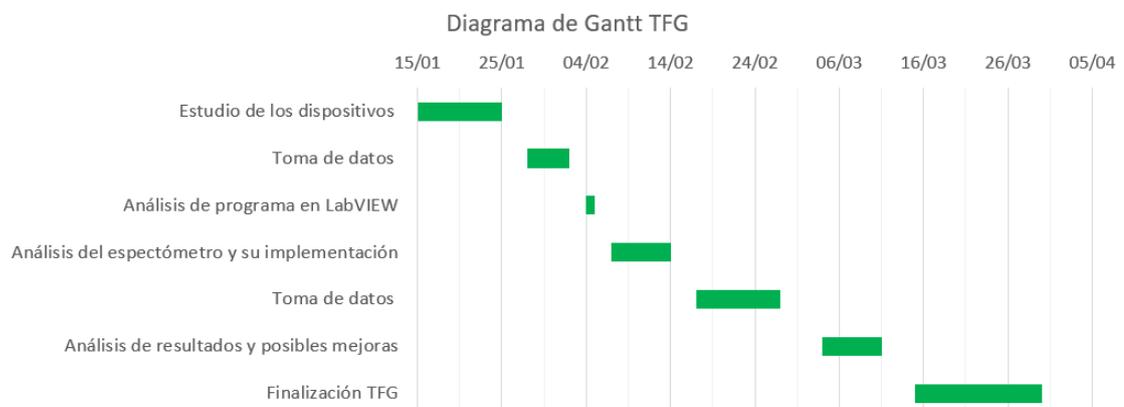


Ilustración 5. Diagrama de Gantt



En cuanto a costes asociados a este proyecto, se pueden dividir en:

- Costes directos: Relacionados directamente con la ejecución del proyecto
- Costes indirectos: Relacionados con el apoyo y funcionamiento general

En la Tabla 2 se muestran los costes desglosados.

Concepto	Cantidad	Coste por unidad €	Coste total €
Licencia LabView	1	150	150
Horas del estudiante	250	10	2.500
Horas de supervisión	10	30	300
Uso del laboratorio	33	20	660
Costes de administración	1	50	50
		Total	3.360

Tabla 2. Desglose de costes

3. DESARROLLO

3.1 Descripción y Análisis del sistema

El sistema de medida LBIC en cuestión está compuesto por varios dispositivos electrónicos con el objetivo de realizar las actividades referidas anteriormente.

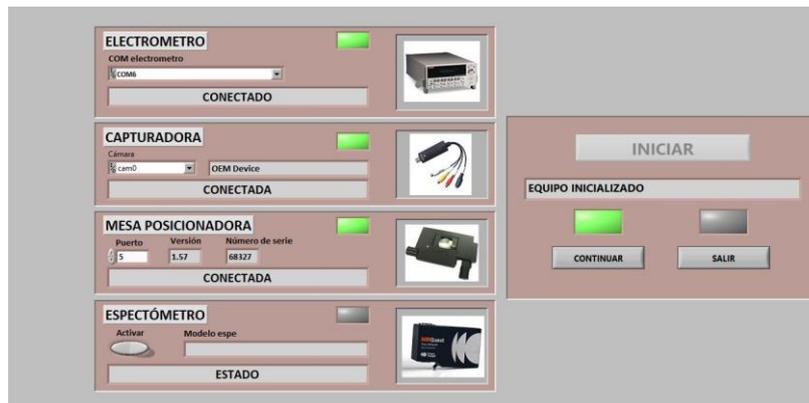


Ilustración 6. Dispositivos que componen el sistema LBIC

A continuación se describen dichos dispositivos, con su estado actual incluido, y cuál es un función concreta dentro del sistema para poder valorar si son lo suficientemente válidos para la toma de medidas y qué parámetros se pueden mejorar.

- **Mesa óptica:** es el elemento estructural sobre el que se sitúan los demás y les confiere una resistencia relativa a vibraciones.
- **Microscopio óptico:** es el elemento central, ya que conecta directa o indirectamente a todos los elementos que componen el sistema entre sí. Su principal objetivo es focalizar el haz láser sobre la muestra, el cual procede de dos equipos láser duales que proporcionan hasta cuatro haces de diferentes amplitudes, los cuales llegan al microscopio alineándose mediante un sistema ópticos de espejos. En el microscopio se coloca tanto la cámara CCD en uno de sus visores, permitiendo la configuración previa a la medida y la medida de la luz reflejada, como la fibra óptica en su parte superior que permite llevar la luz emitida al espectrómetro.
- **Mesa posicionadora:** está sujeta al microscopio y es el elemento sobre el que se coloca la muestra. Se puede mover en los tres ejes para poder ubicar la muestra en la zona donde se desea tomar datos y posteriormente realizar el barrido de toma de muestras con el enfoque necesario para cada objetivo disponible del microscopio.
- **Electrómetro:** su función es medir la corriente eléctrica generada por la muestra cuando esta es excitada por el haz láser. Se conecta a las

muestras a través de dos cables que pueden ser soldados directamente a la célula que se desea medir o a través de unos imanes para hacer la conexión lo menos invasiva posible.

- **Cámara de vídeo:** está conectada mecánicamente a uno de los visores de microscopio y electrónicamente a una capturadora para poder comunicarse con un ordenador. Nos ayuda a posicionarnos en la zona de la muestra que queremos analizar y se encarga de medir la intensidad de la luz reflejada.
- **Espectrómetro:** este aparato se dedica a analizar las características de la luz en una parte específica del espectro magnético, evaluando la intensidad luminosa. Se emplea para observar los espectros de emisión producidos por los elementos estudiados al emitir fotones energéticos. Potenciará el rendimiento del sistema y aumentará su capacidad de análisis. Integrar este dispositivo implicará reorganizar los componentes del sistema y modificar el software utilizado para incorporar las nuevas funcionalidades.

Esos elementos se encuentran dentro de una estructura completamente cerrada y opaca, evitando que entre cualquier tipo de luz o ruido, reduciendo al máximos las interferencias buscando que los datos obtenidos sean los más reales posibles.

3.1.1 Microscopio

Es el elemento que une entre sí a todos los dispositivos que forman el sistema, el cual se puede ver en la Ilustración 3.



Ilustración 7. Microscopio



El equipo empleado es de la marca Olympus, perteneciente a la serie BHL, que cuenta con dos módulos BH2-UMA diseñados para la iluminación vertical. Además incluye un tubo de observación con dos oculares y un módulo MTV-3 adicional para la colocación de un adaptador de montura tipo C.

Además de focalizar el haz láser sobre la muestra medida, permite al usuario observar la zona de la muestra que se va a estudiar, ya sea directamente por uno de sus visores o gracias a la cámara de video que hay instalada en el otro.

Para ello se emplea una fuente de luz blanca conectada a uno de los módulos que iluminará la muestra a través de los distintos objetivos del microscopio para que la cámara pueda capturar la luz reflejada de la muestra.

El haz de laser se introduce en el microscopio por un orificio en la parte trasera y se alinea en su interior, mediante un sistema óptico interno hasta llegar al objetivo. Mediante una palanca selectora se puede establecer el canal de salida de la luz reflejada o emitida por la muestra entre los visores, la parte superior donde se encuentra la fibra óptica o ambos. Dependiendo del tipo de medida que se vaya a realizar conviene uno u otro canal. Al microscopio se le une mecánicamente la mesa posicionadora motorizada debajo del objetivo de forma que se pueda colocar la muestra que se desea medir.

En la tabla 2 se pueden ver los posibles aumentos que se pueden emplear, con su aumento y apertura numérica (AN), este último es un valor adimensional que mide la capacidad del microscopio para coleccionar la luz y que influirá en el tamaño del spot del haz láser.

Objetivo	Apertura numérica (AN)
x5	0.13
x20	0.4
x50	0.55
X100	0.95

Tabla 3. Aumentos en el microscopio

3.1.2 Equipos láser

Se encargan de generar los haces láser que iluminan las muestras estudiadas para generar la señal LBIC. En nuestro caso tenemos opción de utilizar alternativamente cuatro haces distintos con diferente longitud de onda.

Estos equipos se dividen en:

- **Emisores de haces:** se encuentran dentro de la caja negra y emiten el haz de luz que llegará a la muestra. Los modelos empleados son LDM635/830 que permite longitudes de onda de 635 nm y 830 nm y LDM850/980 con longitudes de 850 nm y 975 nm.
- **Fuentes de alimentación:** ubicadas en el exterior de la caja, cada emisor tiene la suya y están conectadas a la tensión de la red, al ordenador y al propio emisor. Se encargan de gestionar los emisores mediante un software instalado en el ordenador de control.



Ilustración 8. Fuentes de alimentación

Los haces se alinean mediante un sistema óptico de espejos, cuya posición se puede modificar para permitir una alineación adecuada hasta que entran en el microscopio óptico. Internamente, el microscopio orienta el haz hasta el objetivo que se está empleando en ese momento.

Conociendo la longitud de onda (λ), se puede calcular el diámetro del spot ($\varnothing spot$), proyección del láser en un punto que incide en las muestras, que también dependerá del valor de la apertura numérica (AN) del objetivo empleado, es decir de su ampliación. Este diámetro afectará a la resolución de los mapas resultado y por tanto a los parámetros de medida.

$$\varnothing spot = \frac{1,22 \lambda}{AN}$$

En la tabla 3 se pueden observar las características de cada haz láser.

Diámetro del spot				
	LDM635 / 830		LDM850 / 980	
Longitud de onda	635nm	830nm	853nm	975nm
Potencia máxima	20mW	33mW	50mW	100mW
x5	5.99 μ m	7.78 μ m	8 μ m	9.15 μ m
x20	1.95 μ m	2.53 μ m	2.6 μ m	2.97 μ m
x50	1.417 μ m	1.84 μ m	1.89 μ m	2.16 μ m
x100	0.82 μ m	1.065 μ m	1.095 μ m	1.252 μ m

Tabla 4. Características de cada haz láser. Siendo la longitud de onda, potencia máxima y diámetro del spot para cada objetivo.

3.1.3 Mesa posicionadora

Se encuentra unida al microscopio, el cual se mantiene fijo de manera permanente, por lo que es necesario mover la mesa para permitir el barrido punto a punto sobre la muestra estudiada. Se encarga de colocar cada punto del barrido bajo el haz de manera rápida y precisa.

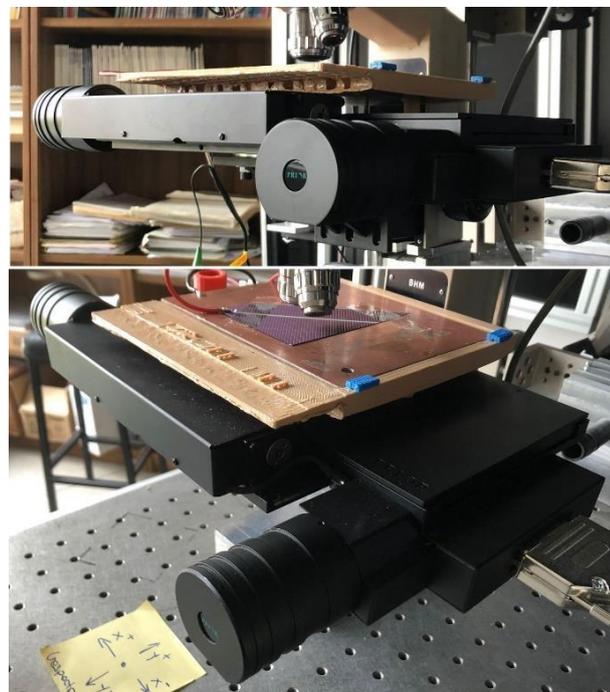


Ilustración 9. Mesa posicionadora

Este componente del equipo está compuesto por tres partes proporcionadas por el fabricante *Prior Scientific*:



- **Mesa motorizada:** se ubica debajo de los objetivos del microscopio y permite el movimiento de los tres ejes cartesianos (X, Y, Z) para ubicar y enfocar el punto, gracias a los motores paso a paso.
En ella se colocan las muestras sobre una base de un material diferente en función del tipo de conexión que se utilice en las muestras, pudiendo ser de metal conductor en el caso de los imanes o de cualquier otro en el caso de soldadura directa en la muestra.
- **Caja controladora:** se encarga de recibir las ordenes desde el ordenador y transmitir las a la mesa motorizada.
La conexión al ordenador se realiza mediante un adaptador HUB unido al puerto de salida RS-232 de la caja. Está conectada a la tensión de la red y a los motores de la mesa.
- **Joystick:** también está conectado a la caja controladora y permite mover la mesa en los tres ejes, si lo habilitamos, desde el ordenador, de manera que el movimiento de la mesa se puede realizar manualmente con el joystick o a través del software de control para una mayor precisión o movimientos de grandes distancias.

Inicialmente se ubicará la zona de estudio de la muestra mediante el joystick, que se deshabilitará posteriormente para permitir únicamente el manejo de la mesa a través del software del ordenador.

En la tabla 5 se pueden apreciar las características más importantes del conjunto de la mesa posicionadora, proporcionadas por el fabricante:

Las muestras colocadas en la mesa no deberán tener demasiado peso ya que el microscopio tiene que aguantar correctamente el peso de la mesa para que el sistema sea estable en todo momento.

Desplazamientos máximos	108mm x 71mm (4"x3")
Peso máximo soportado	10kg
Peso de la mesa motorizada	3kg
Resolución (mínimo paso posible)	0.04um
Repetibilidad	±1um ±0.3um con escalas lineales
Velocidad máxima desplazamiento	100mm/seg (X,Y) 20 rev/seg (Z)

Tabla 5. Características mesa posicionadora

También deben ser pequeñas debido a que no se pueden hacer mapeos en una superficie de muestra elevada, ya que el tiempo necesario sería muy elevado y el objetivo es estudiar pequeñas zonas y defectos concretos de las muestras.

3.1.4 Electrómetro

Este dispositivo permite medir la carga eléctrica, la corriente o la diferencia de potencia, entre otras magnitudes eléctricas; estudia la relación entre la radiación electromagnética y la materia.

En este caso concreto, se encarga de medir la corriente eléctrica en cada punto de la muestra de célula de silicio y enviar dicho valor al ordenador que controla el sistema.

El modelo utilizado es el 6516 de la marca Keithley, el cual está diseñado para trabajar con bajas intensidades (nA) en cortocircuito, lo cual ocurre en este caso.



Ilustración 10. Electrómetro

En la siguiente imagen podemos ver el aspecto del electrómetro:

Las conexiones se realizan de la siguiente manera:

- En primer lugar, se realiza una conexión del dispositivo a la tensión de la red.
- A través del conector hembra se conecta a la tableta de bornes, que posteriormente se conectará con las muestras medidas.
- Por último, se conecta al ordenador a través de un puerto RS-232 unido a un adaptador USB que irá conectado a un hub, dispositivo que comparte una red de datos de un computador, comunicado con el propio ordenador.



Las características técnicas del equipo proporcionadas por el fabricante son las siguientes:

Tensión de alimentación	90/125 Vca 210/250 Vca 50 o 60 Hz
Temperatura y humedad en operación	0/50°C Menos de 70% relativa
Tiempo de calentamiento	Con precisión nominal: 1h
Rango de intensidades	De 100 aA a 21 mA Rangos de 20 pA, 200 pA, 2 nA, 20 nA, 200 nA, 2 μA, 20 μA, 200 μA, 2 mA y 20 mA Posibilidad de autorango
Tamaño del buffer	2500 lecturas
Velocidad de lectura	Al buffer interno 1200 lecturas/s *0.01 PLC, sin filtros ni panel frontal ni corrección activados Al bus IEEE-488 500 lecturas/s *0.01 PLC, sin filtros digitales ni panel frontal ni corrección activados y modo de transferencia binaria Al panel frontal 17 lecturas/s a 60Hz Al panel frontal 15 lecturas/s a 50Hz *1.00 PLC y sin filtros digitales
Filtro digital	Posibilidad de media y mediana entre 2 y 100 lecturas

Tabla 6. Características electrómetro

El electrómetro puede ser controlado directamente desde el propio menú de botones que incorpora él mismo, pero en este caso se va a realizar el control desde el software del ordenador deshabilitando la pantalla y controles mecánicos del equipo para optimizar su funcionamiento mediante software.

Con estas características, el espectrómetro es suficiente para realizar nuestro estudio.



Está instalado en el interior de la caja negra, donde la temperatura y la humedad no serán superiores a la recomendada por el fabricante, ya que esta se encuentra herméticamente cerrada.

Las medidas de la intensidad se encuentran entre el rango de mA y μ A.

Por último, la velocidad de lectura será mayor a la del movimiento de la mesa, para ubicarse en el punto de barrido, no siendo este elemento un elemento crítico en la aceleración del mapeo. No obstante se estudiarán los parámetros variables del equipo con el fin de encontrar la configuración con mejor relación velocidad/calidad de medida.

3.1.5 Cámara y capturadora

Su principal función es permitir al usuario ubicar la zona de la muestra, dando la posibilidad de visualizarla en la pantalla del ordenador. Por otro lado, mide la intensidad que refleja cada punto del barrido al recibir el haz láser para generar el mapa de foto-reflectividad.

El modelo empleado en este caso es de la marca SONY, específicamente el modelo XC-EI50. Se trata de una cámara compacta de pequeño tamaño, equipada con un sensor CCD (*Charge Coupled Device*) que produce una señal analógica que luego se digitaliza en la propia cámara. Esta captura las imágenes en blanco y negro.

Se ubica en uno de los visores del microscopio. Está conectada a la tensión de alimentación, y para permitir la comunicación con el ordenador, se conecta a una capturadora USB mediante un multiconector de doce pines, situado en su parte trasera. La capturadora es el modelo VG0001A de la marca LogiLink.

La capturadora, parte inferior, y la cámara, parte superior, se pueden ver en la Ilustración 7.



Ilustración 11. Cámara y capturadora

En la tabla 7 podemos ver las principales características de la cámara proporcionadas por el fabricante:

Resolución (HxX)	752 x 582 px
Montura de la lente	Montura tipo C
Velocidad normal del obturador	1/120 a 1/8 segundos
Iluminación mínima	0,1 lx
MTBF (tiempo medio entre fallos)	14,4 años aproximadamente
Temperatura y humedad en operación	-5/45 °C Entre 20% y 80% relativa
Tensión de alimentación	12V Vcc
Peso de la cámara	50 g

Tabla 7. Características de la cámara

Al emplear la cámara con diferentes objetivos, se obtienen imágenes que corresponden a diversas distintas áreas máximas de visualización.



Objetivo	Tamaño de la zona medida
x5	1025x820 μm
x20	250x200 μm
x50	106x805 μm
X100	53x42 μm

Tabla 8. Tamaño de las imágenes

Para tamaños de mapeo mayores a los mostrados en la tabla, existe el problema de no poder previsualizar todo el área de un solo vistazo y el enfoque no se asegura. Este es uno de los motivos por el que se buscará un algoritmo que permita asegurar el enfoque durante toda la medida. Su instalación en el microscopio es sencilla debido a su bajo peso y su largo tiempo de vida permite amortizar el dispositivo durante medidas de larga duración.

3.2 Centrado de láser

3.2.1 Descripción

El láser es un componente fijo del sistema, lo que quiere decir que este no tiene movimiento por sí solo y tiene una ubicación fija que una vez seleccionada la óptima conviene no variar.

La mayoría de las veces, la proyección del láser no se encuentra centrada en la imagen y, por tanto, no lo estará en cada punto medido, por lo que se obtienen resultados que no son completamente fiables ya que el barrido realizado sobre la muestra puede recoger datos sobre una superficie que no corresponde a la posición real dentro de la muestra.

Con estos resultados no se puede realizar un correcto análisis de la muestra de silicio que se desea estudiar, por lo que habría que situar el láser en el centro de esta,

3.2.2 Posición inicial

El láser llega a la muestra a través de varios espejos en los que se va reflejando a lo largo de su recorrido, los cuales tienen una posición fija.

Para variar la posición del láser sobre la muestra habría que modificar la posición de estos espejos de manera manual.

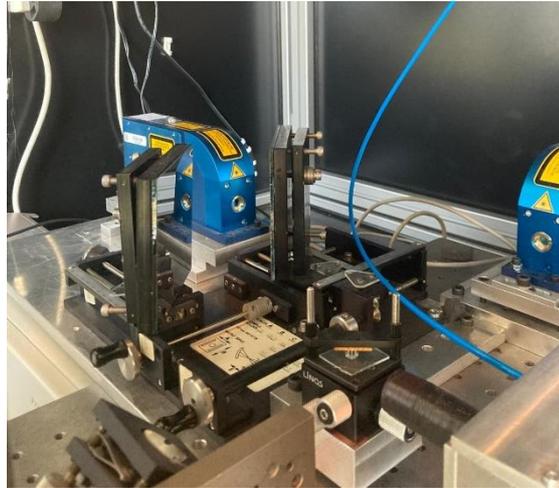


Ilustración 12. Espejos

3.2.3 Modificaciones de la posición de los espejos

Realizar modificaciones en los ángulos de los espejos puede ser muy delicado, ya que cualquier alteración en ellos puede producir un gran cambio en la posición de la proyección del láser. Debido a esta sensibilidad, habría que estar muy atento a la proyección visualizada en el ordenador y estar manipulando constantemente la parte física del sistema. Esto implica tener que abrir la caja y manipular los espejos, lo que podría modificar la posición de otros elementos. Este proceso de prueba y error hasta llegar a la posición deseada del haz láser habrá que realizarlo cada vez que se advierta un cambio en la posición del haz. Es lo primero que se ha realizado con el fin de partir todas las pruebas de una situación “óptima” de los haces láser.

3.2.4 Modificaciones a través de software

Debido a lo anterior, se ha buscado otra solución más práctica sin tener que estar manipulando los elementos de manera manual, sino que desde el propio programa se busca la posibilidad de posicionar el láser en el centro de la muestra directamente. Esto resulta útil en situaciones donde el cambio de posición no sea tan notable y el riesgo de manipular la configuración óptica sea mayor a los beneficios de mejorar dicha posición.

Esto se ha conseguido variando el código de programa correspondiente a la preparación o configuración de la muestra previamente a la medida. La nueva funcionalidad posibilita el ajuste de la posición de la mesa sin necesidad de acceder a la caja negra que alberga todos los componentes del sistema. Esto se logra mediante unos ejes de referencia que muestran el centro de la imagen y las distancias al centro láser. Hay que tener en cuenta que la selección del

centro por parte del usuario introduce un margen de error asociado al factor humano, aunque automatizar la búsqueda del centro resulta complicado debido a la irregularidad de la forma del haz.

En la siguiente imagen se puede ver el aspecto de la pantalla del programa:

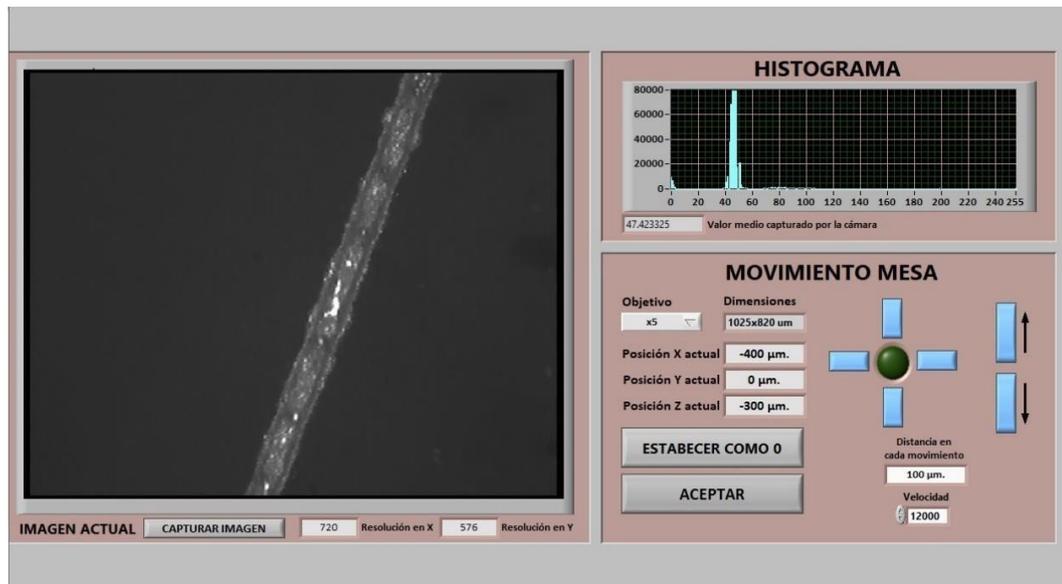


Ilustración 13. Pantalla programa LBIC

Después de haber realizado las modificaciones necesarias en la posición de la mesa, se han obtenido unos resultados fiables, los cuales se pueden analizar y comprender los resultados obtenidos.

3.3 Configuración del Electrómetro

Se configura el dispositivo a través de un programa en el software de LBIC. Una vez configurado, será posible realizar estudios de fotoluminiscencia en muestras de semiconductores y células fotovoltaicas. Esto contribuirá a una mejor comprensión entre los cambios estructurales en las muestras y los cambios de emisión de fotoluminiscencia.

3.3.1 Descripción

El modelo utilizado en el sistema ofrece altas velocidades de funcionamiento. Sus tiempos de estabilización se miden en microsegundos y tiene una incertidumbre de medición menor que otro tipo de fuentes.

Debido a su baja capacidad de corriente, ofrece rangos de operación elevados con elevada resolución.



Pese a estas características, desde su instalación, el electrómetro ha trabajado con sus parámetros por defecto y la opción de autorango.

Es por ello por lo que se ha decidido examinar los diferentes parámetros de trabajo que presenta el dispositivo con el fin de determinar la mejor configuración que proporcione un equilibrio entre el tiempo de medición y la calidad de la misma. Entendiendo la calidad como una buena resolución y valores de intensidad coherentes con el tipo de barrido y la naturaleza de las mediciones, se busca encontrar la combinación adecuada de parámetros para obtener resultados óptimos.

A continuación se describen los parámetros de medida del electrómetro:

- **NPLC (*Number of Power Line Cycles*):** indica cuanto tiempo se integra una señal de entrada para obtener una medición. Es el período de tiempo en el que el convertidor analógico/digital (A/D) del equipo mide la señal de entrada. De forma general, cuanto más tiempo se integre una señal más preciso será el resultado de la lectura a costa de tiempo empleado en la lectura (velocidad de lectura).

El ajuste del NPLC es, por tanto, el ajuste de la relación entre precisión y velocidad. Por lo general, este parámetro se puede configurar entre 0,1 (*FAST*) y 10 (*LOW*), siendo 1 (*MEDIUM*) el valor por defecto.

El ruido de corriente alterna introducido desde la línea de alimentación será rechazado cuando el valor de NPLC sea igual o mayor que 1 ya que un valor de 1 para 60 Hz en la línea de alimentación tarda 16,37 ms y para 50 Hz tarda 20 ms. Cuantas más veces se realice la integración mayor probabilidad hay de rechazar el ruido y obtener una medición más precisa, siempre y cuando sea un múltiplo entero de 1 para cubrir el ciclo entero de ruido [8].

- **FILTRO MEDIAN (*Mediana*):** es un filtro que se puede habilitar para cada medida del electrómetro. La medida será el valor intermedio que separa la mitad de las lecturas de un grupo ordenado aplicando la fórmula:

$$Medida = 2R + 1$$

Con R un valor elegible entre 1 y 5

El filtro mediano funciona como un *filtro de tipo móvil* por defecto, lo que significa que para cada medida solo se renueva una lectura. Por ejemplo, si el filtro mediano está configurado para muestrear 11 lecturas (R= 5), la primera medida filtrada será calculada después de que se adquieran las 11 lecturas nuevas y se coloquen en su pila de filtros. Pero cada lectura



posterior se agregará a la pila y se eliminará la lectura más antigua, haciendo así que se genere una nueva mediana de la lectura del filtro. Sigue por tanto una tipología FIFO (*First In First Out*) en la renovación de la pila de lecturas. La operación del filtro *Median* se restablecerá, se renovará la pila, siempre que se realice la operación *Zero Check* o se cambie la función.

- **FILTRO DIGITAL MEDIA “MOVING”:** Cada vez que se realiza una medida, se promedian las lecturas de la pila para obtener una lectura filtrada final. El tipo de pila utilizada en este filtro es de nuevo FIFO (*First In First Out*). Cuando la pila se llena, la lectura más reciente reemplaza a la más antigua y el resto se mantienen en la pila.
Es decir, si se establece un tamaño 5 para este filtro, la dinámica es análoga a la del filtro anterior, la primera medida se obtiene al hacer la media de 5 lecturas nuevas, después se elimina una de ellas y se añade una lectura nueva para volver a hacer la media, repitiendo el ciclo hasta que se ordene o se haya programado su parada.
- **FILTRO DIGITAL MEDIA “REPEATING”:** Toma un número preestablecido de medidas y las promedia para obtener una lectura final. Después de obtener cada medida final, vacía la pila y comienza de nuevo a tomar medidas. En este caso, poniendo de ejemplo un tamaño de 5, en cada medida se hacen cinco lecturas nuevas y se hace la media cuyo valor será la medida. Se renueva la pila cada vez que se hace la media.

La elección del tipo de filtro digital y el número de medidas (tamaño de pila) afectan al tiempo necesario para generar una medida final.

En nuestro caso, teóricamente no tendría sentido utilizar filtros del tipo “*Moving*”, porque cada nuevo punto del mapeado es una intensidad diferente a las anteriores, por lo que cada medida que corresponde a un punto del mapa no debería depender de las lecturas del punto anterior, la intensidad de cada punto es independiente del resto. De cara a la aplicación real y obtención de la imagen, habrá que ver si al cambiar únicamente una lectura ayuda o no a obtener información útil de la imagen, independientemente del valor de la intensidad y si con ello se ahorra un tiempo muy notable.

Por otro lado, la mesa posicionadora se puede programar de tal manera que realice las tomas de muestras de manera continua y discreta.



- **Movimiento discreto:** consiste en tomar los datos punto a punto, es decir, la mesa hace una parada en cada punto para poder obtener la información de corriente y almacenarla en un *array*, para obtener como resultado la imagen de la muestra que se está analizando
- **Movimiento continuo:** este movimiento consiste en rellenar los *arrays* mientras la mesa se está deslizando constantemente, en lugar de realizar una parada en cada posición

3.3.2 Funcionamiento en el sistema

La primera prueba realizada para conocer el efecto de los parámetros descritos es tomar 100, 1000 y 10.000 medidas consecutivas sobre un mismo punto con un láser de 853 nm y, a través del objetivo de x20. Utópicamente, debería medir siempre la misma intensidad ya que el punto no varía y suponemos que la corriente inducida por la muestra, en este caso una célula de silicio monocristalina, tampoco varía con el tiempo.

Partiendo de la configuración por defecto que es un valor 1 del NPLC y ningún filtro, se realizarán diferentes variaciones de los parámetros anteriores. En primer lugar ajustando el valor del NPLC y posteriormente el del filtro “*Repeating*” y de mediana, renovando la pila en cada medida. Se llevará a cabo la medición para evaluar el efecto que tienen estas variaciones en las medidas.

Para saber el error en cada caso o comparar resultados se mide:

Rango: representa la distancia entre el valor más alto y el más bajo, dentro del conjunto de datos, nos proporciona una idea de cuán dispersos está los datos. Si el rango es demasiado elevado, en este caso no nos beneficia ya que indica que hay un amplia variación entre los valores extremos.

Desviación media: esta medida representa la dispersión promedio de un conjunto de datos, proporciona una medida promedio de la distancia entre cada punto de datos y la media del conjunto.

Desviación estándar: nos indica cuánto se aleja, en promedio, los valores individuales de un conjunto de datos respecto a la media del conjunto, nos muestra cuanto se alejan los valores individuales de la media del conjunto.

3.3.3 Configuración LBIC. Parámetros (estudio)

El primer paso para comprobar el efecto que tiene la variación de los parámetros del electrómetro en el mapa final ha sido la realización de diferente número de medidas continuadas sobre un mismo punto. De esta manera se

pueden comparar los resultados para diferentes configuraciones ya que de forma ideal todas las medidas deberían dar el mismo valor de intensidad.

Las pruebas en este caso se han llevado a cabo utilizando el láser COM2, de 853 nm. También se han efectuado mediciones con diferentes objetivos del microscopio de x5, x20 y x50. Durante las pruebas se han ajustado progresivamente los valores NPLC, la mediana, la desviación media y estándar, así como la opción de almacenar los puntos con o sin “Moving”.

A continuación se muestran las tablas con los datos obtenidos en el primer análisis, en el que se ha utilizado el objetivo de láser x20 y en este caso se variando únicamente el valor de NPLC y los puntos muestreados.

Los valores de intensidad obtenidos son todos del orden de 10^{-5} A, para simplicidad de las tablas se han multiplicado todos los valores por 10^6 facilitando el análisis.

x20 100 pts			
NPLC	Rango	Desv Media	Desv Std
0.1	0.76	0.16	0.19
0.5	0.49	0.09	0.11
1	0.34	0.06	0.07
3	0.41	0.08	0.10
5	0.62	0.15	0.17
7	0.45	0.10	0.12
10	0.58	0.12	0.14

Tabla 9. Resultados con variación de NPLC con objetivo X20 y 100 puntos

x20 1000 pts			
NPLC	Rango	Desv Media	Desv Std
0.1	0.83	0.10	0.12
0.5	0.76	0.09	0.12
1	0.77	0.09	0.12
3	0.79	0.11	0.13
5	1.57	0.28	0.35
7	1.85	0.39	0.46
10	1.32	0.25	0.30

Tabla 10. Resultados con variación de NPLC con objetivo X20 y 1000 puntos

x20 1000 pts			
NPLC	Rango	Desv. Media	Desv. Std
0.5	2.17	0.48	0.58
1	1.22	0.26	0.30
1.5	0.75	0.12	0.15
2	2.29	0.58	0.66
2.5	2.16	0.63	0.70
3	1.66	0.33	0.39
0.5	2.17	0.48	0.58

Tabla 11. Resultados con variación de NPLC con objetivo X20 y 1000 puntos

x20 10000 pts			
NPLC	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	1.99	0.26	0.45
1	2.04	0.42	0.49
3	1.49	0.20	0.25
7	3.87	0.89	1.03

Tabla 12. Resultados con variación de NPLC con objetivo X20 y 10000 puntos.



Tras analizar estos resultados, se puede apreciar que los valores obtenidos con el valor de NPLC 1 (valor predefinido en el sistema) en las dos primeras pruebas, de 100 y 1000 puntos, son los que dan un mejor valor de desviación. A pesar de eso, también se ve que modificando los tiempos de muestreo no hay una gran variación en los datos, por lo que aparentemente podemos obtener datos fiables con valores cercanos a NPLC 1.

Analizando las dos muestras idénticas de 1000 puntos, una con un rango mayor de valores de NPLC y otra con estos valores más cercanos al de 1, se puede apreciar una variación en los datos obtenidos para los valores alrededor de NPLC 1, lo cual se puede deber a una variación en las condiciones del medio en el que se ha realizado el muestreo pero manteniéndose NPLC 1 como la mejor.

Por último, se han analizado 10.000 puntos, y se puede observar que hay una mejoría en los datos obtenidos al aumentar el valor de NPLC 1 a 3, por lo que en este caso sobre el papel es una mejor opción aumentar el tiempo de muestreo para obtener unos resultados más fiables.

Se puede concluir que aparentemente la opción por defecto de NPLC 1 es la mejor y no mejora notablemente al aumentar este valor. Como ya se verá en la tabla de los tiempos el tiempo total aumenta directamente proporcional a los cambios de NPLC. Por lo que para ciertas medidas puede ser interesante bajar el NPLC ya que el tiempo de medida se reduciría y no se ha visto que los datos empeoren de forma crítica.

1000pts x20 853nm	
NPLC	Tiempo
0.1	1m19s
0.5	1m43s
1	2m13s
3	4m13s
5	6m13s
7	8m13s
10	11m13s

Tabla 13. Duración de toma de muestras con modificación de valor de NPLC

Como podemos ver en la tabla anterior, bajar el valor de NPLC a 0.5 desde el valor predefinido 1, reduce el tiempo que se tarda en tomar la muestra 30 segundos, sin embargo cada vez que aumentamos este valor, el tiempo que se tarda en tomar la muestra aumenta 30 segundos.

Esto sugiere que no se logren mejoras significativas en los resultados, lo que hace que esta modificación no sea rentable.

A continuación se añade un filtro median (mediana), pero ahora se hacen las muestras con 1000 puntos y con una variación en la Mediana y en valor de NPLC.

x20 1000 pts				
NPLC	Median	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	1	0.92	0.16	0.19
1		0.10	0.20	0.16
1.5		0.82	0.13	0.16
2		1.65	0.43	0.47

Tabla 14. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Median con valor 1, con objetivo X20 y 1000 puntos

x20 1000 pts				
NPLC	Median	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	3	3.17	0.63	0.78
1		2.20	0.48	0.57
1.5		2.64	0.64	0.75
2		1.22	0.24	0.28

Tabla 15. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Median con valor 3, con objetivo X20 y 1000 puntos

Tras analizar los datos anteriores, se puede apreciar que, al modificar la Mediana, hay un empeoramiento al aumentarla pero si que aparentemente se homogeneizan para valor 1 de la mediana. Haciendo que sean similares las medidas para valores de NPLC en torno a 1 y debiendo comparar los tiempos generales para ver si merece la pena.

El siguiente paso es modificar el filtro Repeat, lo que quiere decir que cada vez que se llena la pila de datos, hace la media y vacía la pila para tomar todos los datos de nuevo, se ha probado con una pila de 3 y 5 lecturas cada medida.

x20 1000 pts				
NPLC	Repeat	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	3	1.60	0.42	0.46
1		0.93	0.16	0.19
1.5		1.48	0.36	0.41
2		0.72	0.10	0.12

Tabla 16. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3, con objetivo X20 y 1000 puntos

x20 1000 pts				
NPLC	Repeat	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	5	2.76	0.65	0.76
1		1.76	0.44	0.51
1.5		1.07	0.25	0.28
2		2.37	0.52	0.62

Tabla 17. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3, con objetivo X20 y 1000 puntos

Tras analizar los datos, la primera conclusión que se puede sacar es que al aumentar de 3 a 5 el valor *Repeat* las desviaciones no se reducen, al contrario. También es interesante ver que estos valores son similares a los de partida con solo variación del NPLC, en el caso de *Repeat* 5 incluso algo peores.

Por lo tanto, aparentemente no hay una mejoría clara al añadir este filtro de media y si la hay es aumentando también el NPLC añadiendo tiempo a la medida general.

x20 1000 pts					
NPLC	Repeat	Median	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	3	1	1.25	0.22	0.27
1			1.79	0.38	0.45
1.5			1.84	0.40	0.46
2			0.77	0.15	0.17

Tabla 18. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3 y Median con valor 1, con objetivo X20 y 1000 puntos

x20 1000 pts					
NPLC	Repeat	Median NM	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	3	1	1.40	0.31	0.36
1			1.63	0.42	0.46
1.5			1.66	0.32	0.40
2			1.23	0.27	0.31

Tabla 19. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Repeat con valor 3 y Median con Moving con valor 1, con objetivo X20 y 1000 puntos

En el siguiente caso se han combinado los dos filtros, sin poder saber cuál se aplica antes (si la media de las medianas o la mediana de las medias) y se han comparado dos muestras, una con un filtro Mediana y otra con filtro Mediana no *Moving*, lo cual implica que se renueve la pila de datos cada vez que se hace la mediana de esta.

En este caso se puede apreciar que el modificar el filtro *Moving* de la Mediana proporciona unos resultados diferentes, viendo que son mejores los obtenidos con un valor de NPLC 2 y el filtro *Moving*, (lo que implica que se renueve toda la pila de datos cada vez que se toma una muestra).

Para terminar con el objetivo x20, se ha analizado una muestra de 1000 puntos sin Repeat y con filtro mediana no *Moving*.

x20 1000 pts				
NPLC	Median nm	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	1	1.73	0.39	0.44
1		3.51	0.81	0.95
1.5		1.90	0.36	0.44
2		2.21	0.54	0.62

Tabla 20. Resultados con variación de NPLC e introduciendo Median con *Moving* con valor 1, con objetivo X20 y 1000 puntos

Aquí podemos ver que los mejores resultados se obtienen con un valor de NPLC 0.5, lo cual reduciría el tiempo de muestreo, pero en general las desviaciones son muy diferentes y peores con respecto a no aplicar este filtro.

Tras analizar todas las muestras tomadas con el objetivo x20 y modificando los diferentes tipos de filtros podemos apreciar que los mejores resultados en cuanto a desviaciones obtenidos son los cercanos a NPLC 1 con él incluido sin ningún filtro a mayores, aunque la aplicación de estos filtros si ayuda a homogeneizar los datos pudiendo así buscar reducir los tiempos generales.

Con el fin de ver si estas conclusiones son extrapolables al resto de objetivos, se repiten estas pruebas con los objetivos de x5 y x50 respectivamente.

En primer lugar se han analizado 1000 puntos con el objetivo x5 y con diferentes filtros.

x5 1000pts			
NPLC	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	1.67	0.28	0.35
1	1.38	0.35	0.39
2	2.23	0.28	0.36

Tabla 21. Resultados con variación de NPLC con objetivo x5 y 1000 puntos

Las siguientes medidas se han realizado con un filtro *Repeat* con valor 3.

x5 1000pts				
NPLC	Repeat	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	3	1.06	0.24	0.26
1		0.75	0.13	0.15
2		1.70	0.48	0.52

Tabla 22. Resultados con variación de NPLC con objetivo x5 y 1000 puntos

Las últimas medidas se han realizado con un filtro de Mediana no *Moving* de valor 1.

x5 1000pts				
NPLC	Repeat	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	1	0.61	0.08	0.10
1		0.64	0.09	0.10
2		0.63	0.08	0.10

Tabla 23. Resultados con variación de NPLC con filtro *Repeat* con valor 1 con objetivo x5 y 1000 puntos

Tras analizar los resultados obtenidos en las diferentes medidas, vemos que se obtienen mejores datos y menos variaciones con un filtro *Repeat* 1 y NPLC con valores entre 1 y 2. En este caso sería mejor opción tomar las muestras con el valor NPLC 1 y alguno de los dos filtros en los casos donde el tiempo general no sea crítico.

El hecho de que al emplear el objetivo x5 mejoren las medidas al aplicar filtros puede ser debido a que los factores externos perturban menos las lecturas que en el de x20, siendo contraproducente aplicar filtros que sobre el papel deberían mejorar las medidas.

Por último analizamos las muestras tomadas con el objetivo x50 con 1000 puntos y diferentes filtros.

Las primeras medidas analizadas se toman sin ningún filtro, solo variando el valor de NPLC.

x50 1000pts			
NPLC	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	0.98	0.15	0.18
1	0.89	0.15	0.17
2	0.66	0.09	0.11

Tabla 24. Resultados con variación de NPLC con objetivo x50 y 1000 puntos



Las siguientes medidas se han realizado con un filtro Repeat con valor 3.

x50 1000pts				
NPLC	Repeat	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	3	1.74	0.36	0.42
1		1.45	0.31	0.37
2		1.94	0.44	0.50

Tabla 25. Resultados con variación de NPLC con filtro Repeat con valor 3 con objetivo x50 y 1000 puntos

Las últimas medidas se han realizado con un filtro de Mediana no Moving de valor 1.

x50 1000pts				
NPLC	Median no Moving	Rango	Desv Media	Desv Std
0.5	1	0.73	0.10	0.13
1		1.22	0.19	0.23
2		0.99	0.15	0.19

Tabla 26. Resultados con variación de NPLC con filtro Repeat con valor 1 con objetivo x50 y 1000 puntos

Tras analizar los resultados obtenidos en las diferentes medidas, vemos que se obtienen mejores datos con un valor de NPLC 2 y sin ningún filtro, aunque tampoco hay una gran diferencia con los resultados obtenidos en la muestra tomada con filtro Repeat 1 y un valor de NPLC 1. Viendo esto, sería más eficiente tomar las muestras con las características de esta última, ya que nos ahorramos tiempo de muestreo.

A continuación se muestran las tablas con los resultados de los tiempos de muestreo de las medidas tomadas anteriormente para poder comparar los resultados obtenidos y comprobar si se introducen mejoras al variar los valores de NPLC.



En primer lugar se analizan los datos del láser x20 y con 1000 puntos.

1000pts x20 853nm	
NPLC	Tiempo
0.1	1 m 19 s
0.5	1 m 43 s
1	2 m 13 s
3	4 m 13 s
5	6 m 13 s
7	8 m 13 s
10	11 m 13 s

Tabla 27. Duración de toma de datos con variación de NPLC con objetivo x20 y 1000 puntos

En las siguientes tablas vamos a ver como varía el tiempo de muestreo, introduciendo modificaciones en el valor de la mediana.

1000pts x20 853nm con Median con moving		
NPLC	Median	Tiempo
0.5	1	3m
1		4m30s
1.5		6m

Tabla 28. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median con Moving de valor 1, con objetivo x20 y 1000 puntos

1000pts x20 853nm con Median con moving		
NPLC	Median	Tiempo
0.5	3	5m30s
1		9m
1.5		12m30s

Tabla 29. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median con Moving de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos

1000pts x20 853nm con Median sin moving		
NPLC	Median	Tiempo
0.5	1	3m50s
1		5m20s
1.5		6m50s

Tabla 30. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median de valor 1, con objetivo x20 y 1000 puntos

En las siguientes tablas vamos a ver como varía el tiempo de muestreo, introduciendo modificaciones en el valor de *Repeat*.

1000pts x20 853nm con Repeat		
NPLC	Repeat	Tiempo
0.5	3	3m
1		4m30s
1.5		6m

Tabla 32. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos

1000pts x20 853nm con Repeat		
Repeat	Repeat	Tiempo
3	5	4m17s
1		6m47s
1.5		9m17s

Tabla 31. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 5, con objetivo x20 y 1000 puntos

En las siguientes tablas vamos a ver como varía el tiempo de muestreo, manteniendo el valor de la mediana y el filtro *Repeat* introduciendo modificaciones en el filtro *Moving*.

1000pts x20 853nm con Median con Moving			
NPLC	Median	Repeat	Tiempo
0.5	1	3	4m16s
1			6m46s
1.5			9m16s

Tabla 33. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median con Moving de valor 1, filtro Repeat de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos

1000pts x20 853nm con Median sin Moving			
NPLC	Median	Repeat	Tiempo
0.5	1	3	5m7s
1			7m37s
1.5			10m7s

Tabla 34. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median de valor 1, filtro Repeat de valor 3, con objetivo x20 y 1000 puntos

En segundo lugar se analizan los datos del láser con el objetivo x5 y con 1000 puntos.

1000pts x5 853nm	
NPLC	Tiempo
0.5	1m43s
1	2m13s
2	3m13s

Tabla 35. Duración de toma de datos con variación de NPLC con objetivo x5 y 1000 puntos

En las siguientes tablas vamos a ver como varía el tiempo de muestreo, introduciendo filtro *Repeat* y modificando el filtro *Moving*.

1000pts x5 853nm con Repeat		
NPLC	Repeat	Tiempo
0.5	3	3m
1		4m30s
1.5		7m31s

Tabla 37. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 3, con objetivo x5 y 1000 puntos

1000pts x5 853nm con Median sin moving		
NPLC	Median	Tiempo
0.5	1	3m50s
1		5m20s
1.5		8m20s

Tabla 36. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median de valor 1, con objetivo x5 y 1000 puntos

Por último, se analizan los datos del láser x50 y con 1000 puntos

1000pts x50 853nm	
NPLC	Tiempo
0.5	1m43s
1	2m13s
2	3m13s

Tabla 38. Duración de toma de datos con variación de NPLC con objetivo x50 y 1000 puntos

En las siguientes tablas vamos a ver como varía el tiempo de muestreo, introduciendo filtro *Repeat* y modificando el filtro *Moving*.

1000pts x50 853nm con Repeat		
NPLC	Repeat	Tiempo
0.5	3	3m
1		4m30s
1.5		7m31s

Tabla 39. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Repeat de valor 3 con objetivo x50 y 1000 puntos

1000pts x50 853nm con Median sin moving		
NPLC	Median	Tiempo
0.5	1	3m50s
1		5m20s
1.5		8m20s

Tabla 40. Duración de toma de datos con variación de NPLC con filtro Median valor 1, con objetivo x50 y 1000 puntos

Como podemos ver en las tablas anteriores, bajar el valor de NPLC a 0.5 desde el valor predefinido 1, reduce el tiempo que se tarda en tomar la muestra, sin embargo cada vez que aumentamos este valor, el tiempo que se tarda en tomar la muestra aumenta. Esto sugiere que no se logran mejoras significativas en los resultados, lo que hace que esta modificación no sea rentable.

3.3.4 Comparación entre datos teóricos y muestras reales

En este apartado se realiza una comparación entre los datos teóricos con las muestras reales obtenidas. Esto nos ayuda a ver si las hipótesis iniciales y los modelos empleados son correctos.

Los datos teóricos se han descrito en el apartado anterior y, a continuación, se presentan las muestras reales recogidas.

En primer lugar se van a comparar muestras en medida discreta para las cuales se ha tomado una medición en un área de $900 \mu\text{m}$ en el eje X y en el eje Y con 120 puntos en cada eje, un total de 14.400 puntos, con el objetivo de microscopio de aumento $\times 5$. La única variación de estas muestras es la modificación del valor de NPLC, también se incluye el tiempo que se ha tardado en tomar cada una de ellas, como se indica a continuación:

Muestra	NPLC	Tiempo
A	1	35 min 53 s
B	2	50 min 02 s
C	0.5	28 min 30 s
D	0.1	21 min 41 s

Tabla 41. Duración de toma de datos con variación de NPLC



Ilustración 14. Muestra A



Ilustración 15. Muestra B



Ilustración 16. Muestra C



Ilustración 17. Muestra D

En las imágenes anteriores apenas se pueden apreciar diferencias entre las muestras A, B y C, mientras que en la muestra D se puede ver que la imagen se encuentra más desenfocada con una mayor cantidad de píxeles. Por esto se puede concluir que reducir demasiado el valor de NPLC a 0.1 no es eficaz, incluso si se reduce el tiempo de muestreo en más de diez minutos respecto al valor por defecto de NPLC 1.

Sin embargo, al utilizar un valor de NPLC 0.5, se consigue reducir el tiempo sin que el resultado obtenido difiera demasiado del resultado con un valor de NPLC 2.

Por lo tanto, reducir el valor de NPLC a 0.5 resulta eficaz.

A continuación se van a comparar muestras en medida continua para las cuales se ha tomado una medición en un área de 900 μm en el eje X y en el eje Y. En este caso, para obtener los puntos que se toman en cada eje, se realiza con la relación entre la velocidad de la mesa y la frecuencia de medida, es decir, el tiempo que tarda en tomar cada punto, de esta manera se obtienen 120 puntos por cada eje con un total de 14.400 puntos. El objetivo de microscopio de aumento utilizado es x5. La única variación de estas muestras es la modificación del valor de NPLC, también se incluye el tiempo que se ha tardado en tomar cada una de ellas, como se indica a continuación:

Muestra	NPLC	Tiempo
E	1	1 h 6 min
F	2	1 h 6 min
G	0.5	1 h 6 min
H	0.1	1 h 6 min

Tabla 42. Duración de toma de datos con variación de NPLC



Ilustración 18. Muestra E



Ilustración 19. Muestra F



Ilustración 20. Muestra G



Ilustración 21. Muestra H

En las anteriores imágenes podemos ver que la muestra F no es tan homogénea como el resto de imágenes, lo cual se puede deber a algo externo a la medida o a que no es eficiente cambiar el valor de NPLC a 2. Por otro lado, la muestra H se encuentra más con menor definición de imagen, por lo que no obtenemos un buen resultado al reducir el valor de NPLC a 0.1 a pesar de que se reduzca el tiempo invertido en tomar la muestra. Por esto vamos a comparar las muestras de valor NPLC 1 y 0.5, en las que apenas se aprecian diferencias, como el tiempo de muestreo, que tras finalizar el proceso de toma de datos se aprecia que es el mismo, por lo que seguimos dejando el valor de NPLC 1 que viene por defecto.

Las siguientes muestras que se van a comparar se han realizado con medida discreta para las cuales se ha tomado una medición en un área de 900 μm en el eje X y en el eje Y con 120 puntos en cada eje, un total de 14.400 puntos, con el objetivo de microscopio de aumento x5. La variación de estas muestras es la modificación del valor de NPLC y se ha introducido una variación en la media, también se incluye el tiempo que se ha tardado en tomar cada una de ellas, como se indica a continuación:

Muestra	NPLC	Tiempo
I	1	1 h 8 min
J	2	1 h 52 min
K	0.5	47 min
L	0.1	29 min 52 s

Tabla 43. Duración de toma de datos con variación de NPLC



Ilustración 22. Muestra I



Ilustración 23. Muestra J



Ilustración 24. Muestra K



Ilustración 25. Muestra L

En las imágenes anteriores apenas se pueden apreciar diferencias entre las muestras I, J, K, mientras que en la muestra L se puede ver la imagen con mayor grano y cambios notables y bruscos en la intensidad. Esto nos hace llegar a la conclusión de que, en este caso, no es eficiente reducir demasiado el valor de NPLC a 0.1 a pesar de que haya una gran variación en el tiempo de muestreo respecto al valor por defecto de NPLC 1.

En cambio, al emplear un valor de NPLC 0.5, se logra disminuir el tiempo sin que el resultado final se distancie del obtenido con un valor de NPLC 2.

Por lo tanto, la reducción del valor de NPLC a 0.5 resulta ser efectiva, corroborando los resultados teóricos de la mayoría de pruebas.

Las siguientes muestras que se van a comparar se han realizado con medida discreta para las cuales se ha tomado una medición en un área de 900 μm en el eje X y en el eje Y con 120 puntos en cada uno de ellos, un total de 14.400 puntos, con el objetivo de microscopio de aumento x5 y un valor de NPLC 1. La variación introducida en este caso es en el valor de la mediana. A continuación se indican los valores de la mediana de cada muestra y el tiempo que ha tardado en realizarse:

Muestra	NPLC	MED	Tiempo
M	1	1	1 h 20 min 35 s
N	2	1	2h 3 min 42 s
O	0.5	1	58 min 54 s
P	0.1	1	41 min 38 s

Tabla 44. Duración de toma de datos con variación de NPLC



Ilustración 26. Muestra M



Ilustración 27. Muestra N



Ilustración 28. Muestra O



Ilustración 29. Muestra P

En las muestras anteriores se puede apreciar que al aumentar el tiempo de muestreo, en las muestras M y N, pueden aparecer unas franjas horizontales, lo cual hace que el resultado final no sea realista. Por otro lado, se puede ver que reducir demasiado el tiempo, como en la muestra P, tampoco nos da un resultado favorable ya que se aprecia nuevamente grano en la imagen y esta pierde uniformidad. Por lo que, en este caso, resulta interesante reducir el valor de NPLC a 0.5, ya que esto disminuye de manera considerable el tiempo que se tarda en tomar los datos en comparación al valor de 1.

Comparando estas muestras con las anteriores sin filtro de mediana, se puede apreciar que no hay una mejora ni diferencia notable y, dado que en ambos casos utilizar un NPLC con valor 0.5 es beneficioso, no hay ningún motivo aparente para aplicar este filtro.

Para terminar con este estudio, se van a comparar tres muestras tomadas en medida discreta con una medición en un área de 3000 μm en el eje X y en el eje Y con 400 puntos en cada eje, un total de 160.000 puntos, con el objetivo de microscopio de aumento x5. La variación introducida en este caso es en el valor de NPLC. A continuación se indican estos valores y el tiempo que ha tardado en tomarse las muestras:

Muestra	NPLC	Tiempo
Q	1	8 h 36 min 20 s
R	2	11 h 16 min 29 s
S	0.5	7 h 16 min 41 s

Tabla 45. Duración de toma de datos con variación de NPLC

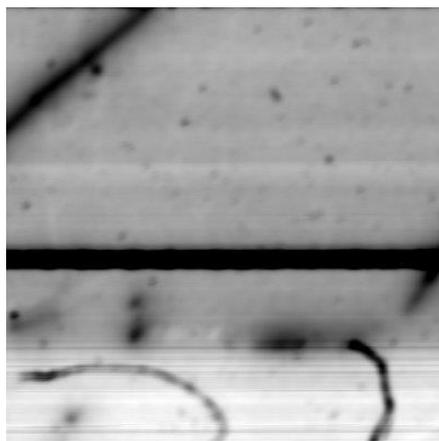


Ilustración 30. Muestra Q

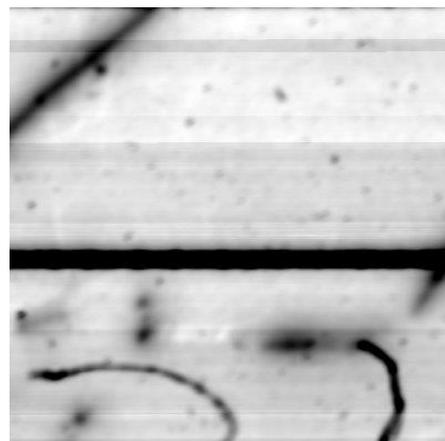


Ilustración 31. Muestra R

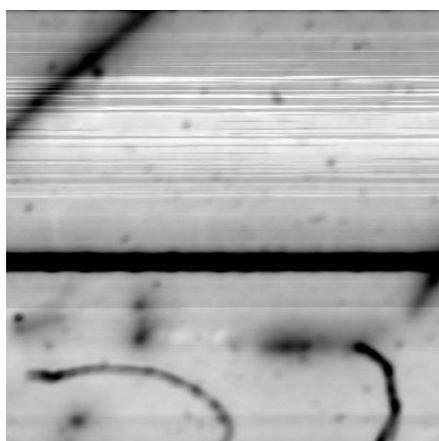


Ilustración 32. Muestra S



Analizando las fotografías anteriores, se puede apreciar que introduciendo un mayor número de puntos en un área más amplio, la tendencia es la misma que en los casos anteriores, no hay una gran diferencia entre los valores de NPLC 0.5, 1 y 2. Las imágenes son similares en los tres casos y llegamos a la conclusión de que las rayas horizontales aparecen de manera aleatoria sin quitar eficiencia a los resultados obtenidos pero con mayor frecuencia cuanto más larga sea la medida, mayor número de puntos..

Con esto **podemos concluir que resulta ventajoso reducir el valor de NPLC a 0.5 ya que se reduce el tiempo de muestreo** y el resultado obtenido no varía mucho respecto al valor de NPLC 1 por defecto. Además de esto, también se puede afirmar que **la aplicación de los filtros de media y mediana en la realización de estos mapas no presentan ninguna ventaja cualitativa**, pese a que en algunas pruebas si parecía que lo iba a hacer de forma cuantitativa.

Los siguientes análisis se han realizado con fragmentos de células solares bifaciales, esto quiere decir que estas permiten captar energía por la parte superior de la célula, la cual aprovecha la radiación directa, e inferior, la cual aprovecha la radiación reflejada.

En primer lugar, se han analizado muestras tomadas en medida discreta con una medición en un área de 900 μm en el eje X y en el eje Y, con 120 puntos en cada eje, un total de 14.400 puntos, con el objetivo de microscopio de aumento x5. En estas muestras se ha introducido la variación entre ellas de los valores de NPLC. A continuación se indica el tiempo que ha tardado en tomarse cada muestra:

Muestra	NPLC	Tiempo
T	1	46 min 6 s
U	2	1 h
V	0.5	39 min

Tabla 46. Duración de toma de datos con variación de NPLC

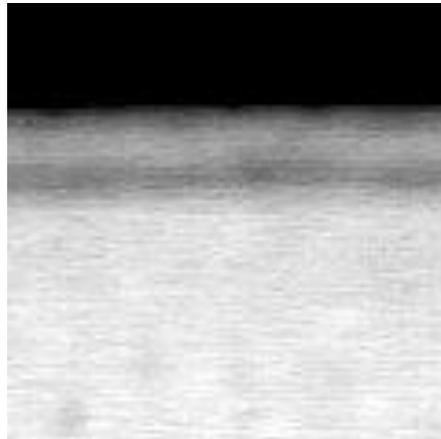


Ilustración 33. Muestra T

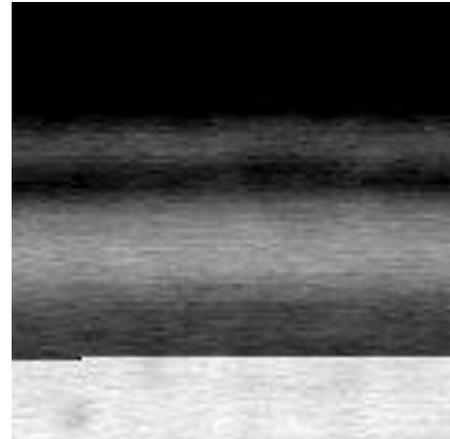


Ilustración 34. Muestra U

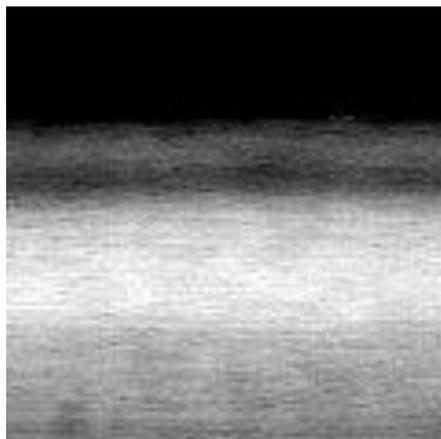


Ilustración 35. Muestra V

Analizando las fotografías previas, se observa que al modificar el valor de NPLC a 0.5 y 2 no se mejora la calidad de la imagen, sino que esta empeora. Por lo tanto, podemos concluir que la mejor opción, en este caso, es mantener el valor de NPLC que viene predefinido en el sistema, que es NPLC 1.

En segundo lugar, muestras en medida continua para las cuales se ha tomado una medición en un área de $900 \mu\text{m}$ en el eje X y en el eje Y. En este caso, para obtener los puntos que se toman en cada eje, se realiza con la relación entre la velocidad de la mesa ($50 \mu\text{m/s}$) y la frecuencia de medida, es decir, el tiempo que tarda en tomar cada punto (0.25s), de esta manera se obtienen 72 puntos por cada eje con un total de 5.184 puntos. El objetivo de microscopio de aumento utilizado es $\times 5$. La única variación de estas muestras es la modificación del valor de NPLC, también se incluye el tiempo que se ha tardado en tomar cada una de ellas, como se indica a continuación:

Muestra	NPLC	Tiempo
W	1	24 min
X	2	24 min
Y	0.5	24 min

Tabla 47. Duración de toma de datos con variación de NPLC

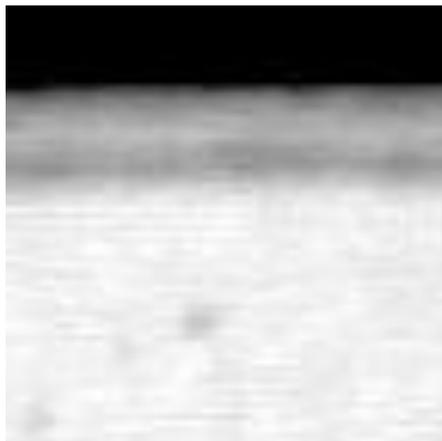


Ilustración 36. Muestra W

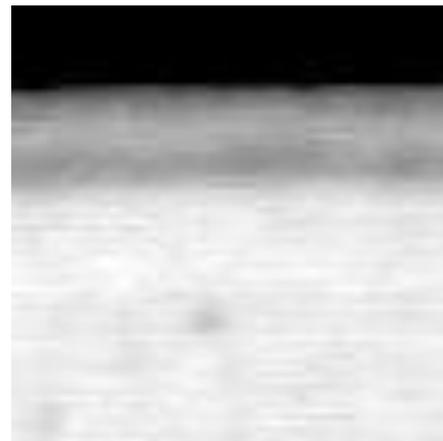


Ilustración 37. Muestra X

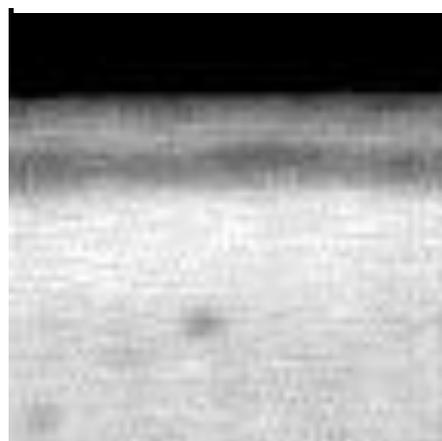


Ilustración 38. Muestra Y



Analizando las fotografías anteriores, se puede apreciar que la tendencia es la misma que en los casos anteriores, no hay una gran diferencia entre los valores de NPLC 0.5, 1 y 2. Las imágenes son similares en los tres casos, pero se puede apreciar que cuando se reduce el valor de NPLC a 0.5 no se produce una mejora, sino lo contrario, se pierde calidad en la imagen. Por esto podemos concluir, que en este caso la mejor solución es mantener el valor de NPLC en el que viene definido en el sistema, NPLC 1.

3.4 Movimientos de barrido

La mesa posicionadora, en la cual se colocan las muestras, se mueve para permitir tomar datos en cada punto de la muestra colocada en ella. En el programa actual tenemos dos tipos de medidas, punto a punto o medida discreta y medida continua.

La mesa posicionadora se mueve en los ejes X e Y y se programa para obtener como resultado una imagen de las dimensiones requeridas donde el punto (0,0) en nuestra mesa se ubica en la parte inferior derecha del mapa y siempre mide de derecha a izquierda, volviendo después de cada fila al inicio del margen derecho para medir una nueva fila.

3.4.1 Movimiento discreto

Tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.1, la mesa posicionadora realiza una parada en cada punto para obtener la información de corriente.

3.4.2 Movimiento continuo

Tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.1, lo que diferencia este movimiento del anterior, es que los datos se obtienen mientras la mesa se está deslizando constantemente.

.

3.4.3 Movimiento lineal actual sin zigzag

La mesa comienza en la posición (0,0) e inicia el movimiento hacia la derecha (haciendo que los puntos medidos sean hacia la izquierda) Como en la ilustración 52, es decir, se desliza sobre el eje X manteniendo fija la posición del eje Y para IR almacenando todos los datos del eje en un *array*. Cuando se ha completado una fila del *array*, la mesa cambia su posición en el eje Y, es decir, sube una posición, y vuelve al punto inicial del eje X para poder comenzar

a tomar datos de nuevo, y así sucesivamente hasta que ha completado las filas de X e Y con las características que se han indicado inicialmente.

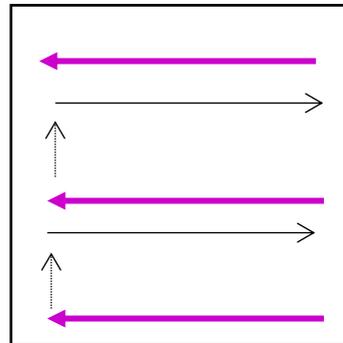


Ilustración 39. Movimiento lineal

El vector morado indica las posiciones en las que se toman los datos y el negro el movimiento de la mesa para colocarse en el primer punto de cada línea medida.

En este movimiento, se pueden tomar datos tanto de manera continua como discreta.

3.4.4 Movimiento zigzag

Este tipo de movimiento se ha introducido en la programación del desplazamiento de la mesa posicionadora para tratar de reducir el tiempo de muestreo y observar si los resultados obtenidos cambian o no de los obtenidos con el movimiento lineal anterior.

En este caso, cuando la mesa cambia de posición en el eje Y, no vuelve a la posición 0 del eje X, sino que comienza a tomar datos en sentido inverso hasta que llega a la posición inicial del eje X. Cuando se encuentra en esa posición, se suma una posición y comienza a tomar datos de nuevo en el eje X.

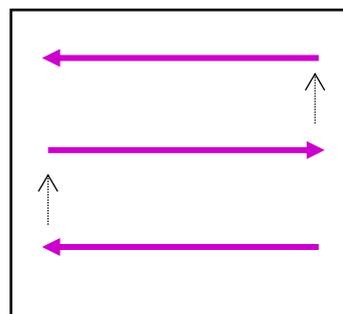


Ilustración 40. Movimiento zigzag

El cambio en la programación se ha realizado en los vectores que almacenan las posiciones absolutas de la mesa a las que esta se mueve en cada modo (continuo o discreto) para realizar el mapa , este cambio se ha hecho el cambio para medidas continuas y discretas.

3.4.5 Comparación de resultados

Se han realizado dos análisis comparando tres muestras tomadas con movimiento lineal y en zigzag de manera discreta y, por otro lado, se han realizado de manera continua.

Las medidas se han tomado en diferentes zonas de la muestra utilizando el objetivo x5.

3.4.5.1 Medidas discretas

- Medida 1: área de muestreo de $1500 \times 1500 \mu\text{m}$ con 160×160 puntos. El tiempo que ha tardado en tomarse la muestra sin zigzag ha sido de 1 hora, 21 minutos y 42 segundos, mientras que con movimiento de zigzag, el tiempo ha sido de 1 hora, 20 minutos y 57 segundos.

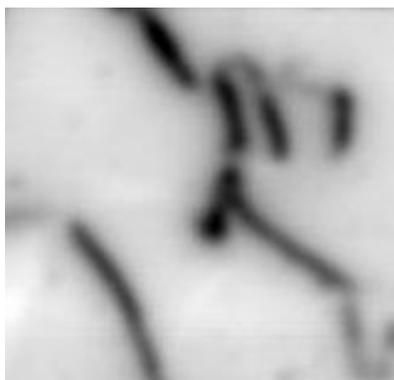


Ilustración 41. Muestra 1 sin zigzag



Ilustración 42. Muestra 1 con zigzag

Se introduce una mejora en el tiempo de muestreo al realizar la toma de datos con el movimiento en zigzag, este se reduce en un 2% aproximadamente.

Por otro lado, observando las imágenes, podemos ver que no hay apenas diferencia cualitativa entre los mapas obtenidos.

Con lo anterior, podemos concluir que se introduce una ligera mejora que permite ahorrar tiempo, lo que permite que se realice el proceso más rápido y se podrían realizar más estudios en el mismo período de tiempo, esta mejora aumentará cuanto mayor sea la medida y por tanto el tiempo necesario para realizarla.

3.4.5.2 Medidas continuas

No se puede implementar el zigzag en la medida continua correctamente ya que al establecer la velocidad y frecuencia de lectura de intensidades, la posición de los puntos medidos no es exacta en los últimos puntos de cada línea del mapa (la distancia teórica entre puntos no se mantiene al final de cada una de ellas). Por esto, al realizarse el barrido en zigzag, se produce una imagen donde cada línea está desplazada con respecto a las líneas inferior y superior.



Ilustración 44. Medida continua sin zigzag



Ilustración 43. Medida continua con zigzag

3.5 Autoenfoco

Una dificultad que aparece en el sistema de adquisición de imágenes es determinar la posición de la mesa posicionadora que da como resultado una imagen más enfocada, por lo que era conveniente implementar un sistema de autoenfoco. . Trabajar con desenfoque provoca variaciones en el diámetro del spot y, por ende, en el volumen de generación, lo que resulta en una pérdida de nitidez en las imágenes LBIC y una representación inexacta de su comportamiento.

Gracias al procesamiento digital de imágenes se pueden implementar algoritmos de autoenfoco que, aplicados a un conjunto de imágenes del mismo área y diferente enfoque, permiten determinar el grado relativo de enfoque [3].

Los algoritmos principales utilizados en el procesamiento de imágenes son:

- **Diferenciación de Imágenes**



Su funcionamiento se basa en la variación de la intensidad de los píxeles de una imagen, es decir, una imagen con mayor grado de enfoque presentará una mayor variación en los píxeles. Por lo tanto al calcular la diferencia entre los píxeles de dos imágenes, se obtiene una medida del grado de enfoque.

- **Técnicas de segmentación**

Este algoritmo emplea la primera y segunda derivada de la imagen, las cuales actúan como filtros para la detección de bordes. En una imagen bien enfocada, estos bordes serán más pronunciados en comparación con una imagen desenfocada. La cuantificación de los píxeles de la imagen a través de su histograma, después de aplicar estos filtros, proporciona una estimación del grado de enfoque real.

- **Funciones en el dominio de la frecuencia**

Una imagen bien enfocada presenta cambios bruscos entre píxeles adyacentes. Al aplicar la transformada de Fourier a la imagen, estos cambios se manifiestan como frecuencias altas en el dominio de la frecuencia. La cuantificación de estas frecuencias permite determinar el grado de enfoque de la imagen.

- **Convolución de matrices**

Tras el análisis de la intensidad de las imágenes resultantes, tras la convolución de matrices específicas con la imagen objetivo, es posible identificar en qué nivel de enfoque se encuentra cada una de ellas.

Este método resulta bastante preciso para cuantificar el enfoque de imagen, por lo que es el que se va a implementar en el presente estudio.

Las mediciones de enfoque se realizan en una fase preliminar y no durante el proceso de medida, ya que buscar el enfoque en cada punto implicaría tiempos de mapeo muy largos y aplicar el autoenfoco con un haz láser no es tan sencillo

La idea por tanto es, utilizando los valores de la posición en el eje Z obtenidos a partir de varios puntos de enfoque conocidos dentro del área de estudio (concretamente en los extremos del área de medida), construir una matriz 2D con las posiciones interpoladas de Z correspondientes a cada punto del mapa. Esta matriz representará los movimientos en Z necesarios para mantener el enfoque adecuado y, junto con los vectores de posición X e Y, dictaminará el movimiento de la mesa en cada para cada punto del mapa. De esta manera se



corregirá la diferencia de altura y por tanto de enfoque provocada por la posición de la mesa o la muestra con respecto al objetivo del microscopio.

3.5.1 Determinación de la posición de enfoque

Inicialmente, en la selección del área de medida se ilumina la superficie de la muestra con luz blanca proveniente de una lámpara halógena ajustada al microscopio. Esta luz incidirá sobre la superficie y la luz reflejada será captada por la cámara CCD ubicada en la parte superior del microscopio vislumbrando así la zona de la muestra en tiempo real. Es importante ajustar la potencia de la luz para evitar la saturación del sensor de la cámara, ya que ese caso, el proceso podría no continuar.

Para enfocar la imagen se puede realizar un proceso de prueba y error subiendo y bajando la mesa manualmente y eligiendo el usuario el enfoque de manera subjetiva, pero se ha implementado un algoritmo para que este proceso sea automático y objetivo.

La imagen capturada por la cámara será sometida a un tratamiento basado en una convolución con un kernel de gradiente, el cual calcula el gradiente de la intensidad de una imagen en cada punto (píxel). Un filtro de gradiente resalta las variaciones de intensidad de la luz en una dirección específica, lo que perfila los bordes y revela la textura. Un filtro de convolución de gradiente es un filtro derivativo de primer orden, cuyo núcleo utiliza los siguientes modelos:

0	-1	-1	0	1	1
1	0	-1	-1	0	1
1	1	0	-1	-1	0

Kernel 1

Kernel 2

En el Kernel 1, destaca que el aumento de intensidad de luz sucede en la dirección que va desde noreste a suroeste. Oscurece los píxeles donde la intensidad de la luz disminuye a lo largo de esa dirección. Este procesamiento realiza un contorno de los bordes delanteros de regiones brillantes en el nordeste.

En el Kernel 2, destaca que el aumento de la intensidad de luz sucede en la dirección que va de suroeste a noreste. Oscurece los píxeles donde la intensidad de la luz disminuye a lo largo de la misma dirección, Este procesamiento realiza un contorno de los bordes frontales de regiones brillantes en el suroeste.

La posición óptima de enfoque de la muestra se determina moviendo la mesa en la dirección Z mientras las imágenes obtenidas con la cámara son convolucionadas. Debido a las características del kernel, una posición muy desenfocada resultará en una imagen de convolución muy oscura.

Al acercarse al punto de enfoque, la imagen se volverá más luminosa hasta alcanzar un valor máximo de claridad. Si se continúa moviendo la dirección Z más allá del punto de enfoque, la luminosidad disminuirá nuevamente hasta volverse oscura. La claridad u oscuridad de la imagen se cuantifica sumando la intensidad de luz de todos los píxeles (en un rango de 0 a 255) y dividiéndola entre el número total de píxeles, obteniendo un valor 0 para la imagen más oscura y de 255 para la más clara. De esta forma, la imagen con una mayor intensidad tras la convolución será la más enfocada.

3.5.2 Matriz de enfoque para el mapeado

El algoritmo de autoenfoco para cada punto del mapa se basa en la interpolación de las posiciones de cada punto en base a la ecuación de un plano previamente calculado a partir de puntos con enfoque conocido.

Con los puntos 1, 2 y 3 se define la ecuación de un plano, el correspondiente al área que se va a muestrear y sus posiciones con respecto al objetivo del microscopio. Conociendo las posiciones de todos los puntos y el número de puntos total para el mapeo LBIC sobre el área delimitada, se pueden reemplazar las coordenadas de los puntos X e Y en las ecuaciones del plano correspondiente para obtener la posición Z de enfoque.

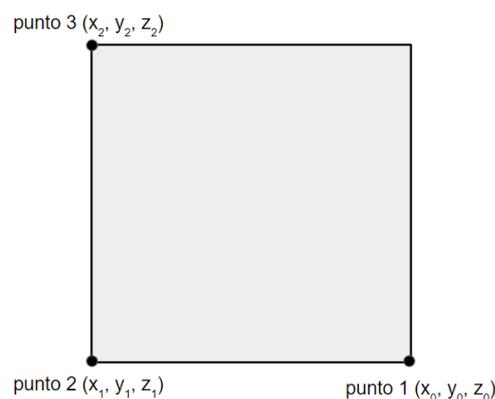


Ilustración 45. Matriz de autoenfoco

Es un método rápido para el enfoque y es útil para objetivos de baja magnificación y en situaciones donde las células son tan planas que su curvatura es despreciable en comparación con su inclinación.



El cálculo y programación de la obtención de la ecuación del plano descrito se realiza de la siguiente manera (solo aplicable a medidas discretas o punto a punto ya que conocemos con exactitud las coordenadas X e Y de cada punto):

1. Nos colocamos encima de cada punto de los vértices del cuadrado que vamos a medir como se muestra en la ilustración 60 (abajo derecha, abajo izquierda y arriba izquierda) y enfocamos en cada caso, así tenemos 3 puntos con sus coordenadas correspondientes X, Y, Z).
2. Calculamos la ecuación general del plano con esos puntos:

$$\begin{cases} x - x_0 = u_1 \cdot \lambda + v_1 \cdot \mu \\ y - y_0 = u_2 \cdot \lambda + v_2 \cdot \mu \\ z - z_0 = u_3 \cdot \lambda + v_3 \cdot \mu \end{cases}$$

Este sistema tiene que ser compatible determinado en las incógnitas λ y μ . Por tanto, el determinante de la matriz ampliada del sistema con la columna de los términos independientes tiene que ser igual a cero.

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & u_1 & v_1 \\ y - y_0 & u_2 & v_2 \\ z - z_0 & u_3 & v_3 \end{vmatrix} = 0$$

Desarrollando el sistema obtenemos:

$$\begin{vmatrix} u_2 & v_2 \\ u_3 & v_3 \end{vmatrix} \cdot (x - x_0) - \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_3 & v_3 \end{vmatrix} \cdot (y - y_0) + \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{vmatrix} \cdot (z - z_0) = 0$$

Damos los valores:

$$A = \begin{vmatrix} u_2 & v_2 \\ u_3 & v_3 \end{vmatrix}$$

$$B = - \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_3 & v_3 \end{vmatrix}$$

$$C = \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{vmatrix}$$

Sustituimos:

$$A \cdot (x - x_0) + B \cdot (y - y_0) + C \cdot (z - z_0) = 0$$

Realizamos las operaciones y damos a D el valor:

$$D = -A \cdot x_0 - B \cdot y_0 - C \cdot z_0$$

Obtenemos la ecuación general de plano:

$$A \cdot x + B \cdot y + D = 0$$

En nuestro caso, la D tendrá valor 0 ya que consideramos el punto de partida X_0, Y_0, Z_0 desde donde se empieza a medir, punto ubicado abajo a la derecha (punto donde comienza el mapeado).

3. Ya en la configuración de la medida, al introducir las distancias en los ejes y los punto en cada eje se obtienen los vectores de posiciones en X y en Y. Con esas posiciones se calcula la posición Z para cada punto a partir de la ecuación del plano (se sustituye cada X e Y en la ecuación para obtener Z). De esta manera se crea una matriz 2D con la posición Z a la que debe ir la mesa en cada punto.
4. Cada vez que la mesa se mueva al siguiente punto (X,Y) también lo hará a la posición Z de la matriz.

A continuación, se van a comparar las imágenes capturadas con autoenfoco y sin autoenfoco de una muestra, destacando dos detalles de la misma.



Ilustración 46. Muestra con autoenfoco



Ilustración 49. Muestra sin autoenfoco

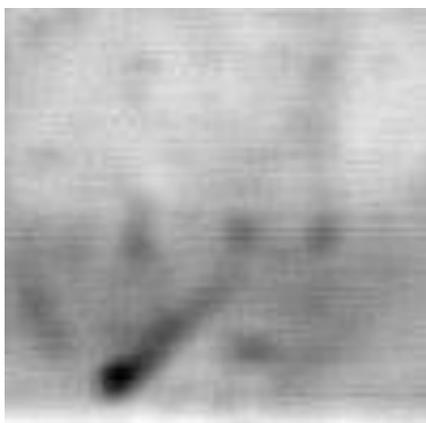


Ilustración 47. Detalle 1 de la muestra con autoenfoco

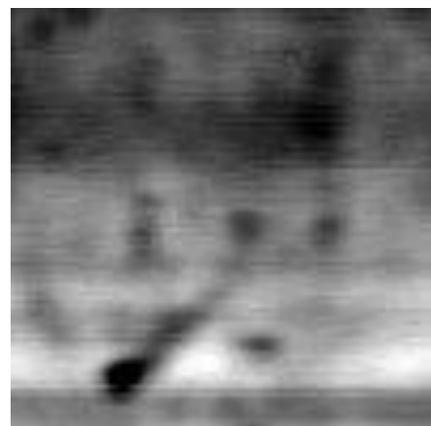


Ilustración 48. Detalle 1 de la muestra sin autoenfoco



Ilustración 51. Detalle 2 de la muestra con autoenfoque



Ilustración 50. Detalle 2 de la muestra sin autoenfoque

En las imágenes anteriores se puede apreciar una mejora en los resultados obtenidos cuando se ha implementado el autoenfoque en el sistema en el zoom de la esquina superior izquierda (en este caso la esquina más desnivelada con respecto al punto inicial), por lo que podemos confirmar que es un procedimiento útil que mejorará los mapas, especialmente en situaciones de gran desnivel típicamente en zonas relativamente amplias.



4. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado se evaluaron diversas técnicas para mejorar el sistema de medida de corrientes inducidas por haz de luz (LBIC), con un enfoque particular en la optimización del hardware y software asociados. A continuación se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas a partir de los resultados experimentales:

- Impacto del valor de NPLC en la calidad de las imágenes

Se ha demostrado que reducir el valor de NPLC a 0.1 conlleva una significativa reducción en el tiempo de muestreo a costa de que las imágenes muestran un mayor desenfoque, lo que limita su utilidad para aplicaciones precisas de caracterización de células fotovoltaicas.

Por otro lado, comparando los valores de NPLC 0.5, 1 y 2, se puede apreciar que no existen diferencias sustanciales en la calidad de las imágenes. El valor de NPLC 0.5 logró reducir el tiempo de muestreo de manera efectiva sin comprometer significativamente la precisión de las mediciones, haciendo este valor una opción eficaz para aplicaciones prácticas.

- Consideraciones sobre el tiempo de muestreo

Se observó que variar el tiempo de muestreo puede introducir artefactos en las imágenes, como franjas horizontales o granulación, afectando la interpretación de los resultados. Es fundamental mantener un equilibrio adecuado entre la velocidad de adquisición de datos y la calidad de imagen para asegurar mediciones precisas.



5. LÍNEAS DE MEJORA

A partir de los resultados obtenidos en este estudio se identifican varias áreas clave para mejorar la caracterización LBIC. Se sugiere enfocarse en las siguientes líneas de mejora:

1. Procesamiento de imágenes avanzado

Se recomienda explorar técnicas adicionales de procesamiento de imágenes que puedan mitigar los efectos adversos de las variaciones en el tiempo de muestreo. Implementar algoritmos de reconstrucción de imagen y técnicas de filtrado digital permitirá mejorar significativamente la calidad visual de las imágenes obtenidas durante la caracterización LBIC. Estas técnicas podrían ayudar a reducir imperfecciones y mejorar la resolución, facilitando una interpretación más precisa de los datos recogidos.

2. Investigación de algoritmos de reconstrucción de imágenes

Es fundamental investigar y desarrollar algoritmos de reconstrucción de imagen específicamente adaptados para las necesidades del sistema LBIC. Estos algoritmos pueden optimizar la claridad y la precisión de las imágenes, incluso bajo condiciones variables de tiempo de muestreo. La aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento de señales y visión por computadora jugará un papel crucial en el éxito del sistema, mejorando la fiabilidad de las mediciones y la capacidad de caracterización de las células fotovoltaicas

3. Aprovechamiento del espectrómetro incorporado

Incluir en el sistema el espectrómetro recientemente incorporado, actualmente en desuso, para realizar mediciones de fotoluminiscencia representa una oportunidad estratégica. Esto permitirá ampliar las capacidades del sistema LBIC, proporcionando datos complementarios sobre las propiedades ópticas y electrónicas de las células fotovoltaicas. Integrar este espectrómetro podría enriquecer significativamente la investigación, facilitando un análisis más completo y detallado de los materiales y estructuras estudiadas.



6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Freiberg Instruments. (s.f.). *Light beam induced current (LBIC)*

[2] Gonzalez Frances, D. (2021). *Mejora en hardware y software de un sistema de medida de corrientes inducidas por haz de luz (LBIC)*. [Trabajo de fin de grado, Universidad de Valladolid]

[3] Moralejo Ochoa, B. (s.f.). *Desarrollo y optimización de sistemas de corrientes inducidas ópticamente y de imágenes de luminiscencia para la caracterización de células fotovoltaicas*. [Tesis doctoral].

[4] Buerhop, C., Niemann, L., Hammerschmidt, M., & Reise, C. (2013). *Light-beam-induced current (LBIC) technique for semiconductors and ICs testing*.

[5] Einstein, A. (1905). *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*. *Annalen der Physik*, 17(6), 132-148.

[6] National Instruments. (s.f.). *LabVIEW*.

Recuperado de <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>

[7] Masterhacks. (2015). *Manual básico de programación en LabVIEW*

[8] Materiales Laboratorio. (s.f.). *Electrómetro*.

Recuperado de <https://materialeslaboratorio.com/electrometro/>